

气溶胶对云中水成物粒子荷电情况的影响

王宁宁^{1,2} 谭涌波^{1,2} 师正^{1,2} 郭秀峰^{1,2}

摘要

利用已有的二维雷暴云起电模式,加入气溶胶模块,建立一个完善的雷暴云起电模式.结合 SEET 个例,初步探讨了气溶胶浓度对雷暴云内各种水成物粒子荷电情况的影响.发现气溶胶的浓度与雷暴云内云滴、霰粒、冰雹以及雨滴等水成物粒子在空间所携带的最大电荷面密度值以及电荷量有很好的正相关性;同时气溶胶粒子浓度的增加使得雨滴在空间携带电荷量达到峰值的时间有一定提前.

关键词

气溶胶;水成物粒子;数值模拟;最大电荷密度值;电荷量

中图分类号 P426.5

文献标志码 A

收稿日期 2011-11-21

资助项目 国家自然科学基金(41175003);公益性行业科研专项(GYHY200806014, GY-HY201006005)

作者简介

王宁宁,男,硕士生,主要从事雷电科学研究. hiwangning@163.com

谭涌波(通信作者),男,副研究员,主要从事大气电学方面的研究. ybtan@ustc.edu

1 南京信息工程大学 气象灾害省部共建教育部重点实验室,南京,210044

2 南京信息工程大学 大气物理学院,南京,210044

0 引言

雷暴云电荷结构分布一直是大气电学研究的重要内容,也是雷电发生、发展过程研究的基础^[1-2].很多观测结果都表明雷暴云的空间电荷结构呈现偶极性和三极性分布.雷暴云电荷结构的形成主要是由于雷暴云内微物理过程中起电机机制不同而造成空中荷电粒子的分离,而云中促进电荷形成的水成物粒子主要包括云滴、雨滴、冰晶、霰粒、冰雹这5种.由于实际观测的局限性,大部分学者对雷暴云中水成物粒子荷电情况分布的研究讨论都是基于实验室结果,在云模式中加入感应和非感应起电机机制,来探讨这些水成物粒子的电荷分布情况和云的动力、微物理过程之间的关系^[3-8],但是对于云模式的参数化方案都仅仅是依靠实验室得出的经验公式,并未考虑气溶胶的成分.

近年来,国内外开展了很多关于气溶胶对于雷暴云微物理过程影响的研究,结果表明气溶胶通过影响云凝结核的云滴谱、雨滴谱以及降水的形成都产生了明显的影响.增加气溶胶的浓度会增加云凝结核的浓度,从而减少云滴的有效半径,导致云水碰并率和自动转化率相应减小,在一定程度上减少了降水^[9-12].

气溶胶作为云的凝结核,对雷暴云的微物理过程有显著的影响,而微物理过程又与这些云内水成物粒子的参数有着直接联系,那么气溶胶势必对雷暴云内的水成物粒子的荷电情况产生或多或少的影 响.本文在已有二维雷暴云起电模式^[13]基础上,加入气溶胶模块,尽可能继续优化起电参数化方案,建立一个包含气溶胶模块的雷暴云起电模式,通过改变气溶胶的初始浓度分布,分析其对雷暴云内各种水成物粒子荷电情况的影响.

1 模式的建立

本文以已有的二维雷暴云起电模式为基本框架,在此基础上植人气溶胶模块.假设气溶胶粒子是各向均质分布的硫酸盐粒子,不考虑其化学性质,也不考虑其对冰晶粒子带来的影响.对于气溶胶的初始粒子谱分布按照一般的3个模态的对数正态分布^[14]给出,并且认为气溶胶的浓度随高度呈指数衰减^[15].众所周知,气溶胶的谱分布、化学性质和大气过饱和度是决定新生云滴谱分布的主要原因^[16],由于本文主要探讨气溶胶的浓度变化对雷暴云内水成物粒子电荷的影

响,不考虑其化学性质以及不同尺度范围内的气溶胶粒子浓度和质量变化的情况,因此采用体积水方案来处理凝结核化过程.具体气溶胶的微生物过程参数化方案见文献[17],在这里不再详述.

为了分析气溶胶初始浓度分布的改变给雷暴云内水成物粒子电荷结构分布带来的变化,本模式选取1999年7月31日在美国新墨西哥州Langmuir实验室所在地进行的雷暴云内电过程的综合研究(Studies of Electrical Evolution in the Thunderstorms, 简称为SEET个例).初始条件为:模式计算域76 km × 20 km,分辨率250 m × 250 m,时间大步长2 s,小步长0.4 s.在初始时间给出了一个水平半径为5 km,垂直半径为1 km的湿热泡扰动,其中心位于模式区域中心左侧高度为1 km的格点上,中心最大温度为4 K,中心最大相对湿度扰动为中心饱和湿度值与实测值之间差值的70%,并且从中心向外以余弦函数递减.在初始条件以及个例不变的情况下增加气溶胶的初始浓度分布,然后对比各个模拟实验中雷暴云水成物粒子空间最大电荷密度以及带电总量随时间的变化.

