

Zhang YJ, Sun A P, Yan M H, et al. Numerical modeling for effects of electric activity during thunderstorms upon the growth of hail particles. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2004, 47(1):25~32

雷暴电活动对冰雹增长影响的数值模拟研究

张义军¹ 孙安平¹ 言穆弘¹ 郭凤霞¹ 郝秀书¹ 黄美元²

1 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所,兰州 730000

2 中国科学院大气物理研究所,北京 100029

摘要 利用三维强风暴动力-电耦合模式,数值模拟了风暴演变过程中电活动对冰雹增长及地面降雹的影响。结果指出,带电冰雹与云内强电场作用使地面降雹量增加约 50%,雹块直径增大 0.7mm,降雹时间滞后约 3min。文中还讨论了强电场通过对水成物降落速度的调制来影响冰雹微观增长过程,即主要是影响碰并过程和冰雹融化过程。电活动使冰雹源、汇总量都减少,但汇总量减少更多,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。

关键词 雷暴数值模式 电荷结构 冰雹增长 微观相变

文章编号 0001-5733(2004)01-0025-08 **中图分类号** P421 **收稿日期** 2002-07-29,2003-06-02**收修定稿**

NUMERICAL MODELING FOR EFFECTS OF ELECTRIC ACTIVITY DURING THUNDERSTORMS UPON THE GROWTH OF HAIL PARTICLES

ZHANG Yi-Jun¹ SUN An-Ping¹ YAN Mu-Hong¹ GUO Feng-Xia¹ QIE Xiu-Shu¹ HUANG Mei-Yuan²

1 Institute of Environment and Engineering for Cold and Arid Regions, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

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

Abstract Using the 3D dynamics-electrification coupled model, we simulate the effect of electric activity on hail growth and shooting on the surface during thunderstorms. The results indicate that the hail with charge and strong electric field make precipitation and diameter of hail particles on the ground increase 50% and 0.7mm, respectively, and the time of hail shooting lag 3 minutes. Effect of microphysical growth process of hail through the strong electric field act on the fall speed of precipitation elements is discussed. Electric action mainly influences collection and melting process of hail. Source and sink of hail decrease, and sink decrease more. So, the total amount of precipitation of hail will increase, and the number of hail particles decreases due to electrical effects. It means that hail particles become bigger and eaier to fall.

Key words Numerical model of thunderstorm, Charge structure, Growth of hail particles, Phase transformation of microphysical process.

1 引言

利用观测分析和模式研究在冰雹云中的冰雹增

长过程已有近 30 余年的历史。其中在冰雹云的观测分析研究中以 Browning 等^[1]工作较为经典;模式研究以 Orville 等^[2]和 Klemm 等^[3]工作为代表。20 世纪 80 年代后,尽管观测手段更为先进,模式也更精

基金项目 中国科学院知识创新重大项目(KZCX1-SW-04),中国科学院寒区旱区环境与工程研究所创新项目(210037)。

作者简介 张义军,男,1963 年生,博士,毕业于中国科学院原兰州高原大气物理研究所,研究方向大气电学。E-mail: Zhangyj@ns.lzb.ac.cn

细和复杂,但对冰雹增长的研究无突破性进展. 这些研究只建立在动力场和微观转换的基础上,而忽略了冰雹云内强烈电活动的影响. 模式研究雷暴起电过程和电结构主要讨论动力和微物理过程对电结构的影响. 以 Chiu^[4], Latham 等^[5] 和 Takahashi^[6] 工作为代表,都建立了一个二维轴对称模式,从暖云模拟发展到冷云. 此后, Heldson 等^[7] 和言穆弘等^[8,9] 逐步完善了各类微物理过程和起电过程,利用二维模式讨论冰相云中雹(霰)——冰晶之间非感应起电机制对云内电结构形成的作用. Rawling^[10] 第一个建立了包含扩散、传导和非感应起电机制的三维积云模式,但由于微物理过程处理得过于简单,模拟结果较差. James^[11] 建立了一个较为完整的三维模式,详细讨论了非感应起电机制及对雷暴电结构的影响. 这些工作也偏重于动力,讨论微物理过程对云电结构的影响时没有涉及反作用. 本文利用三维时变雷暴动力-电耦合模式研究冰雹云内电活动对冰雹增长以及地面降雹的影响,并讨论了可能的影响机制.

2 模式结构和初始场

三维强风暴动力-电耦合数值模式是一个三维时变的积云动力和电过程数值模式. 由大气运动方程、热力学能量方程、水成物质量连续方程、水成物电荷方程等构成闭合方程组并考虑了云水、冰晶、雨、雪、霰和雹等水成物之间 26 种微观转换过程,以及 5 种水成物电荷产生过程(起电过程). 与一般积云模式不同之处是此模式考虑了电场力对宏观场和微观场的作用,从而多了一组电参量方程,即在运动方程、位温方程、水汽方程、各项水成物比含量和比浓度方程之外,还引入各项水成物电荷浓度变化方程,并在运动方程中引入电场力,和上述方程构成闭合方程组,根据计算的电荷浓度,利用泊松方程计算电场. 此外,在水成物粒子降落末速度公式中,除了考虑重力和阻力外,还考虑了计算电场力的作用. 通过上述方程组数值求解得到的所有参量都包含了电荷和电场力的影响. 粒子分布采用“双参数方案”. 模式方程、概念和计算框架见文献[12]. 该模式已经过实际观测检验,计算结果和实况资料基本一致^[13].

