廉纯皓, 郭凤霞, 曾凡辉, 等. 2020. 雷暴云中起电活动对动力和微物理过程的影响 [J]. 大气科学, 44(1): 138−149. LIAN Chunhao, GUO Fengxia, ZENG Fanhui, et al. 2020. Influence of Electrical Activity on Dynamical and Microphysical Processes in Thunderstorms [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 44(1): 138−149. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1903.18240

雷暴云中起电活动对动力和微物理过程的影响

廉纯皓　郭凤霞　曾凡辉　甘明骏　黎奇　刘泽　张晓黄　蔡彬彬　张坤

南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室/气候与环境变化国际合作联合实验室/气象灾害预报预警与评估协同创新中心/中国气象局气溶胶与云降水重点开放实验室，南京 210044

摘　要　本文通过改变三维强风暴动力—电耦合数值模式中电场参量的引入条件，将电场带入积云运动方程及水凝物下落末速中，模拟比较了有无电场影响下模拟云的主要差异。在考虑电场的作用下，由于初期电活动并不剧烈，降水强度与云内风速变化较小；随着云中起电活动的增强，考虑电场影响的模拟云内上升、下沉风速均有所增加，对应时段的降水强度有明显起伏，但累计液态与固态降水量增加微弱；同时，闪电数目增多，闪电发生得更早，持续的时间更长，电场的影响是不可忽视的。模拟发现：雷暴成熟时期，由于电场力的作用，雹粒子瞬时落速变化的极值均超过 10 m s^{-1}，霰粒子瞬时落速变化极值也超过了 7 m s^{-1}。但强电场的区域较小，粒子下落时经过强电场区域的时间较短，所以落速极值变化不大，相比之下电场力对半径较小粒子的下落末速的瞬时改变更显著。电场通过对粒子下落速度的影响，改变了水凝物粒子主要源项的生成率，增加雨滴、冰晶粒子的生成率，减小霰、雹粒子的生成率，调整了三相水凝物粒子的时空分布，使云中水汽总量增加 9%，释放潜热增加 7%，为云体的进一步发展提供了内能。

关键词　雷暴云　电场　动力场　微物理场　数值模拟

文章编号　1006-9895(2020)01-0138-12　　**中图分类号**　P427.3　　**文献标识码**　A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1903.18240

Influence of Electrical Activity on Dynamical and Microphysical Processes in Thunderstorms

LIAN Chunhao, GUO Fengxia, ZENG Fanhui, GAN Mingjun, LI Qi, LIU Ze, ZHANG Xiaohuang, CAI Binbin, and ZHANG Kun

Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education (KLME)/ Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change (ILCEC)/Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters (CIC-FEMD)/ Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

Abstract　Herein, we compare the primary simulation differences when considering the electric field effect (EFE) in the 3D dynamic−electric coupling numerical cloud model, wherein EFE was introduced into the thermodynamic equations and falling velocities of different hydrometeors. In the EFE calculations, owing to weak initial electrical activity, the dynamical field and precipitation intensity changed only slightly. With enhanced electrical activity, the updraft and

收稿日期　2018-10-23；**网络预出版日期**　2019-05-14

作者简介　廉纯皓，男，1991 年出生，硕士研究生，主要从事雷暴云数值模拟研究。E-mail: smilebrett@yahoo.com

通讯作者　郭凤霞，E-mail: guofx@nuist.edu.cn

资助项目　国家重点研发计划项目 2017YFC1501503，国家自然科学基金项目 41875005、91537209

Funded by　National Key Research and Development Program of China (Grant 2017YFC1501503), National Natural Science Foundation of China (Grants 91537209, 41875002)

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

downdraft speeds increased and the precipitation intensity exhibited both increase and decrease periods, whereas the total precipitation increased only slightly. Additionally, the amount of lightning nearly doubled, and it was generated earlier and lasted longer; hence, its feedback effect cannot be ignored. The results show that the peaks of the hail and graupel particles' grid-scale mass-weighted instantaneous falling velocities were 10 m s^{-1} and 7 m s^{-1}, respectively. Because of the narrow range of the strong electrical field and the direct transient effect on particles of the electric field force, the maximum falling velocities of hydrometeors only fluctuate slightly, but differences in the falling velocities are more obvious among small-size particles. By controlling the hydrometeor falling velocities, the electric field changes the particles' primary production, increases the production rates of raindrops and ice crystals, decreases the production rates of graupel and hail, adjusts the spatiotemporal distributions of the vapor liquid and solid state hydrometeors, increases water vapor by 9% and latent heating by 7%, and provides internal energy for the further development of thunder clouds.

Keywords Thunderstorm, Electric field, Dynamical field, Microphysical field, Numerical simulation

1 引言

流场、微物理场及电场是雷暴发展过程中三个重要的参量场，它们之间有着密切的耦合关系（Takahashi，1976）。有学者发现，相对热浮力，电场力是一个小量（Vonnegut，1954）。也有理论研究表明，雷暴云中的电场会加速气团运动，其作用力产生的加速度在极端情况下堪比重力加速度，但由于强电场区域不大，电场力带来的速度变化是局部的（Vonnegut，1963）。Gay et al.（1974）计算得出：当粒子半径达到1.5 mm，且携带−160 pC电量的降水粒子，在100 kV m^{-1}的垂直电场中下落速度会改变约0.6 m s^{-1}。张义军和言穆弘（1991）发现在强风暴中，电场能产生与动力涡度比拟的电涡度，带电粒子也会受电场的影响作水平旋转运动。Rawlins（1982）通过数值模拟发现，当雷暴发展旺盛时，局部强电场作用下降水粒子受到的电场力和重力同量级。

Saunders and Wahab（1975）研究发现强电场能影响水凝物间的碰并过程，更易形成大的降水元。Williams and Lhermitte（1983）等利用多普勒雷达数据发现，在局部强电场区域，降水粒子下落速度与电场的相关性较好。黄美元和徐华英（1999）对比了仅考虑重力碰并与引入电碰并后的云滴谱，发现考虑电碰并，滴谱会更宽。以上的研究表明，电场与降水粒子间碰并过程关系密切，云内电场会调节微物理场。

众多学者（Takahashi，1976；Orville and Kopp，1977；许焕斌和王思微，1985，1988，1990；孔凡铀等，1990,1991）利用积云模式，对风暴中粒子的形成、增长与运动过程进行了数值模拟，详尽地考虑了云内动力和微物理过程间的相互影响，但忽略了电活动。后来，一些研究者（Takahashi，1987；Mansell et al.，2002；谭涌波等，2007；郭凤霞等，2010）在积云模式中添加了起放电参数化方案，对雷暴云发展过程中动力及微物理过程对电活动的影响进行了大量的模拟讨论，但鲜少涉及电活动对云的动力和微物理过程的反馈作用。

在一般的积云环境中，水凝物受重力和空气阻曳力的作用，但在强电场环境中，则必须考虑电场力的影响。水凝物是云内电荷的主要携带者，所受电场力与背景电场强弱、自身携带的电荷量及电荷极性等因素都有关系（言穆弘等，1996）。孙安平等（2004）在一个三维时变积云动力电耦合模式中考虑了三维电场对气块速度的影响和电场力对粒子下落速度的作用，通过模拟CCOPE计划（Cooperative Convective Precipitation Experiment）中的一次雷暴过程，发现电场力对雷暴云发展的影响主要在成熟阶段，强电场会通过影响荷电粒子的下落速度，改变粒子的转换过程，重构水凝物的时空分布，但模式中缺少了放电过程。张义军等（2004）采用相同的模式，着重讨论了电活动对冰相粒子增长以及运动的影响，发现电场改变了粒子的下落速度，主要影响了碰并和融化过程，最终霰的总量减少，雹的源汇项均减少，但汇项减少更多，从而更利于雹增长并降落至地面。孙凌等（2018）在WRF模式中推导了电作用下霰、雹的下落末速度公式，发现单个格点上霰、雹加权降落末速的瞬时改变值超过4 m s^{-1}，电场力对直径小、浓