2 结果分析

2.1 气溶胶浓度与雷暴云中水成物粒子携带的空间最大电荷面密度的相关关系

由于气溶胶的加入,使原先模式中固定不变的云滴数目随着气溶胶浓度的变化发生改变,这样的变化势必会影响起电机机制,继而改变雷暴云中各个水成物粒子荷电量,它们之间的影响程度究竟如何呢?本模拟实验对于气溶胶模块只考虑其达到活化半径而核化为云滴粒子,未曾考虑其对冰核的影响,气溶胶浓度的增加对冰晶粒子数目并没有影响,并且冰晶粒子所携带的电荷来源主要是非感应起电机机制,而非感应起电机机制中只考虑了冰相粒子与霰、雹之间的碰撞,云滴数浓度的增加对其影响较小,这样随着气溶胶浓度的改变,冰晶粒子在雷暴云中所携带的最大电荷密度值以及电荷量就不会发生明显的变化,因此图1和2中只给出了其他4种粒子的情况.本试验假设云的厚度为1 km,选取SEET个例,在初始场以及初始扰动都不发生任何改变的情况下,加入不同浓度的气溶胶粒子来进行模拟实验,

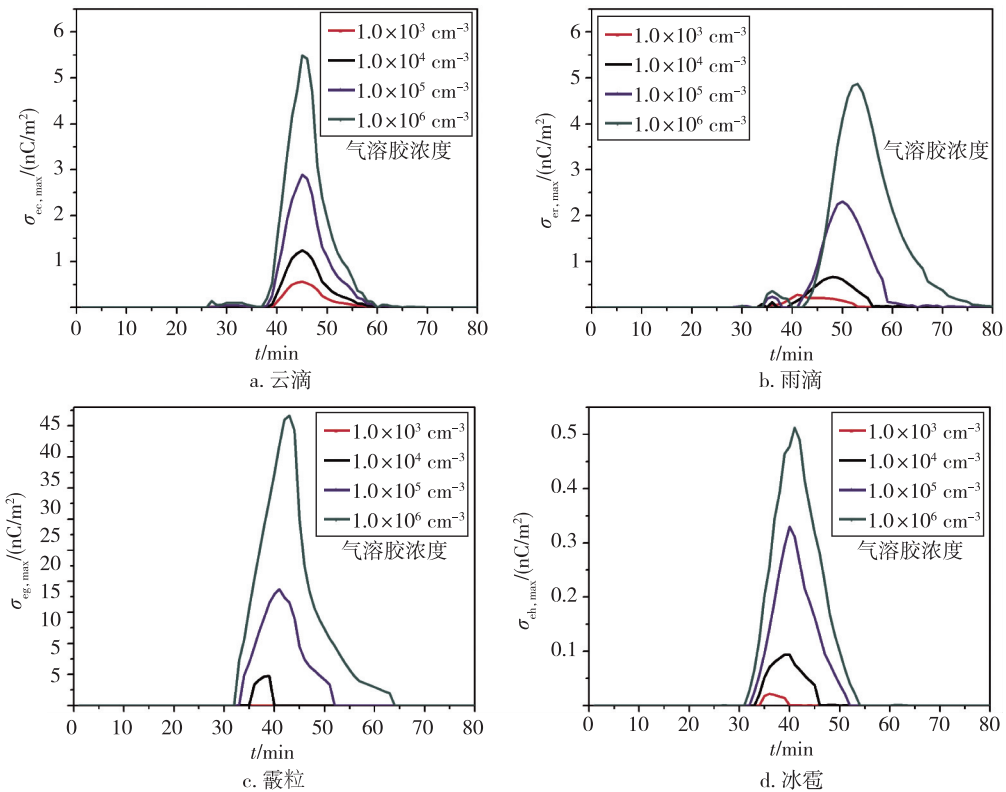


图1 气溶胶浓度改变情况下水成物粒子所携带的最大电荷面密度值随时间的变化

Fig.1 Temporal changes of maximum charge density carried by different particles of thunderstorm cloud with various aerosol concentrations