模式初始环境场、扰动区域和文献[12,13]相同,取自美国 Montana 州探空资料^[14] (1981-07-19-14:40—当地时间). 模式计算的大、小时间步长(10s 和 2s)交叉使用,从而保证了计算稳定性. 由于起电

特征时间很短(远小于时间步长),故对于每个时间步长内的起电量采用解析求解,保证了计算起电量的稳定性.

模式采用两种计算方案:考虑电场力、电过程(EC)和忽略电作用(NEC),以比较分析电过程的作用.

3 云内冰雹含量和地面降雹

图 1 是模拟 42min 时刻(雷暴成熟阶段)的垂直电场空间分布($y = 18 \text{ km}$). 由于起电作用,云内空间三极性电荷结构已形成,在云中部(6~10 km)为

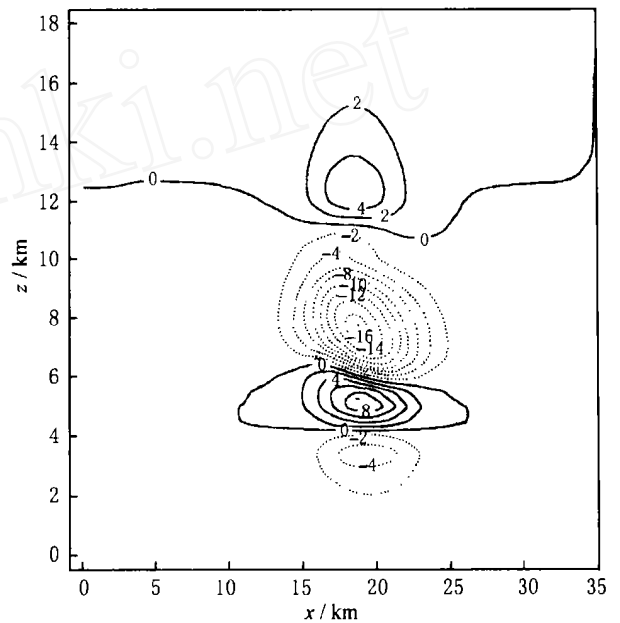


图 1 模拟雷暴的垂直电场在 $y = 18 \text{ km}$ 的垂直剖面分布 实线表示正电场值,虚线表示负电场值. 等值线间隔为 2.0 kV/m .

Fig. 1 The distribution of vertical electric field of the x - y cross section at $y = 18 \text{ km}$

负电场区,最大负电场为 -16 kV/m (7.5 km 高度),云上部和下部为正电场区,最大正电场分别为 4 kV/m

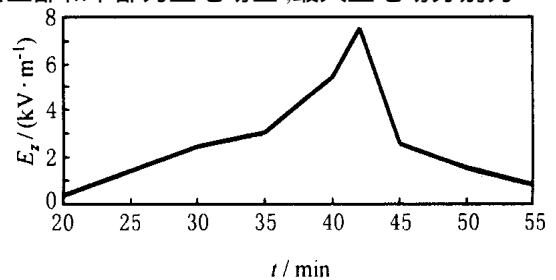


图 2 6.0km 高度上模拟雷暴最大垂直电场 (E_z) 随时间的变化

Fig. 2 The variety of the most vertical electric field with time at 6.0km height

(12.5 km 高度)和 10 kV/m(5 km 高度). 从图 2 可见, 20min 以后电场随时间而增大, 42min 达到最大值, 以后逐渐减小, 电活动影响时间段为 30 ~ 55min.