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

度低的霰和雹粒子影响更明显，通过对粒子下落末速的调整，增强了雷暴云内的感应、非感应起电率，且前者远大于后者。鉴于目前讨论雷暴云电场通过影响水凝物粒子下落速度，对动力与微物理过程反馈作用的研究较少，较早的模拟试验中缺少了放电的参数化方案，忽视了放电过程对垂直电场影响，且电活动对粒子的影响中，有些是直接的力作用，有些是通过微物理过程间接并持续的响应。因此，本文利用一个考虑电场参量的三维强风暴动力电耦合数值模式，通过在时间序列上展开，对比讨论了在模拟云整个生命史中加入电场参数后，反馈在动力场、降水场以及相变过程中的演变差异。

2 模式介绍

本文采用的三维时变积云动力—电耦合数值模式是在孔凡铀等（1990, 1991）建立的三维时变雹云模式中加入了起放电参数化方案后发展而来。它是由大气运动方程、热力学方程、水物质连续方程、水物质电荷密度方程以及自由离子浓度方程构成的闭合方程组，考虑了水汽、云滴、雨滴、冰晶、霰、雹、雪七种水物质间26种微物理转换过程（孙安平等，2000，2002a，2002b）。感应起电参数化方案采用Ziegler et al.（1991）的方案，参考了Mansell et al.（2002）的研究结果，即冰粒子间传导率低、接触时间短，因此只考虑霰、雹与云滴间的感应碰撞。非感应起电机制采用Saunders et al.（1991）的参数化方案，考虑了霰、雹与冰晶间在碰撞弹回过程中的电荷转移。放电参数化方案在Mansell et al.（2005）方案基础上，改进了击穿阈值的选择和闪电通道感应电荷的分配过程（郭凤霞等，2015）。对流的启动方式采用热泡扰动，水平扰动半径8 km，垂直扰动半径4 km，模拟域范围为36 km×36 km×18.5 km，三维格距为1 km×1 km×0.5 km，大、小时步的积分步长分别为10 s和1 s，模拟总时长60 min。

模式中考虑了两种电场影响模拟云的途径，即电场对空气运动及对水凝物下落速度的影响。首先假定大气为无粘性可压缩的流体，在忽略地转偏向力下，粒子在下落运动中受周围空气的拖曳力、重力以及电场力作用。将电场力引入积云运动方程，参考张义军等（2004）的推导结果，得到的大气运动方程组如下：

$$\frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}t}+c_p\bar{\theta}_\mathrm{v}\frac{\partial\sigma}{\partial x}=\frac{\rho_\mathrm{T}}{\rho_\mathrm{a}}E_x+D_u, \tag{1}$$

$$\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}+c_p\bar{\theta}_\mathrm{v}\frac{\partial\sigma}{\partial y}=\frac{\rho_\mathrm{T}}{\rho_\mathrm{a}}E_y+D_v, \tag{2}$$

$$\frac{\mathrm{d}w}{\mathrm{d}t}+c_p\bar{\theta}_\mathrm{v}\frac{\partial\sigma}{\partial z}=\frac{\rho_\mathrm{T}}{\rho_\mathrm{a}}E_z+g\left(\frac{\theta'}{\bar{\theta}}+0.608Q'_\mathrm{v}-Q_\mathrm{t}\right)+D_w, \tag{3}$$

其中，u、v、w表示单位质量气块的三维速度矢量分量，c_p为干空气的定压比热，$\bar{\theta}_\mathrm{v}$为虚位温，σ表示理想气体在干绝热过程中温度与压强的关系。ρ_T表示空间电荷浓度，ρ_a为空气密度，E_x、E_y、E_z表示电场的三维分量。θ'与$\bar{\theta}$分别为位温变化与环境位温，g为重力加速度，Q'_v与Q_t表示水汽与水凝物的比含水量。D_u、D_v、D_w分别是次网格尺度项。其中

$$\sigma=\left(\frac{p}{p_0}\right)^{R_\mathrm{d}/c_p}=\left(\frac{R_\mathrm{d}}{p_0}\rho_a\vartheta_\mathrm{v}\right)^{R_\mathrm{d}/c_v}, \tag{4}$$

$$\rho_\mathrm{T}=e\left(n_+-n_-\right)+Q_\mathrm{ce}+Q_\mathrm{re}+Q_\mathrm{ge}+Q_\mathrm{he}+Q_\mathrm{ie}, \tag{5}$$

其中，p为气压，p_0为参考气压，R_d为干空气的气体常数，c_v为定容比热，ϑ_v为虚位温，e为电子电荷，n_+和n_-分别表示正、负离子浓度，Q_xe表示下标x对应的云滴（c）、雨滴（r）、霰（g）、雹（h）、冰晶（i）五种水凝物粒子体电荷浓度。

考虑电场力对水凝物粒子下落速度的影响时，参考孙安平等（2002b）的推导公式。由于云滴与冰晶粒子质量较轻，重力作用可忽略。粒子的下落速度v_x为

$$v_\mathrm{x}=\frac{Q_\mathrm{xe}E_z}{6\pi\rho r_\mathrm{x}\gamma}, \tag{6}$$

对于雨滴、霰、雹与雪，这些粒子在下落过程受到重力、Stokes阻力以及电场力的共同作用。粒子下落运动方程满足：

$$\frac{1}{2}\pi {r_\mathrm{x}}^2C_\mathrm{D}\rho_\mathrm{a}{v_\mathrm{x}}^2=\frac{4}{3}\pi {r_\mathrm{x}}^3g\left(\rho-\rho_\mathrm{a}\right)+Q_\mathrm{xe}E_z, \tag{7}$$

得到粒子的下落末速度v_x：

$$v_\mathrm{x}=\left(\frac{2Q_\mathrm{xe}E_z}{\pi {r_\mathrm{x}}^2\rho_\mathrm{a}\mathrm{C_D}}+\frac{8r_\mathrm{x}g\left(\rho-\rho_\mathrm{a}\right)}{3C_\mathrm{D}\rho_\mathrm{a}}\right)^{1/2}, \tag{8}$$

其中，r_x表示对应水凝物粒子（云滴、雨滴、霰、雹、冰晶）的半径，对应液态粒子时，ρ =1 g cm^{-3}，对应固态粒子时，ρ =0.9 g cm^{-3}，C_D为阻曳力系数，γ为动力学粘性系数，π表示圆周率。

模拟试验分为两组：将考虑电场对气块运动及

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

对水凝物下落末速度影响的模拟组记E组；将不考虑电场对气块运动及对水凝物下落末速度影响的模拟组记NE组。

3 初始场

本文选取陕西旬邑1997年7月28日13时（北京时，下同）一次雹暴过程的加密探空资料作为模式的初始场（肖辉等，2002）。据图1，在625 hPa到400 hPa间存在弱的不稳定区，低层大气湿度大，中层大气较干，纬向风的风速与风向切变较强，利于孤立雷暴的发展。模拟时，中心最大正扰动位温取1.2℃。

4 模拟结果

4.1 对流、降水及闪电特征差异

两组算例单位分钟内的上升、下沉风速极值与固、液态降水强度的特征基本一致。上升速度的极值在约30 min达到峰值，随后逐渐减弱。下沉速度的极值在15 min后增速显著，在42 min时达到峰值，随后减弱。液态和固态降水分别始于28 min和37 min，固、液态降水强度均在约42 min时达到极值，对应下沉速度的峰值。达到峰值后，液态降水强度逐渐减弱，固态降水稳定持续约10 min后，逐渐减弱（图2）。

自28 min起，两组算例的最大上升风速开始出现差异，此差异一直持续到雷暴云消亡阶段（图3）。总体上，E组上升风速极值比NE组大，差异最明显的时段是44至54 min，并于50 min达到极值的最大差值3 m s^{-1}。两组算例的最大下沉速度差异出现在33 min之后，整体上也是E算例强于NE算例。说明考虑电场的影响后，从雷暴云成熟阶段起至消亡阶段，上升、下沉速度极值都有所增强，其改变值与不考虑电场力影响时的上升和下沉速度值相比较，小一个量级。