将得到的雷暴云中各个水成物粒子在空间所携带的最大电荷密度值随时间的变化曲线示于图 1。

从图 1 中可以发现:云滴、霰粒、冰雹在空间中所携带的最大电荷面密度值随时间变化的曲线都呈现单峰分布,并且气溶胶浓度增加对它们到达峰值的时间有一定的延后,但是影响较小,云滴主要集中在 45 min 左右、霰粒在 40 min 左右、冰雹在 39 min 左右;而雨滴在雷暴云中携带的最大电荷面密度值随时间的变化曲线出现比较典型的双峰分布,到达峰值的时间会随气溶胶初始浓度的增加而增长,其到达峰值的时间分别为 41、48、50 和 53 min. 这些水成物粒子在不同初始浓度气溶胶环境下在空间所携带最大电荷面密度的峰值示于表 1 中。

表 1 水成物粒子在不同初始浓度气溶胶环境下在空间所携带最大电荷面密度的峰值

Table 1 Peak value of maximum charge density carried by particles at different initial aerosol concentrations in environment

气溶胶的初始浓度/ cm^{-3}	最大电荷面密度的峰值/(nC/m^2)			
	云滴	雨滴	霰粒	冰雹
1.0×10^3	0.56	0.27	0.05	0.02
1.0×10^4	1.24	0.66	4.72	0.09
1.0×10^5	2.89	2.31	18.7	0.33
1.0×10^6	5.49	4.87	46.6	0.51

通过此次模拟实验可以看出:气溶胶对雷暴云中水成物(冰晶粒子除外)在空间的最大电荷面密度有促进作用;除了雨滴外,其他水成物粒子达到峰值的时间基本不受气溶胶浓度增加的影响. 出现这种现象的原因可能是因为模式中只考虑了气溶胶与云滴之间的核化过程,不考虑与冰晶的相互作用,所以气溶胶初始浓度的增大就不会对冰晶在雷暴云中携带的电荷产生太大的影响,而气溶胶浓度的增加会导致雷暴云中云滴的数浓度增加,从而增加了云滴与霰粒、冰雹之间的碰撞感应起电. 同时,雨滴主要是由云滴、霰粒、冰雹转化生成的,其所携带的电荷来源主要是其他 4 种粒子的相变,因此它所携带的最大电荷面密度与其他水成物粒子所携带的电荷有一定的正相关性,会伴随着气溶胶粒子浓度的增长而增长。

2.2 气溶胶浓度变化与雷暴云中水成物粒子带电量的相关关系

既然气溶胶粒子浓度的增加对雷暴云中水成物粒子在空间的最大电荷面密度有促进作用,那么是否

对其在空间带电的总量会有影响呢? 下面将雷暴云中各个水成物粒子在空间带电的总量随时间的变化示于图 2。

通过图 2 可以清晰地发现,无论是云滴、雨滴,还是霰粒、冰雹,当气溶胶浓度增加的时候,其在雷暴云中携带的电荷总量也会相应地增加,并且各个水成物粒子带电量的峰值也会随之增加. 云滴、霰粒、冰雹在空间携带的电荷量随时间的变化曲线总体上呈现单峰分布,其中云滴一直伴随有轻微的波动,但它们到达峰值的时间基本不受气溶胶浓度的影响,云滴、霰粒、冰雹分别在 40 min 左右、44 min 左右、42 min 左右达到最大值,但雨滴所携带的电荷量随时间的变化出现双峰分布,并且随着气溶胶浓度的增加,到达峰值的时间也从 64 min 提前至 52 min. 水成物粒子在不同初始浓度气溶胶环境下在空间所携带电荷量的峰值如表 2 所示。

表 2 水成物粒子在不同初始浓度气溶胶环境下在空间所携带电荷量的峰值

Table 2 Peak value of total charges carried by particles at different initial aerosol concentrations in environment

气溶胶的初始浓度/ cm^{-3}	电荷量的峰值/C			
	云滴	雨滴	霰粒	冰雹
1.0×10^3	2.09	1.07	9.81	0.07
1.0×10^4	5.21	1.33	16.30	0.17
1.0×10^5	16.20	3.58	37.00	0.50
1.0×10^6	39.30	8.55	74.50	0.92

通过本次模拟实验不难发现:气溶胶对雷暴云中水成物(冰晶粒子除外)在空间的最大电荷面密度以及所携带的电荷量都有促进作用;除了雨滴外,其他水成物粒子达到峰值的时间基本不受气溶胶浓度增加的影响. 出现这种现象的原因可能是因为模式中只考虑了气溶胶与云滴之间的核化过程,不考虑与冰晶的相互作用. 气溶胶浓度的增加,导致雷暴云中云滴的数浓度增加,而冰晶所携带电荷的主要来源是模式中的非感应起电机,非感应起电主要考虑了霰、雹与冰晶的碰撞反弹,云滴数目的改变仅影响非感应起电中电荷极性的问题,所以云滴数目的增加对非感应起电机机制的影响较小,气溶胶初始浓度的增大就不会对冰晶在雷暴云中携带的电荷产生太大的影响. 同时,雨滴主要是由于云滴、霰粒、冰雹转化生成的,雨滴所携带的电荷来源主要是其他 4 种粒子的相变,因此它所携带的最大电荷密度以及电荷量与其他水成物粒子所携带的电荷有一定的正