由于云内电场作用, 冰雹含量比、浓度比、粒子半径以及降落末速度都发生相应变化. 图 3 是 42min 时刻上述参量两种算例模拟结果差值 (EC —

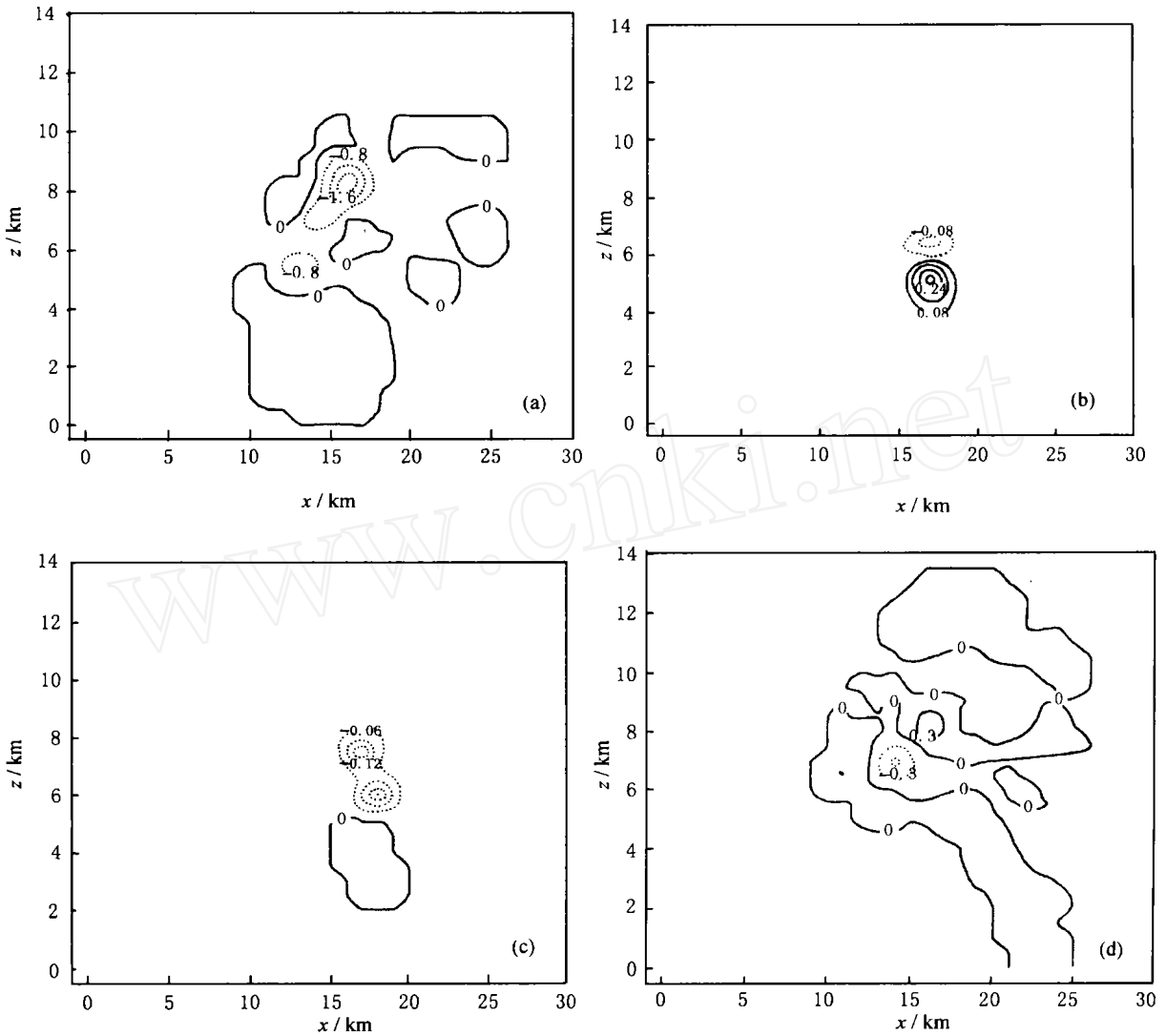


图 3 EC 和 NEC 算例在 42min 时刻冰雹参数模拟结果之差在 $y = 18 \text{ km}$ 的垂直剖面分布
 (a) 下落末速度(m/s); (b) 比含量(g/m^3); (c) 比浓度($10^4 \text{ 个}/\text{m}^3$); (d) 粒子半径(mm).
 实线为正差值, 虚线为负差值.

Fig. 3 The difference between EC and NEC cases of the x - y cross section at $y = 18\text{km}$ at 42min

NEC)的垂直空间分布 ($y = 18 \text{ km}$). 从图 3a 可知, 冰雹降落末速度在强负电场区(中心高度约 8km)被减小, 最大速度从 18.4m/s 减小到 16m/s, 但范围不大. 随着冰雹降落, 进入正电场区, 末速度虽有增加, 但增值很小而范围扩大. 比较图 1 可见, 较强正电场区域较小, 强度也较弱(最大仅 10kV/m), 所以在负电场区, 下落末速度与电场有较好的相关性, 在正电场区相关较差. 图 4 是霰粒降落速度时间变化, 最大降落速度可达 15m/s(相应霰径约 5mm). 比较图 2 和图 4 可见, 在电场大于 10kV/m 的时段, 电活动才

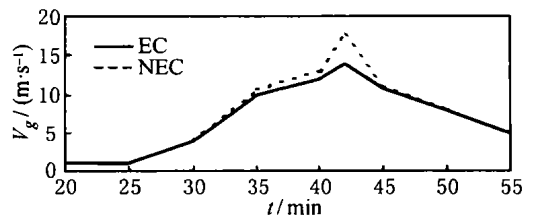


图 4 6.0km 高度上霰粒子最大下落末速度 V_g 随时间的变化

Fig. 4 The variety of the most fall speed of graupel particles with time at 6.0km height

起作用. 在电活动作用下, 一些冰雹特征参量也发生相应变化, 且主要发生在电场强度较大的负电场区域, 冰雹比含量减小, 其最大减小量为 0.16g/m^3 . 冰雹比浓度和直径最大减小量分别为 1.51 个/ m^3 和 0.8mm . 在正电场区, 由于其末速度增加不多, 比浓度和雹粒直径也略有增加, 但影响区域扩大. 从图 3b 可见, 比含量在正电场区增量很大, 5km 高度上达到 5g/m^3 , 增加了 0.32g/m^3 , 但与下落速度对应很差(图 3a), 这可能是其他影响因素导致的后续作用. 综上所述, 冰雹降落到不同电场区, 由于其降落末速度的不同变化, 相应冰雹参量变化也不同, 但降落到地面的总体变化使量增加直径增大. 图 5 是两种算例的地面降雹量和雹块直径时间变化. 由于冰雹降落到地面的时间约需 3min 以上, 所以图 3 的

42min 值对应图 5 的 45min 以上的值, 图中纵坐标是该时刻地面降雹量和最大雹径.