考虑电场力后，自35 min起，固、液态降水强度差值都有增加，在降水强度达到峰值后，增加最明显。至40 min液态降水强度差值开始减小，45 min时低于NE组，于48 min开始增加，于50 min超过NE组，52 min达到正向的变化峰值后转而减小，固态降水强度差值的变化规律与液态降水强度差值相似。降水粒子的比含水量决定着降水强度，近地面两组算例降水粒子比含水量之差随时间的变化特征与固、液态降水强度之差随时间的变化特征一致性很好（图4a1、b1及c1）。整体上，液态和固态降水强度差分别在±6 mm h^{-1}和±1 mm h^{-1}之间，两种降水的强度差出现转折的时刻相近，说明降水粒子在下落过程中所受的外力制约一致。

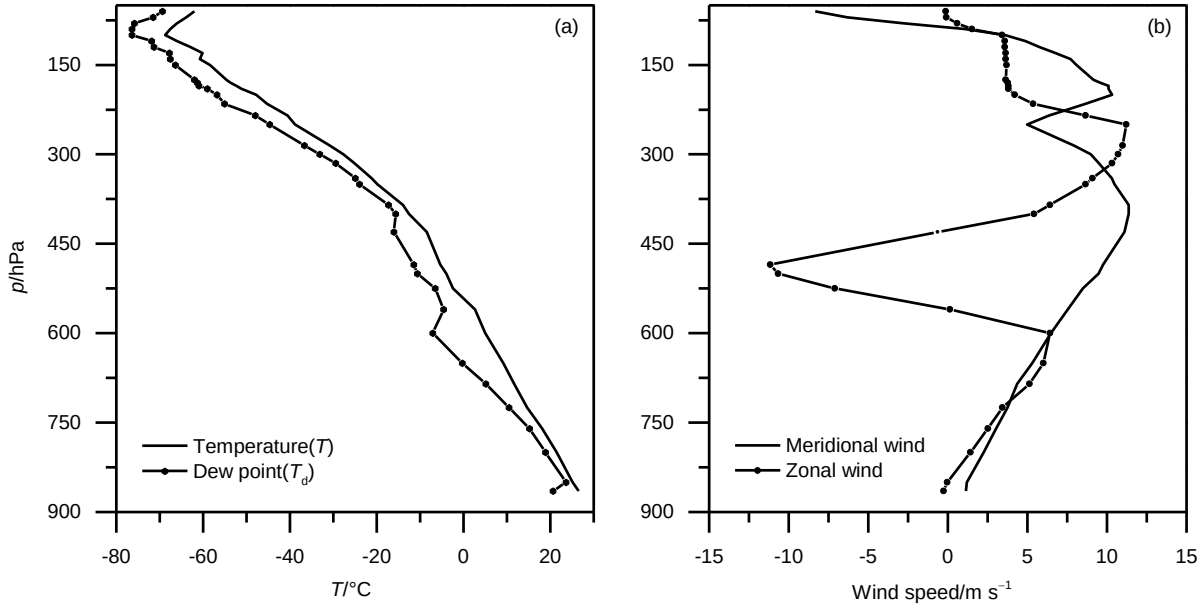

图1 1997年7月28日13时（北京时，下同）陕西旬邑地区（a）初始环境层结与（b）风廓线

Fig. 1 (a) Initial environmental stratification and (b) wind profile in Xunyi city Shaanxi province at 1300 BT (Beijing time) 28 Jul 1997

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

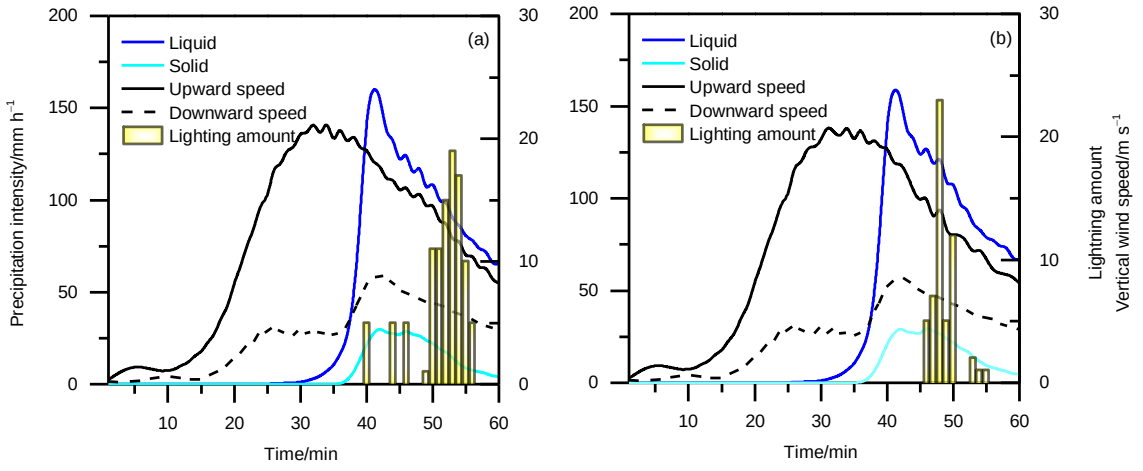

图2 雷暴云生命史（60 minutes）内（a）E组与（b）NE组算例上升、下沉速度极值（单位：m s^{-1}），固、液态降水强度（单位：mm h^{-1}）及闪电数目随时间的变化

Fig. 2 Time-varying simulations (within 60 minutes) of updraft and downdraft peak speeds (units: m s^{-1}), precipitation intensities (units: mm h^{-1}), and lightning amounts for (a) case E and (b) case NE

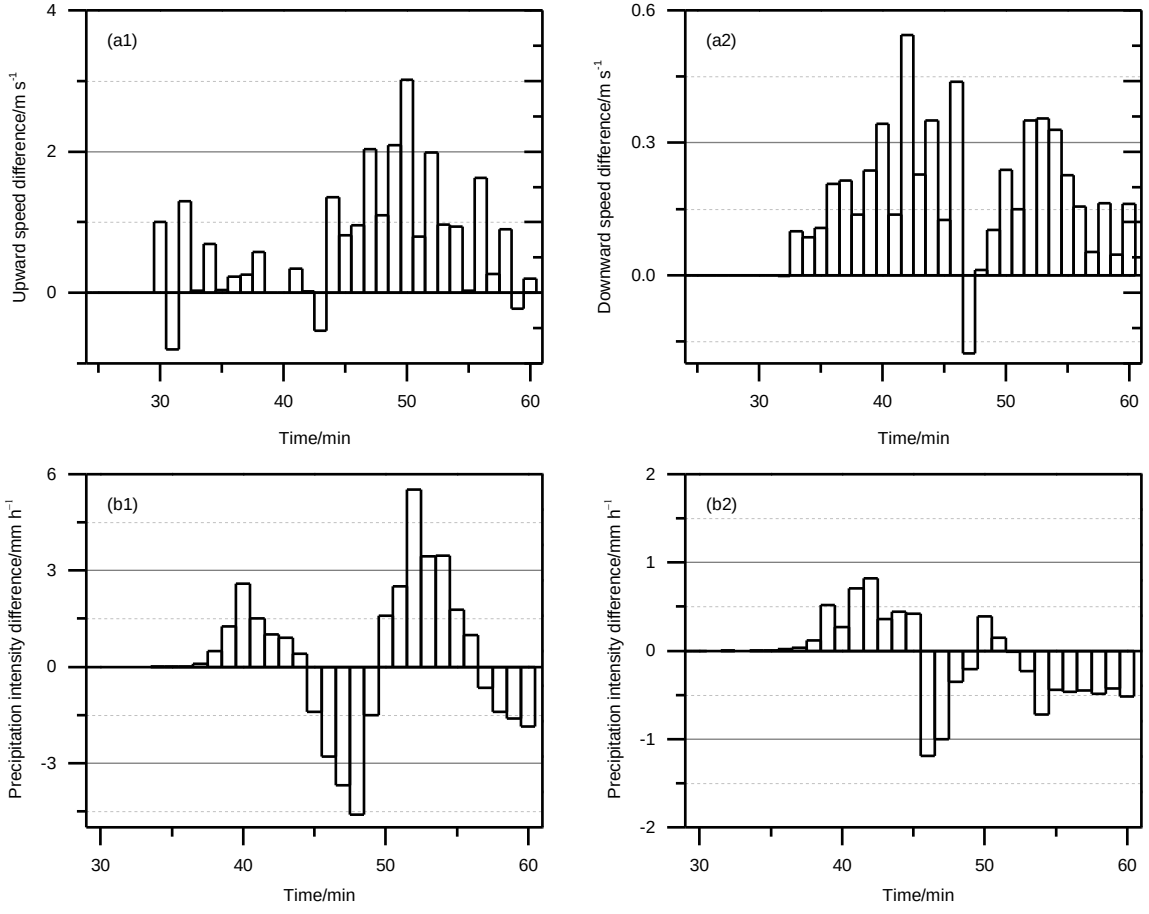

图3 雷暴云生命史（60 minutes）内y=18 km剖面处（a1）上升、（a2）下沉速度极值之差（E−NE，单位：m s^{-1}）及（b1）液态、（b2）固态降水强度差（E−NE, 单位：mm h^{-1}）随时间的演变