从图 5 可见, 若不考虑电作用, 地面降雹总量和雹块直径在 42min 时达到最大. 由于云内电场力作用(在 42min 时最强), 地面总降雹量最大值增加了 $1.5 \times 10^4\text{t}$, 且出现时间落后约 6min , 这是冰雹降落延时作用. 最大雹块直径也增加了约 0.8mm , 出现时间也落后约 6min . 图 6 是 48min 时地面降雹量分布. 考虑到地面降雹的滞后作用, 48min 应该接近最大地面降雹时刻, 相当于云中约 42min 时刻. 若近似考虑外围等值线为圆形, 那么由于电作用使地面总降雹区域从 201km^2 增加到 290km^2 , 约增加了 89km^2 (44%), 地面降雹量的厚度从 6mm 增加到 9mm , 降雹区中心位置也向后移动了约 4km .

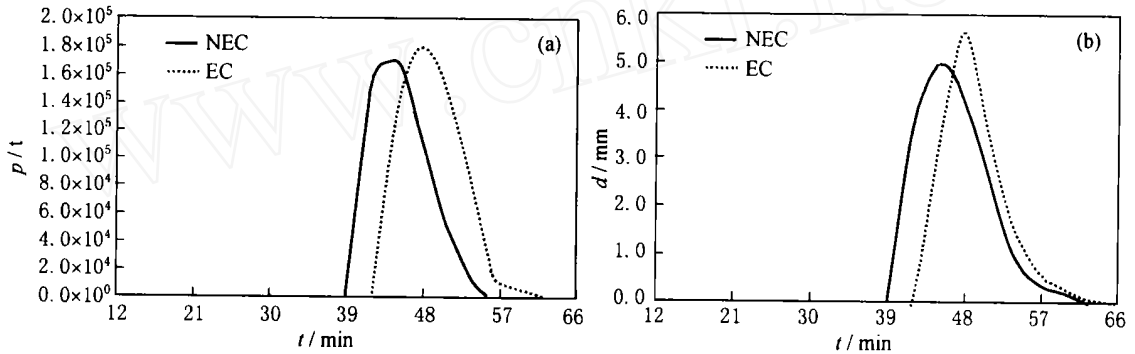


图 5 两种算例地面总降雹量 p (a) 和地面最大雹块直径 d (b) 随时间的变化

Fig. 5 The variety of total precipitation and the biggest diameter of hail particles on the ground with time in two cases

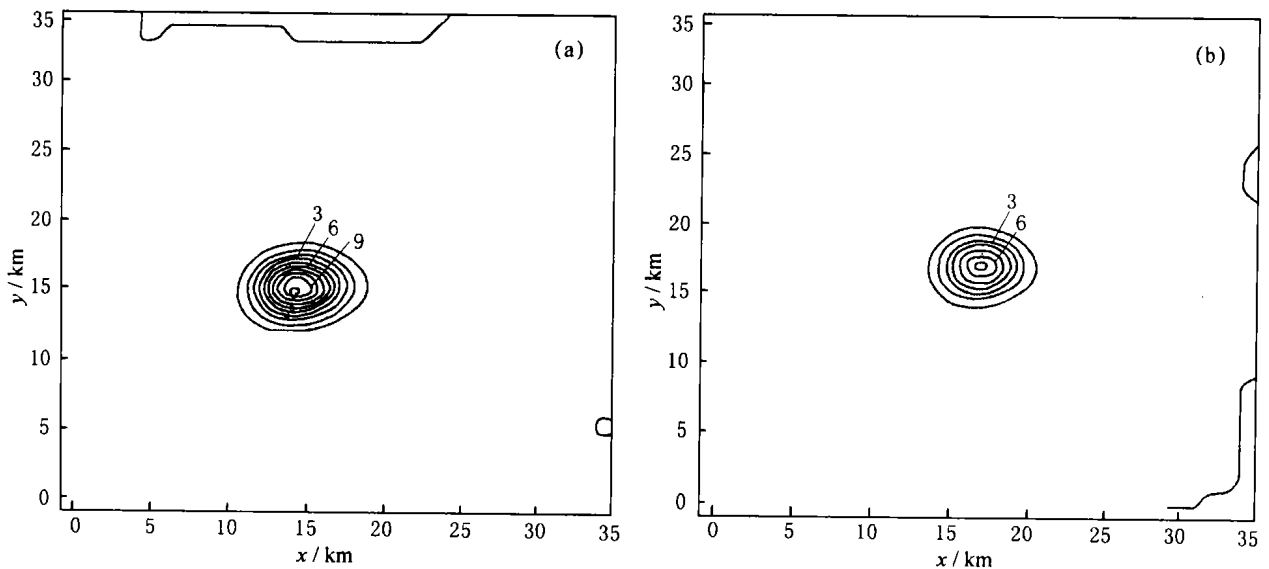


图 6 48min 时刻 EC(a) 和 NEC(b) 算例的地面降雹量分布(等值线单位: mm)

Fig. 6 The precipitation of hail in EC and NEC cases at 48min (units: mm)