Fig. 3 Time-variation (within 60 minutes at the y=18 km profile) of (a1) updraft and (a2) downdraft peak velocity differences (E−NE, units: m s^{-1}) and (b1) liquid and (b2) solid precipitation intensity differences (E−NE, units: mm h^{-1})

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

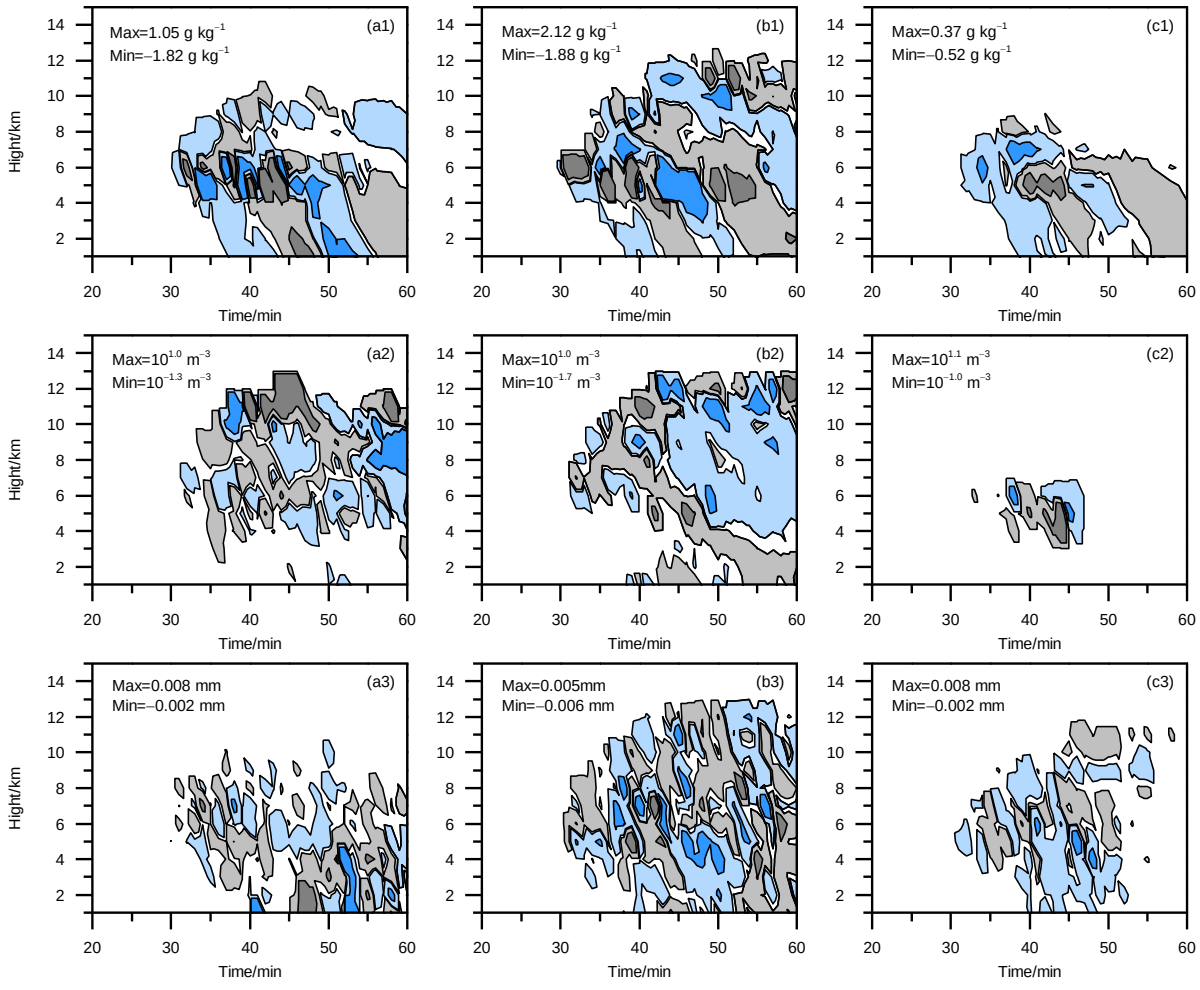

图4 雷暴云生命史（60 minutes）内y=18 km剖面处两组算例（a1−a3）雨滴、（b1−b3）霰和（c1−c3）雹在垂直高度上（a1−c1）比含水量（单位：g kg^{-1}）、（a2−c2）数浓度（单位：m^{-3}）及（a3−c3）粒子半径（单位：mm）的极值之差（E−NE）随时间的变化。蓝色/灰色代表填充区域差值为正/负；（a1−c1）外圈等值线取±10^{-2}，内圈取±10^{-1}；（a2−c2）图外圈等值线取±$10^{0.01}$，内圈取±$10^{0.1}$；（a3−c3）图外圈等值线取±10^{-4}，内圈取±10^{-3}

Fig. 4 Time−height contour plots (within 60 minutes at the y=18 km profile) of differences (E−NE) in particle (a1−c1) mixing ratios (units: g kg^{-1}), (a2−c2) number concentrations (units: m^{-3}), and (a3−c3) radii (units: mm): (a1−a3) Raindrop; (b1−b3) graupel; (c1−c3) hail. The blue area indicates a positive difference, the grey area indicates a negative difference, the blue/grey area from light to dark ranges from ±10^{-2} to ±10^{-1} in group 1, respectively; the blue/grey area from light to dark ranges from ±$10^{-0.01}$ to ±$10^{-0.1}$ in group 2, respectively; and the blue/grey area from light to dark ranges ±10^{-4} to ±10^{-3} in group 3, respectively)

电场对于固、液态降水强度的影响自降水出现开始，一直持续到雷暴末期，随时间变化的特征基本一致，但电场力导致的降水强度的变化与未考虑电场力影响时的降水强度相比，小了1~2个量级。这说明虽然电场对总降水量影响微弱，但改变了不同时段的降水特点，使成熟时期的降水强度有了明显起伏。考虑电场影响下，雨滴数浓度变化的高度较高（约7~11 km高度），差值呈先增加再减小后增加的趋势（图4a2），在8 km以下，除了液态降水强度增大的峰值时刻（40 min及53 min），雨滴半径均呈减小趋势（图4a3）。霰粒子浓度变化的高值区分散，相对集中在9~12 km高度，呈先增加再减小后增加再减小的趋势（图4b2），尺度的差值变化更散乱，相对而言40~50 min段，3~8 km高度内存在集中的增大区（图4b3）。雹数浓度变化的高度集中在4~6 km，从时间上看，呈先减小再增大再减小后增大的趋势（图4c2），近地面雹粒子的半径以增大为主，4 km以上虽有减小区域，

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

但分布零散，高值区并不突出（图4c3）。

两算例的闪电特征差异明显（图2），考虑电场影响后，闪电发生得更早，持续得更长，频发时段延后，闪电总数更多（E组102次闪电，1次地闪；NE组56次闪电，1次地闪）。这表明考虑电场后，模拟云能更早地满足放电的条件，且强电场持续得更长。起电活动的活跃程度与固液态粒子含量密切相关，结合图2、3可见，E算例组的闪电频发时段对应着固、液态降水强度之差为正的时段，NE算例组的闪电频发时段对应着差值为负的时段。

4.2 水凝物粒子下落末速度极值差异

在30 min之前，两组算例的各水凝物粒子下落速度极值一致，30 min之后，即随着起电活动的增强，电场力对四种水凝物粒子的下落极值均产生了一定的影响（图5）。总体上，电场力增加了雨滴、冰晶和雹的落速极值，对霰粒子的落速极值有增有减。冰晶粒子重量轻，下落极值均速较小（小于1 m s^{-1}），电场力使其落速峰值更为突出，极值比不考虑电场力时的值大两个量级。电场力对雨滴下落末速度极值的最大变化达到了与不考虑电场力时的值相当大小，电场力对霰和冰雹粒子下落末速度极值产生的最大的变化达到了不考虑电场力时的值的约三分之一。由于霰与冰晶是云中主要的起电粒子，下落速度受电场力作用的时间最早（约29 min），雹粒子滞后约1 min，雨滴粒子速度极值改变的时刻最后。

为进一步讨论电场力对水凝物落速的影响，将上述粒子在模拟域内各格点处的瞬时下落速度做差后，选取其极值得到粒子瞬时速度差的极值随时间的变化。由图6可知，电场对粒子落速的影响有增有减。结合图5，受电场影响，雹粒子的速度变化最大，其落速极值不到20 m s^{-1}，但电场的作用可使局部雹粒子速度变化达到10 m s^{-1}以上。霰受电场的影响次之，下落速度因电场力作用变化约±7 m s^{-1}以上。雨滴与冰晶粒子下落速度差随时间的演变起伏明显，这是由于雨滴粒子荷电能力较

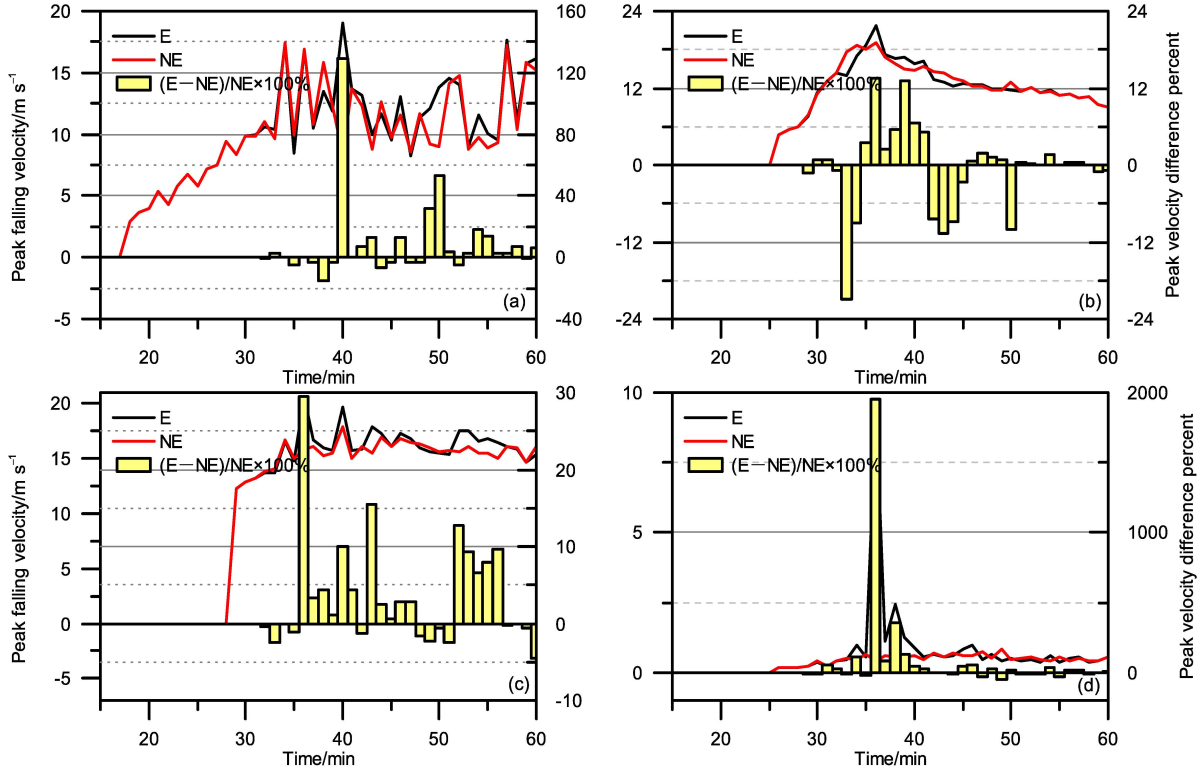

图5 雷暴云生命史（60 minutes）内y=18 km剖面处水凝物粒子下落速度极值（E：黑色实线，NE：红色实线；单位：m s^{-1}）以及极值之差占比[（E−NE）/NE；黄色柱图]随时间的变化：（a）雨滴；（b）霰；（c）雹；（d）冰晶

Fig. 5 Time-varying simulations (within 60 minutes at the y=18 km profile) of terminal velocity peaks (E: black solid line, NE: red solid line; units: m s^{-1}) and their difference percent [(E−NE)/NE: yellow cylinder]: (a) Raindrop; (b) graupel; (c) hail; (d) ice crystals

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

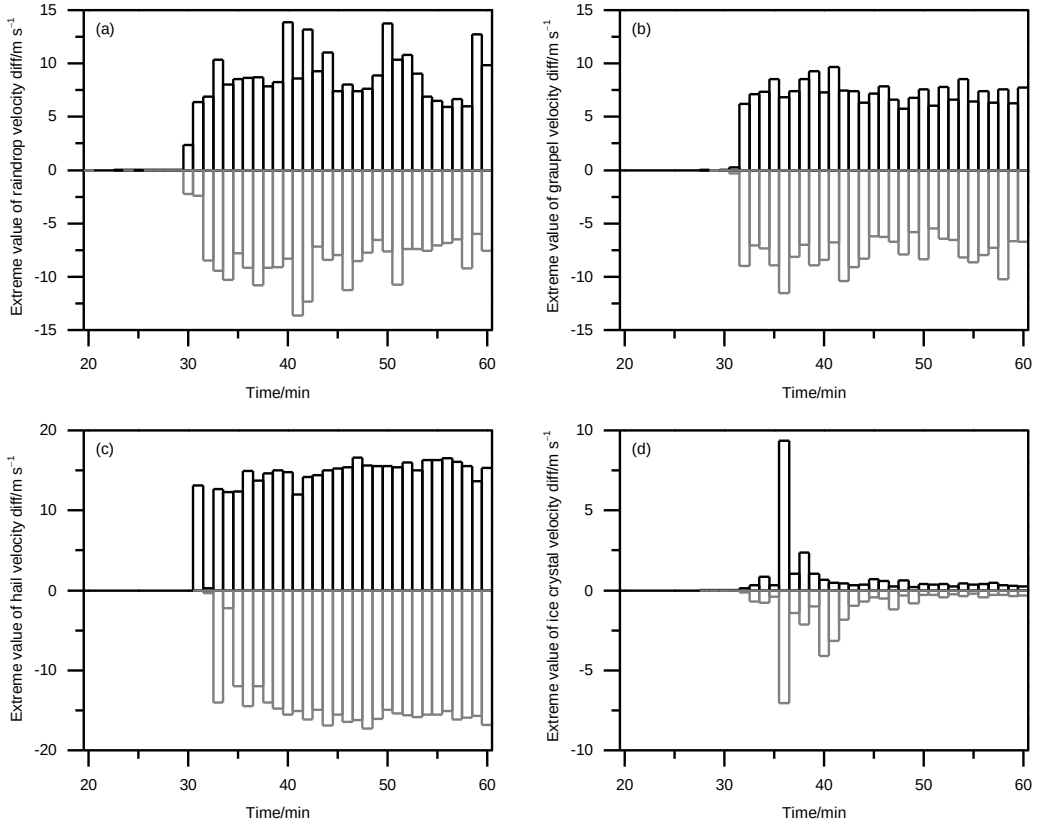

图6 雷暴云生命史（60 minutes）内y=18 km剖面处水凝物粒子瞬时落速差（E−NE，单位：m s^{-1}）的极值随时间的变化：（a）雨滴；（b）霰；（c）雹；（d）冰晶