4 各种水成物转换过程变化

影响冰雹增长主要有 3 个因素:上升气流、含水量和雹胚。雹胚主要是过冷水滴、冰晶和霰粒(自动转化)。不同雹胚的不同时空配置将产生不同的冰雹增长。

4.1 云雨水和冰晶

计算指出,模拟云体在 24min 开始出现雨水,36min 雨水达到极大量,由于电作用使雨水总量增加约 $16.1 \times 10^3 \text{ t}$ (EC: $222.6 \times 10^3 \text{ t}$, NEC: $206.5 \times 10^3 \text{ t}$),云水总量减少 $12.9 \times 10^3 \text{ t}$ 。表 1 是 39min 时刻值(选择 39min 值是为了与固态水成物做比较)雨水达到最大后刚开始减少的时刻,也是上升速度达到极值(32 m/s)并开始降落的时刻,最大雨水含量在空中的高度也开始下降到 4.2 km (30min 为 5 km,地面开始降雨)。从表 1 可见,由于电作用使雨水总量增加 $10.35 \times 10^3 \text{ t}$ (相应雨水比含量增加 0.2 g/m^3),增加百分比为 11%,云水减少了 $17.8 \times 10^3 \text{ t}$,减少百分比为 12.5%,且这种变化主要是雨滴碰并云滴过程增强所致(CL_{cr})。这是雨滴降落速度变化的结果。39min 时雨滴落速最大增量为 1.0m/s,42min 时增加到 1.6m/s,且垂直伸展达到 5~7km 的高度(图略)。而云滴自动转化过程(CN_{cr})反而减少,但 CN_{cr} 在雨水形成过程中所占比例很低(约 10%),所以影响不大。从图 2 可见电活动作用时间约 25min(从 30~55min),在该时段内,云内雨水含量增大。上述结果说明,在合适的时段,通过增加云中电

活动可以增加云中雨水含量和地面降水。

云初始冰晶首先是通过水汽在活化冰核上凝华而生成(即核化过程 NU_{v})。当含有水汽的气块上升时,由于负温度梯度($\partial T/\partial Z < 0$)的影响,水汽会凝华核化(或凝结-冻结核化)生成冰晶。从表 1 可见,电作用使核化冰晶含量减少了 28t(约减少 60%),相应冰晶数减少了 2.88×10^{10} 个(约 60%)。计算指出,在模拟到 70min 时,电作用使云体总释放潜热增加了 $1.7 \times 10^{14} \text{ J}$,这是各种微物理过程共同作用结果。由于潜热增加,云内温度也随之升高,最大可增加 $1.9 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[15]。当局部区域温度升高时,会导致垂直温度梯度减小,在不同时空位置,其变化量不同。根据核化公式^[12],核化率又与垂直梯度、上升速度有关,其总效果使核化率减小。但是,冰晶增长主要依靠水汽凝华(VD_{vi})过程。在 39min 时电作用使凝华冰晶总量增加了 $0.19 \times 10^3 \text{ t}$ (约 11%),在凝华公式中^[12],单个冰晶凝华率与单个冰晶的结凇率是负相关,在公式中,两项相当,不可忽略,随着释放潜热增加,后者减小,所以在冷云三相(水汽、过冷水滴和冰晶)共存环境中,冰晶凝华增长量增加。而冰晶碰撞云水增长量(CL_{ci})与 VD_{vi} 相比,约小 3 个量级。模拟结果指出,电活动从 33min 以后开始显现影响,持续时间约 20 余分钟。

从表 1 可见电作用使冰晶繁生过程(P_{ci})增强,从 11t 增加到 18t(增加百分比为 64%),而繁生冰晶数目从 2.5×10^6 个增加到 11.2×10^6 个,增加了约 3.5 倍。与核化过程相比,繁生过程作用小,生成的冰晶数目要小 3~4 个量级,但其生成的冰晶量已与

表 1 39min 时刻两算例各种水成物粒子微物理过程转换量 ($\times 10^3 \text{ t}$)

Table 1 The conversion quantity ($\times 10^3 \text{ t}$) of microphysical process of three precipitation elements in two cases at 39min

水成物	参数	EC	NEC	水成物	参数	EC	NEC
云 雨	云总量	124.5	142.3	霰	总量	10.63	11.14
	雨总量	105.78	95.43			(6.87)	(6.89)
	CL_{cr}	94.5	79.8		CN_{ig}	0.044	0.043
	CN_{cr}	11.3	15.6			(6.13)	(6.11)
冰 晶	总量	2.00	1.84	CL_{ig}	0.19	0.176	
		(10.28)	(10.68)	CL_{cg}	2.19	2.13	
	NU_{vi}	0.019	0.047	CL_{rg}	6.11	6.66	
		(10.28)	(10.68)	CL_{ng}	1.48	1.51	
	P_{ci}	0.018	0.011		(6.79)	(6.84)	
		(7.05)	(6.41)	VD_{vg}	0.61	0.62	
	CL_{ci}	0.0010	0.0018	NU_{rg}	0.007	0.017	
VD_{vi}	1.98	1.79		(4.33)	(4.35)		

注:表中 CL :碰并, VD :凝(升)华, CN :自动转化, ML :融化, NU :冰核核化, P :冰晶繁生。下标 c,v,i,r,g,h 分别表示云水、水汽、冰晶、雨水、霰和雹。下标最后一位字母表示过程生成物。括号内数字为相应过程的生成物数目,单位 10^x 个, x 即是括号内数字。

核化过程相当,生成的冰晶数目仍然约小3个量级.综合以上结果,电作用使冰晶总量增加了160t(增加百分比8.7%),而冰晶数目约减60%(主要是 NU_{vi} 作用).但是,冰晶繁生过程在云中不同的时空配置,可以提供更多的冰晶.分析发现,在某些空间位置,电作用使冰晶总数浓度增加(图略),这显然是冰晶繁生过程的作用.电作用增强冰晶繁生过程的原因很复杂,繁生过程只发生在 $-3 \sim -8$ 温度区域内,以 -5 为最大.潜热释放增加,可以增加发生繁生过程的区域.繁生过程要求有直径大于 $24\mu\text{m}$ 的大云滴.成雨过程增强可以提供较多的大云滴.言穆弘^[9]利用云模式讨论过 P_{ci} 作用以及对云电结构的影响.

4.2 霰和冰雹

从表1可见,电作用使霰粒总量减少了约 $0.51 \times 10^3 \text{t}$,数目减少 0.35×10^6 个.从总量而言,电作用影响不大.模拟结果指出,霰粒是水成物中带电量最多的粒子,所以降落速度变化较明显,且有较长持续时间(图4).能通过对潜热释放的调制来影响云体发展^[15].初始霰粒是由冰晶自动转换过程(CN_{ig})生成,然后通过云水、雨水的碰并($\mathcal{C}_{cg}, \mathcal{C}_{rg}$)而增长.随着云体发展,电活动增强,39min时, CN_{ig} 已减小到 $0.044 \times 10^3 \text{t}$,几乎减小了3个量级,而霰粒总数目却从 1.35×10^4 增加到 1.26×10^6 个.电作用使霰粒总量和数目都略有增加,分别增加约1t和 0.06×10^6 个(4.4%).这是 $\mathcal{C}_{cg,rg}$ 作用的结果, \mathcal{C}_{cg} 虽也减弱,但已上升为霰粒增长的主要过程之一,且电作用影响增大,使霰量增加 $0.06 \times 10^3 \text{t}$ (2.8%).而 \mathcal{C}_{rg} 已成为霰粒增长的优势过程,电作用影响明显,使霰量减少了 $0.55 \times 10^3 \text{t}$ (8.3%).图7是42min时刻电活动对霰粒降落末速度的影响.由图可见,在云中下部的电活动使霰粒降落速度减小,从而使发生在该区域内的碰并过程 \mathcal{C}_{rg} 减弱.云上部的霰粒降落速度增加,使发生在该区域的 \mathcal{C}_{ig} 增强.表1的 \mathcal{C}_{cg} 值是空间网格的综合结果.此外,还有雨水碰冻冰晶成霰过程 \mathcal{C}_{rig} .所以,由于微观过程的综合作用,云内电活动使霰总量减少且主要发生在云中、下部位.此外,从表1还可见,水汽直接凝华成霰粒(VD_{vg})也占一定比例,电活动使 VD_{vg} 略有减弱.雨滴异质核化冰结(NU_{rg})产生的霰量虽然较少,但电活动影响较大,减少百分比为59%,形成的霰减少了 10^3 个(4.2%).

从前已知,电作用的总体影响是使冰雹在降落

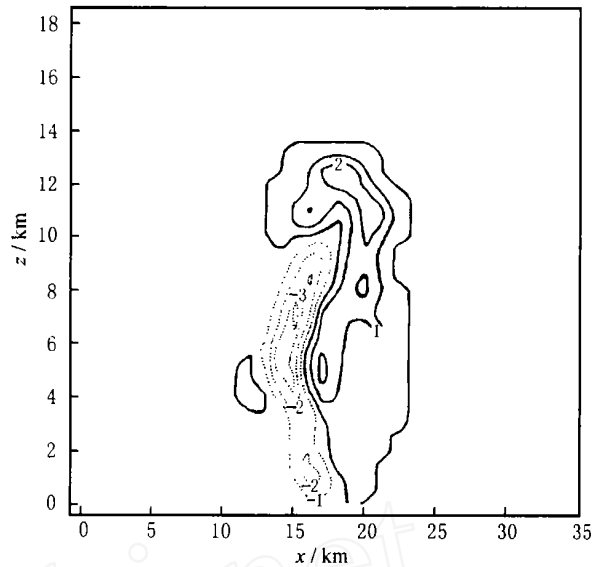


图7 EC和NEC算例霰粒的下落末速度之差在 $y = 18 \text{ km}$ 的垂直剖面分布

(图中实线为正差值,虚线为负差值;单位m/s).

Fig. 7 The difference of fall speed of graupel particles between EC and NEC cases of the x - y cross section at $y = 18 \text{ km}$ at 42min

过程中量增加、直径增大.本文试从各类微物理过程转换量的变化来分析其原因.冰雹通过霰自动转换过程(CN_{gh})以及与云滴、雨滴和霰的碰撞过程($\mathcal{C}_{ch}, \mathcal{C}_{rh}, \mathcal{C}_{gh}$)而增加.由于电场作用,在云核附近 $6.5 \sim 9 \text{ km}$ 高度范围内的冰雹粒子被减速,在 6 km 高度以下,粒子在较大范围内被加速.所以,冰雹微观转化过程也发生相应变化.

表2是不同时刻两算例冰雹微物理过程的源总量和汇总量.从表2可见,在云发展阶段(模拟时间33min以前),两算例结果无差别,电作用可以忽略,冰雹源和汇项基本相同.这是由于冰雹刚出现,雹粒较小,电作用的影响还很弱的原因.此后电活动影响增强,在36min时出现差别,随着模拟时间增加,上升气流速度增大,云内电场也增强.39min达到最大上升速度为 32 m/s ,冰雹源总量分别为 $9.9 \times 10^3 \text{t}$ (EC算例)和 $10.24 \times 10^3 \text{t}$ (NEC算例).电活动使冰雹源总量减少了 340t (9.8%比例),由于霰含量减少,使其中 CN_{gh} 减少最多为 200t , $\mathcal{C}_{ch}, \mathcal{C}_{gh}, \mathcal{C}_{rh}$ 分别为 $30, 40 \text{t}$ 和 70t .相应冰雹数目减少了 0.88×10^4 个.39min以后,冰雹源总量逐渐减少,但电活动的影响却增大,在45min时,冰雹源总量减少了 690t ,冰雹总数目减少更多,为 $1.35 \times 10^4 \text{t}$,此时,云水碰冻冰雹(\mathcal{C}_{ch})已为优势过程,减少也最多.54min时云体已处于消散阶段,云内电场很弱,冰雹源总量减少,电作用也逐渐消失.综上所述,电活动影响时间

从 33min 开始以后一直延续到 55min,在约 22min 时段内使冰雹源总量减少(表 2). 但其变化很陡,上升快,下降也快,较强影响时段为 36~48min,约 12min

(图略). 而此时段也正是电活动明显变化阶段,两者有很好对应关系.