Fig. 6 Time-varying extreme values (within 60 minutes at the y=18 km profile) of the drop velocity differences (units: m s^{-1}) for different particles (a) Raindrop; (b) graupel; (c) hail; (d) ice crystals

弱，而冰晶粒子质量轻，只有当雨滴较大，冰晶荷电量较多时，其落速才会有明显变化 [公式（6）和（8）]。这些粒子下落速度差值的极值往往并非来自下落速度极值区（图略），表明粒子因受强电场的力作用，自身所受合力改变导致瞬时的落速将发生改变，而当粒子下落速度发生显著变化时，对应此时雷暴云中强电场的存在。

图7统计了粒子在剖面y=18 km处单位分钟内因电场导致其落速变化最大的正值格点，发现：雨滴下落速度的最大变化出现在3~7 km的高度，由于模式中未考虑雨滴的直接起电，结合公式（8），这种变化主要是重力项贡献增大，即雨滴的尺度的改变引起的，而雨滴尺度的改变则是电场力调制微物理过程后导致的。冰晶粒子下落速度的最大变化在5 km高度附近，此处对应着冰晶和霰粒子的共存区（图略），为强起电区域。由于冰晶尺寸小，半径在10^{-4}~10^{-3} m间，结合公式（6）可推断，其

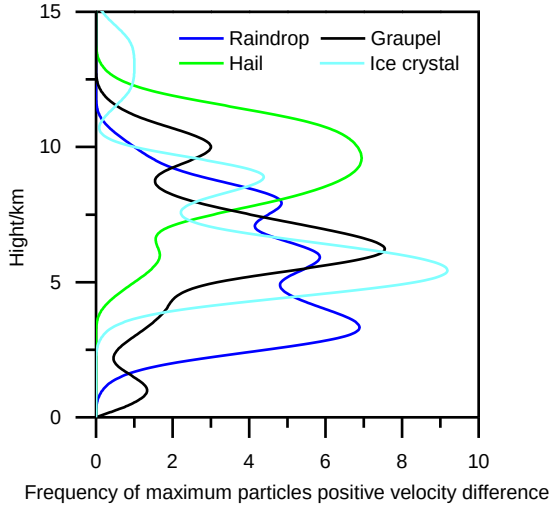

图7 雷暴云生命史（60 minutes）内y=18 km剖面处两组算例水凝物每分钟最大正落速差（E−NE，单位：m s^{-1}）随高度出现的频次分布

Fig. 7 Frequency−height distributions (within 60 minutes at the y=18 km profile) of maximum particles' maximum positive velocity differences per minute (E−NE, units: m s^{-1}) at each grid point

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

本身的带电量和环境电场值是冰晶的落速的主要影响因子。雹粒子下落速度的最大变化在10 km高度附近，远高于雹比含水量和数浓度中心（图略），结合图4c以及公式（8）可见，分布越高的雹粒子越轻，下落速度变化反而越大，说明影响雹粒子下落速度变化的主要贡献项是电场力项。这与孙凌等（2018）发现雹粒子的尺寸越小，电场力对其下落速度的影响越明显相通。结合公式（8）可推断，对处于强电场区域、荷电量足够多、半径较小的霰的下落速度改变显著，而霰落速的最大变化出现在约5~7 km高度，说明此高度附近，霰因电场的引入改变了所受的合力条件，以致其加速下落最显著。

4.3 微物理过程差异

雷暴中诸多微物理过程都与粒子的下落速度有关。因此，当水凝物的落速发生变化时，微物理过程也会发生相应的调整。冰相粒子是雷暴中的主要起电粒子，图8统计了两组算例三种固态水成物涉及的主要微物理过程的生成率及其差值随时间的演变。微物理过程包括凝华（VD）、碰并（CL）、核化（NU）、繁生（P）、融化（ML）、融化蒸发（MVD）和自动转化（CN），下标的首字母和尾字母分别表示消耗项和生成项（其中c：云滴、r：雨滴、g：霰、h：雹、i：冰晶、v：水汽，如有两种粒子共同参与相变，则下标1、2项表示消耗项，第3项表示生成项）。云中的初始冰晶首先是水汽在冰核上凝华形成（VD_{vi}）的，同时也是冰晶的主要源项。由于云中电场力作用，E算例凝华增长增加了9%，冰核活化（NU_{vi}）减少了14%，整体上增加量大于减少量，冰晶的生成率增加（图8a1，a2）。

CL_{rg}（霰碰冻雨滴）和CL_{cg}（霰碰冻云滴）是霰主要的来源，这两种过程生成的霰粒子都各占霰总量的40%以上，其次是VD_{vg}（霰凝华增长）、CL_{rig}（雨滴和冰晶碰并形成霰）过程、CL_{ig}（霰碰冻冰晶）及CN_{ig}（冰晶自动转化成霰）过程。E组霰的生成率较NE组低，减少量中CL_{cg}过程减少7%，CL_{rg}过程减少1%，CN_{ig}过程减少2%，CL_{rig}过程增加11%，CL_{ig}过程增加3%，VD_{vg}过程增加了1%（图8b1–b6）。

雹粒子的主要源是CN_{gh}（霰自动转化）过程，其次为云滴、雨滴、霰和雹碰冻过程，考虑电场后，雹的生成项均呈减少趋势。雹碰冻云滴减少5%，雹碰冻霰减少9%，雹碰冻雨滴减少1%，霰向雹的自动转化过程减少不足1%（图8c1–c4）。

在雷暴发展的起始阶段，雨滴总量主要由CL_{cr}（云滴碰冻雨滴）过程生成，随后由于冰相的生长、下落，融化过程开始影响雨滴的生成。由于电场的作用，E组雨滴总生成率微弱增加，云滴与雨滴碰并增加3%，霰融化成雨滴减少12%，云滴自动转化成雨滴减少8%（图8d1–d3）。

考虑电场的影响后，凝结和凝华过程变化较为显著，总凝结量增加4%，凝华量减少13%，蒸发量增加了1%，升华量减少2%，水汽增量9%，潜热释放增加7%（表1）。本次模拟的物理累积量比孙安平等（2004）的模拟结果弱，共通的是：由于电场的作用，导致凝结过程加剧，水汽增加并参与了云内的相变过程，释放了更多的潜热，为云体进一步发展，提供了的更充足的内能。

总的看来，在过冷云三相（水汽、过冷水、冰晶）共存的环境中，水汽充足的环境更有利于冰晶的凝华增长，冰晶增长的主要方式是凝华过程，而电环境的存在增强了凝华过程。当冰晶总量增加时，由冰晶参与形成霰的源项也略有增加。因此，较高处的霰粒子比含水量和数浓度也有所增加（图4）。而高度越低，两算例霰粒子下落速度差值取极值的频次越少（图7），说明霰的下落速度越接近，电场力对霰的下落速度影响减弱。同时，CL_{cg}与CL_{rg}过程生成率总体减小，这与张义军等（2004）发现云内电活动使霰总量减小，且减小的位置主要发生在模拟云中、下部一致。

结合图3及图8d1，d2，由于CL_{cr}是雨滴最早

表1 雷暴云生命史（60 minutes）内相变物和潜热累计总量

Table 1 Accumulated mass of phase transformation and latent mass within 60 minutes

算例	总凝结量/10^3 t	总蒸发量/10^3 t	总凝华量/10^3 t	总升华量/10^3 t	总水汽量/10^3 t	潜热释放量/10^{14} J
E	2.28×10^6	1.11×10^6	4.37×10^2	1.25×10^2	7.05×10^2	8.004
NE	2.19×10^6	1.09×10^6	5.01×10^2	1.28×10^2	6.44×10^2	7.476

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

的源项，40 min前由于电场作用使云滴与雨滴相对速度差增大，云滴碰并雨滴过程E组更大，液态降水强度差出现了第一个正峰值。随后冰相粒子生成并在下落过程中发生融化，ML_{gr}过程生成率差为负，说明此时段NE组更大，参与起电并携带正电荷的霰粒子融化的雨水，受上部负电场吸引落速减缓（图略），CL_{cr}生成率差为负，液态降水强度逐渐减弱并于50 min出现谷值。随后E组ML_{gr}生成率较大，雨滴粒子逐渐远离上部强电场，向上的引力变小使其加速下落，液态降水也于53 min出现第二个的峰值。最终融化过程减弱，CL_{cr}生成率增加微弱，液态降水强度逐渐减小。

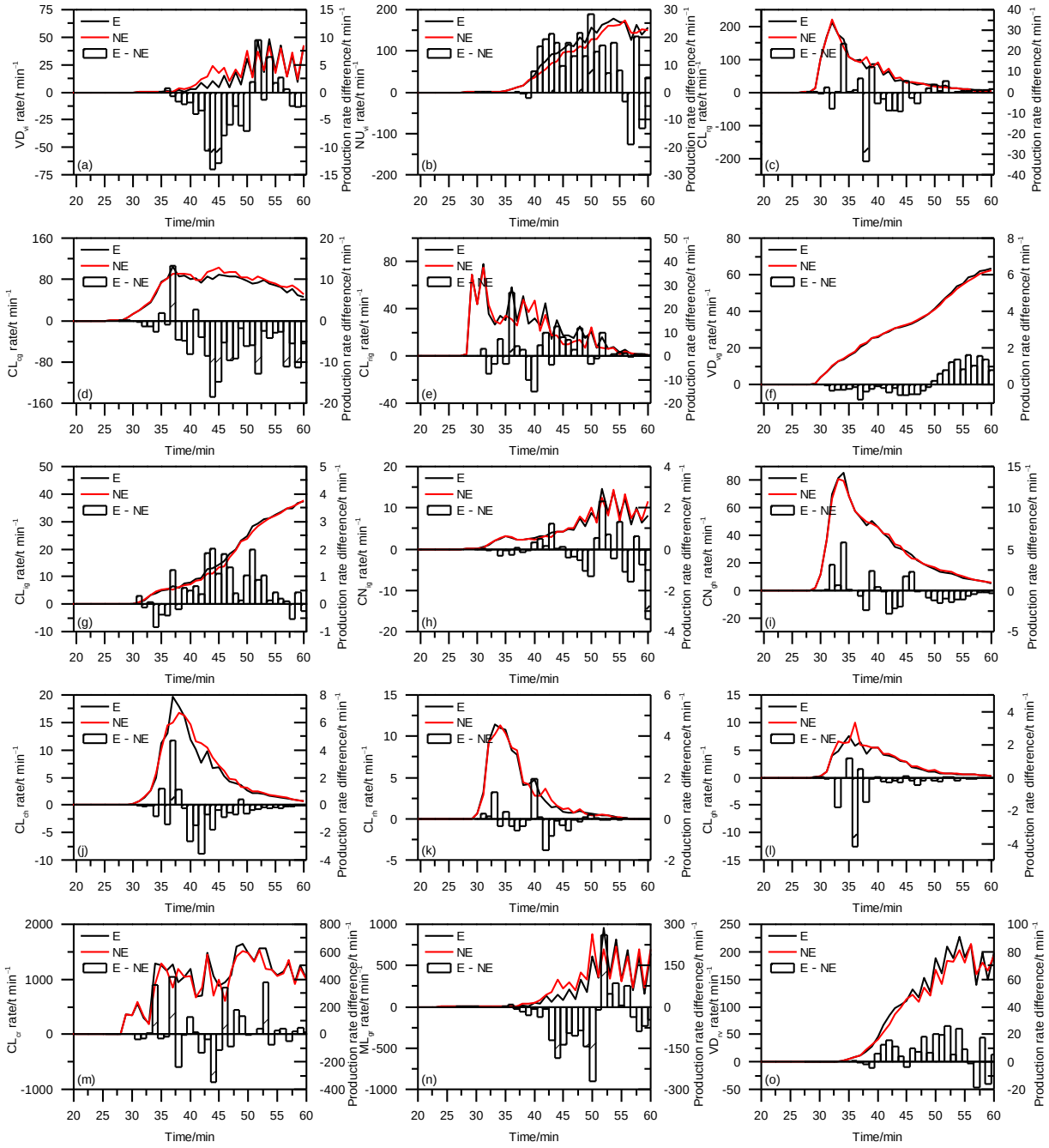

图8　雷暴云生命史（60 minutes）内水凝物（冰晶：a–b，霰：c–h，雹：i–l，雨滴：m–o，）的主要源项生成率（E：黑色实线，NE：红色实线，单位：t min^{-1}）及两组算例生成率差值（E－NE，阴影柱图，单位：t min^{-1}）随时间的演变

Fig. 8　Time-varying production rates (within 60 minutes) of different particles (ice crystals: a–b, graupel: c–h, hail: i–l, and rain: m–o) obtained via microphysical processes and their differences (E: black solid line, NE: red solid line, units: t min^{-1}, E－NE, shaded cylinder, units: t min^{-1})

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

5 结论和讨论

本文分析了考虑电场对空气运动及各水凝物下落末速度的影响后，雷暴云中动力、微物理过程的系列变化，主要得到以下结论：

（1）与不耦合电场计算的模拟云相比，从雷暴云成熟阶段起至最后消亡阶段，考虑电场的模拟组其上升和下沉速度都有所增强，其变化值与不考虑电场影响时的上升和下沉速度值相比，小一个量级。同时，闪电发生得更早、持续的时间更长、频发的时段延后、闪电数目明显增多。

（2）由于电场的引入，固、液态降水强度的变化自降水出现开始，一直持续到雷暴末期，随时间变化的特征基本一致，但电场力导致的降水强度的变化与未考虑电场力影响时的降水强度相比，小了一到二个量级。虽然电场对累计的总降水量的响应微弱，但使不同时段的降水出现明显起伏。

（3）雨滴、冰晶和雹粒子的落速极值由于电场力的作用有所增加，而霰粒子落速极值有增有减。电场对各粒子瞬时落速极值的影响虽有增有减，但尺寸越小的粒子落速的变化越明显。电场力对粒子落速的改变由背景电场、自身尺寸、所携带的电荷量及极性多种因素共同决定，总体上，受电场影响雹粒子的瞬时落速变化值最大。

（4）考虑电场的影响后，水凝物粒子主要源项的生成率发生了改变。霰、雹的生成率减小，雨滴、冰晶的生成率增加。在整个雷暴云生命史内，由于电场的引入，凝结、蒸发过程加剧，凝华、升华过程减小。云内水汽增加并参与了相变过程，潜热释放加剧，提供了云体进一步发展的内能。

本文通过此次雹暴过程的模拟，分析了电场力对动力场、降水场和微物理场的反馈作用，特别是通过牵制荷电粒子下落末速，影响水凝物的相变过程，但仍有问题尚未解决。一方面，雷暴云中强电场区域较小，强电场持续的时间有限，粒子受电场力影响的途径复杂，电场对雷暴云的影响难以量化。其次，本次模拟仅考虑了电场对空气运动以及粒子下落末速度的影响，但计算中尚有一些参数（如碰并效率），也易受电场环境的改变而变化，这些影响还未纳入考虑。此外，闪电的放电过程也会影响空间电场，模式中加入了放电参数化方案，但并未放大放电前后的电场差异，也未讨论由此差异导致的其他的电反馈影响（模式中放电活动作为快速摧毁云中强电场的过程，又与参数化方案中电荷中和的方式有关）。因此，真实反演电场的反馈作用的模拟工作还有余地。

电场既对荷电粒子施加力的作用，牵制其下落运动，改变了水凝物的垂直分布，造成了起电过程及电荷结构的差异，同时，电场力也在持续地改变粒子间的转换过程。因此，张义军等（2004）把电活动的影响总结成一个链式反应。随着研究学者对电场力认识的深入，合理且完整的电反馈的参数化方案也是未来雷暴云数值模拟研究的迫切需求。

参考文献（References）

Gay M J, Griffiths R F, Latham J, et al. 1974. The terminal velocities of charged raindrops and cloud droplets falling in strong electric fields [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 100(426): 682−687. doi:10.1002/qj.49710042615

郭凤霞, 王昊亮, 孙京, 等. 2015. 积云模式下三维闪电分形结构的数值模拟 [J]. 高原气象, 34(2): 534−545. Guo Fengxia, Wang Haoliang, Sun Jing, et al. 2015. Simulation of three-dimensional fractal structure of lightning in a thunderstorm model [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 34(2): 534−545. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2013.00193

黄美元, 徐华英. 1999. 云和降水物理 [M]. 北京: 科学出版社, 212pp. Huang Meiyuan. 1999. Cloud and Precipitation Physics (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 212pp.