冰雹消耗总量(汇)随时间变化与源项相似,在

表 2 不同时刻两算例冰雹粒子微物理过程转换量 ($\times 10^3 t$)

Table 2 The conversion quantity ($\times 10^3 t$) of microphysical process in two cases at different time

参数	33min		36min		39min		45min		54min	
	EC	NEC	EC	NEC	EC	NEC	EC	NEC	EC	NEC
源总量	3.91 (4.28)	3.91 (4.28)	9.5 (4.61)	9.95 (4.87)	9.9 (4.4)	10.24 (4.53)	3.3 (3.9)	3.99 (4.33)	1.16 (3.77)	1.2 (3.77)
CN_{gh}	0.019 (4.28)	0.019 (4.28)	2.77 (4.61)	2.91 (4.86)	1.45 (4.4)	1.65 (4.52)	0.6 (3.9)	0.6 (4.33)	0.45 (3.77)	0.46 (3.76)
CL_{ch}	3.24	3.24	4.81	5.13	6.69	6.72	2.19	2.69	0.61	0.59
CL_{gh}	0.13	0.13	0.60	0.59	0.53	0.57	0.36	0.41	0.09	0.11
CL_{rh}	0.51	0.51	1.32	1.32	1.23	1.30	0.16	0.26	0.008	6.2×10^{-3}
汇总量	7.6×10^{-4}	7.6×10^{-4}	0.098 (2.8)	0.10 (2.82)	1.26 (3.98)	2.35 (4.03)	2.71 (4.2)	3.73 (4.21)	0.85 (2.1)	0.85 (2.1)
VD_{hv}	1.5×10^{-4}	1.5×10^{-4}	0.0024 (1.82)	0.0027 (1.30)	0.037 (2.38)	0.55 (2.68)	0.24 (3.12)	0.26 (3.02)	0.16 (2.86)	0.16 (2.86)
ML_{hr}	6.1×10^{-4}	6.1×10^{-4}	0.096 (2.79)	0.10 (2.82)	1.2 (3.94)	1.79 (3.99)	2.47 (4.08)	3.47 (4.19)	0.69 (3.98)	0.69 (3.98)

注:表中符号意义同表 1.

初始发展阶段(33min),两算例无差别,此后,差别逐渐出现. 39min 时,电活动使冰雹总汇量减少了 45%. 相应冰雹汇总数减少比例为 11%. 云体发展到 45min 时,虽然冰雹汇总量增加,但电活动影响却减弱,减少比例分别为 28% 和 2.5%. 冰雹汇项主要是融化和升华两个过程. 从表 2 可见,在不同时刻,电活动对融化和升华过程的影响量有差别,39min 时,升华量减少比例(93%)比融化大(56%),而 45min 时反之(7.7% 和 28.8%). 融化和升华量的减小,主要不是电活动的直接作用,而是通过影响其他微物理过程的间接作用,例如影响冰雹浓度、谱参数等.

总体而言,冰雹汇和源总量时间变化基本相似,但汇总量在时间上有滞后,二者持续时间基本相同,约 10 余分钟. 比较汇总量和源总量变化量可见(表 2),云内电活动使二者都减少. 但汇总量减少比例大于源总量. 所以,综合的效果使冰雹含量增加. 例如 39min 时,冰雹总量增加 700t,45min 时增加 330t,作用时间约 10 余分钟. 但是,冰雹总数目的减少使冰雹增长得更大,更易降到地面.

5 结论与讨论

利用建立的三维强风暴动力-电耦合数值模

式,研究风暴内电活动对云内各类水成物粒子变化的影响,得到:

5.1 在模拟云达到成熟阶段,云内出现强电场区时,各类水成物的含量、浓度会产生较大变化,电活动使冰晶总量增加,霰总量减少,冰雹源、汇量都减少,但汇量减少较多,故总体作用使冰雹含量增加,直径增大,其持续时间约 10 余分钟.

5.2 分析引起上述变化的原因,指出电活动是通过各类水成物粒子降落末速度的调制来影响各种微物理过程,从而改变了各相水成物的生成量和转换量.

5.3 在强电场持续时段(10 余分钟),云水量减少,雨水量增多,在 39min 时,云水减少 12.5%,而雨水增加约 11%. 冰晶量约增加 8.7%,尤其是冰晶繁生过程增强,使繁生冰晶数目约增加 3.5 倍.

综上所述,我们可以建立以下物理链:

云内起电,建立强电场区 本文模拟最大电场 16kV/m,事实上,模式计算最大电场可达到 100kV/m 以上(符合观测值),但由于本文只讨论起电时段,所以略去了模式中放电和电导漏泄部分,从而人为限制了电场最大值(增大时空平滑). 若引入放电,并去掉限制,某些时段电场更大,接近观测值.