孔凡铀, 黄美元, 徐华英. 1990. 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, 14(4): 441−453. Kong Fanyou, Huang Meiyuan, Xu Huaying. 1990. Three-dimensional numerical simulation of ice phase microphysics in cumulus clouds. Part I: Model establishment and ice phase parameterization [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 14 (4): 441−453. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1990.04.07.

孔凡铀, 黄美元, 徐华英. 1991. 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, 15(6): 78−88. Kong Fanyou, Huang Meiyuan, Xu Huaying. 1991. Three-dimensional numerical simulation of ice phase microphysics in cumulus clouds. Part II: Effects of multiplication processes [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 15(6): 78−88. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1991.06.09

Mansell E R, MacGorman D R, Ziegler C L, et al. 2002. Simulated three-dimensional branched lightning in a numerical thunderstorm model [J]. J. Geophys. Res., 107(D9): ACL-1-ACL 2-12. doi: 10.1029/2000jd000244

Mansell E R, MacGorman D R, Ziegler C L, et al. 2005. Charge structure and lightning sensitivity in a simulated multicell thunderstorm [J]. J. Geophys. Res., 110(D12). doi: 10.1029/2004jd005287

Orville H D, Kopp F J. 1977. Numerical simulation of the life history of a hailstorm [J]. J. Atmos. Sci., 34: 1596−1618. doi:10.1175/1520-0469(1977)034<1596:nsotlh>2.0.co;2

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Rawlins F. 1982. A numerical study of thunderstorm electrification using a three-dimensional model incorporating the ice phase [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 108(458): 779−800. doi: 10.1002/qj.49710845804

Saunders C P R, Keith W D, Mitzeva R P. 1991. The effect of liquid water on thunderstorm charging [J]. J. Geophys. Res., 96(D6): 11007−11017. doi:10.1029/91jd00970

Saunders C P R, Wahab N M A. 1975. The influence of electric fields on the aggregation of ice crystals [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 53(2): 121−126. doi:10.2151/jmsj1965.53.2_121

孙安平, 言穆弘, 张鸿发, 等. 2000. 三维强风暴动力—电耦合数值模拟研究: 模式的初步检验 [J]. 高原气象, 19(4): 435−440. Sun Anping, Yan Muhong, Zhang Hongfa, et al. 2000. The numerical simulation study with three-dimensional electrification model: Preliminary simulation verification [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 19(4): 435−440. doi:10.3321/j.issn:1000-0534.2000.04.004

孙安平, 言穆弘, 张义军, 等. 2002a. 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 [J]. 气象学报, 60(6): 722−731. Sun Anping, Yan Muhong, Zhang Yijunet al. 2002. Numerical study of thunderstorm electrification with a three-dimensional dynamics and electrification coupled model. Part I: Model description and parameterization of electrical processes [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 60(6): 722−731. doi: 10.11676/qxxb2002.086

孙安平, 言穆弘, 张义军, 等. 2002b. 三维强风暴动力—电耦合数值模拟研究II: 电结构形成机制 [J]. 气象学报, 60(6): 732−739. Sun Anping, Yan Muhong, Zhang Yijun, et al. 2002. Numerical study of thunderstorm electrification with a three-dimensional dynamics and electrification coupled model. Part II: Mechanism of electrical structure [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 60(6): 732−739. doi:10.11676/qxxb2002.087

孙安平, 张义军, 言穆弘. 2004. 雷暴电过程对动力发展的影响研究 [J]. 高原气象, 23(1): 26−32. Sun Anping, Zhang Yijun, Yan Muhong. 2004. Study on influence of electrical processes on dynamical development in thunderstorm [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 23(1): 26−32. doi: 10.3321/j. issn: 1000-0534.2004.01.004

孙凌, 郄秀书, Mansell E R, 等. 2018. 雷暴云内电场力对起电和电荷结构的反馈作用 [J]. 物理学报, 67(16): 169201 Sun Ling, Qie Xiushu , Mansell E R, et al. 2018. Feedback effect of electric field force on electrification and charge structure in thunderstorm [J]. Acta Phys. Sin., 2018, 67(16). doi:10.7498/aps.67.20180505

Takahashi T. 1976. Hail in an axisymmetric cloud model [J]. J. Atmos. Sci., 33: 1579−1601. doi:10.1175/1520-0469(1976)033<1579:hiaacm>2.0.co;2

谭涌波, 陶善昌, 祝宝友, 等. 2007. 云闪放电对云内电荷和电位分布影响的数值模拟 [J]. 地球物理学报. 50(4): 1053−1065. Tan Yongbo, Tao Shanchang, Zhu Baoyou, et al. 2007. A simulation of the effects of intra-cloud lightning discharges on the charges and electrostatic potential distributions in a thundercloud [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 50(4): 1053−1065. doi:10.3321/j.issn:0001-5733.2007.04.012

Vonnegut B. 1954. Possible mechanism for the formation of thunderstorm electricity [J]. Proc. Conf. Atmos. Electr. Portsmouth, 69−181.

Vonnegut B. 1963. Some facts and speculations concerning the origin and role of thunderstorm electricity [M]// Severe Local Storms. Boston, MA: American Meteorological Society, 224−241. doi: 10.1007/978-1-940033-56-3_11

Williams E R, Lhermitte R M. 1983. Radar tests of the precipitation hypothesis for thunderstorm electrification [J]. J. Geophys. Res., 88 (C15): 10984. doi:10.1029/jc088ic15p10984

肖辉, 吴玉霞, 胡朝霞, 等. 2002. 旬邑地区冰雹云的早期识别及数值模拟 [J]. 高原气象, 21(2): 159−166. Xiao Hui, Wu Yuxia, Hu Zhaoxia, et al. 2002. Earlier identification and numerical simulation of hail storms occurring in Xunyi region [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 21(2): 159−166. doi:10.3321/j.issn:1000-0534.2002.02.008

许焕斌, 王思微. 1985. 一维时变冰雹云模式研究(一): 反映雨和冰雹谱的双参数演变 [J]. 气象学报, 43(1): 13−25. Xu Huanbin, Wang Siwei. 1985. A numerical model of hail-bearing convective cloud (1): Bi-parameter evolution of size distribution of raindrops, frozen raindrops and hailstones [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 43(1): 15−27.

许焕斌, 王思微. 1988. 二维冰雹云数值模式 [J]. 气象学报, 46(2): 227−236. Xu Huanbin, Wang Siwei. 1988. Two-dimension hail cloud model [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 46(2): 227−236.

许焕斌, 王思微. 1990. 三维可压缩大气中的云尺度模式 [J]. 气象学报, 48(1): 80−90. Xu Huanbin, Wang Siwei. 1990. A three-dimensional cloud-scale model suitable for compressible atmosphere [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 48(1): 80−90. doi: 10.11676/qxxb1990.010

言穆弘, 郭昌明, 葛正谟. 1996. 积云动力和电过程二维模式研究I. 理论和模式 [J]. 地球物理学报, 39(s1): 52−64. Yan Muhong, Guo Changming, Ge Zhengmo. 1996. Numerical study of cloud dynamic-electrification in an axisymmetric, time-dependent cloud model I. Theory and model [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 39(s1): 52−64.

Ziegler C L, MacGorman D R, Dye J E, et al. 1991. A model evaluation of non-inductive graupel-ice charging in the early electrification of a mountain thunderstorm [J]. J. Geophys. Res., 96 (D7): 12833. doi:10.1029/91jd01246

张义军, 言穆弘. 1991. 对流风暴中大气电涡度模式计算 [J]. 高原气象, 10(3): 293−304. Zhang Yijun, Yan Muhong. 1991. A model calculation of atmosphere electric vorticity in convective storms [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 10(3): 293−304.

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 [J]. 地球物理学报, 47(1): 25−32. Zhang Yijun, Sun Anping, Yan Muhong, et al. 2004. Numerical modeling for effects of electric activity during thunderstorms upon the growth of hail particles. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 47(1): 25−32. doi:10.3321/j.issn:0001-5733.2004.01.005

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net