改变水成物落速 在电场 $E > 10kV/m$ 区域中,大粒子落速发生变化,电场越大,变化也越大,冰

霰最大落速减少了 2.4m/s(电场为 16kV/m 时),可见影响之大,这完全是电场力 E_q 作用所致(q 为粒子所带电荷量,最大可达 $(50 \sim 100) \times 10^{-12} \text{C}$,与云内观测值一致)。

调制水成物之间的微观过程(转换量、时空分布) 在很多微观过程中,尤其是碰撞过程,落速变化对转换量影响很大(表 1~2)。

改变各种水成物(尤其是雨、霰、霰)量及时空分布,释放潜热增加^[15] 由于转换量变化,导致各种水成物量(例如霰、霰)及其时空分布发生相应变化,于是地面降雪量也变化,且由于降落过程时间上有滞后。总潜热增加约 $1.7 \times 10^{14} \text{J}$,上升速度最大增加 3.1m/s ^[15]。

地面降雪增大,动力场改变,对流增强^[15]

上述最大值是最大电场为 16kV/m 时的结果,若电场增强,相应数值也将增大。

在经典随机碰撞理论中,认为电过程对小粒子影响较明显,对于较大粒子的影响可以忽略。本文从电场力对大粒子降落速度的影响,从对各类微观物理过程的调制等角度出发,研究发现电场力对雨滴、冰霰等大粒子的影响是存在的,但作用时间不长,只有在云内出现强电场(约高于 10kV/m)时段(约 10 余分钟)才起作用。这对于人工影响的时机选择可以提供一些理论依据。

电活动对微物理过程的影响有些是直接的,即通过对大粒子降落的末速度来影响过程,例如一些碰撞过程;而有些是间接的,是一些微观过程变化的后续反应,例如冰霰的融化和升华过程。可以通过模拟计算,仔细研究它们之间的变化和转换。详细的变化和机制有待于深入研究。

参考文献

- [1] Browning J A, Foote GB. Airflow and hail growth in supercell storms and some implications for hail suppression. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1976, **102**: 499 ~ 533
- [2] Orville H D, Koop F J. Numerical simulation of the life history of a hail storm. *J. Atmos. Sci.*, 1977, **34**(10): 1596 ~ 1618
- [3] Klemp J B, Wilhelmson R B. Simulation of right and left-moving storm produced through storm splitting. *J. Atmos. Sci.*, 1978, **35**: 1097 ~ 1110
- [4] Chiu chinshan. Numerical study of cloud electrification in an axisymmetric, time-dependent cloud model. *J. Geophys. Res.*, 1978, **83**: 5025 ~ 5049
- [5] Latham J, Warwicker, R. Charge transfer accompanying the splashing of supercooled Raindrops on hailstones. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 1980, **106**: 559 ~ 568
- [6] Takahashi T. Thunderstorm electrification a numerical. *J. Atmos. Sci.*, 1984, **41**: 2541 ~ 2558
- [7] Heldson J, Farley R A. A numerical modeling study of a Montana thunderstorm. *J. Geophys. Res.*, 1987, **92**: 5661 ~ 5675
- [8] 言穆弘, 郭昌明, 葛正漠. 积云动力和电过程二维模式研究, 理论和模式. 地球物理学报, 1996, **39**(增刊): 52 ~ 64
Yan M H, Guo C M, Ge Z M. Numerical study of cloud dynamic-electrification in an axisymmetric, time-dependent cloud model, theory and model. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1996, **39**(Suppl.): 52 ~ 64
- [9] 言穆弘, 郭昌明, 葛正漠. 积云动力和电过程二维模式研究, 计算结果. 地球物理学报, 1996, **39**(增刊): 65 ~ 74
Yan M H, Guo C M, Ge Z M. Numerical study of cloud dynamic-electrification in an axisymmetric, time-dependent cloud model, results of calculation. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1996, **39**(Suppl.): 65 ~ 74
- [10] Rawling F. A numerical study of thunderstorm electrification using a 3D model incorporating the ice phase. *Quart. J. R. Met. Soc.*, 1982, **108**: 779 ~ 800
- [11] James E D, Peter S R. A model evaluation of non-inductive graupel-ice in the early electrification of a mountain thunderstorm. *J. Geophys. Res.*, 1991, **96**(D7): 12833 ~ 12855
- [12] Sun A P, Yan M H, Zhang Y J, et al. Numerical study of thunderstorm electrification with a three-dimensional dynamics and electrification coupled model-model description and parameterization of electrical processes. *Acta Meteor Sinica*, 2002, **16**(1): 107 ~ 122
- [13] 孙安平, 言穆弘, 张鸿发等. 三维强风暴动力-电耦合数值模拟研究—模式初步检验. 高原气象, 2000, **19**(4): 435 ~ 440
Sun A P, Yan M H, Zhang H F, et al. Study of three-dimensional dynamics-electrification coupled model—primary test of model. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2000, **19**(4): 435 ~ 440
- [14] Dye J, Jones E, Winn J J, et al. Electrification and precipitation development in a small isolated Montana Cumulonimbus. *J. Geophys. Res.*, 1986, **91**: 1231 ~ 1247
- [15] 张义军, 孙安平, 言穆弘等. 雷暴电结构影响云动力发展模式研究. 高原气象, 2004, **23**(待发表)
Zhang Y J, Sun A P, Yan M H, et al. Study on effect of charge structure in thunderstorm on dynamics of model. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2004, **23**(in press)