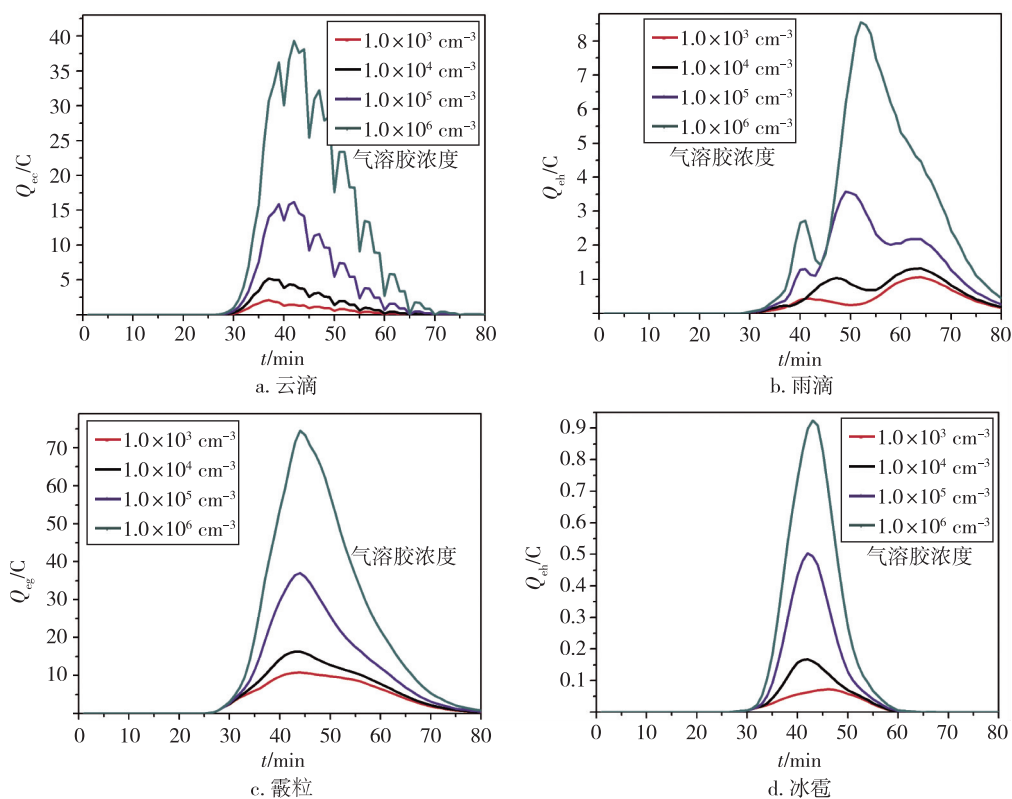


图2 气溶胶浓度改变情况下各个水成物粒子空间带电总量随时间的变化

Fig. 2 Temporal changes of total charges carried by different particles of thunderstorm cloud with various aerosol concentrations

相关性,伴随着气溶胶粒子浓度的增长而增长,但其到达峰值的时间却有所提前。

3 总结和讨论

本文在已有的云模式基础上,加入气溶胶模块,完善了云模式. 利用改进后的云模式,结合 SEET 个例,对雷暴过程进行二维 250 m 分辨率下的数值模拟实验. 分析讨论了不同初始浓度的气溶胶粒子对雷暴云中水成物粒子荷电情况的影响. 通过以上研究,本文的主要结论如下:

1) 随着气溶胶浓度的增加,雷暴云中云滴、霰粒、冰雹以及雨滴在空间所携带的最大电荷面密度值以及电荷量会随之增加,并且在模拟时间内所携带的最大电荷面密度以及电荷量的峰值也会随之增加,这表明气溶胶的初始浓度与雷暴云内云滴、霰粒、冰雹以及雨滴这些水成物粒子在空间所携带的最大电荷面密度值以及电荷量有很好的正相关性。

2) 雷暴云中云滴、霰粒、冰雹在空间中所携带的最大电荷面密度以及电荷量随时间的变化曲线呈现单峰分布,而雨滴在空间中所携带的最大电荷面密度以及电荷量随时间的变化曲线却呈现双峰分布,

并且气溶胶浓度的增加对云滴、霰粒、冰雹在云中携带的电荷量到达峰值的时间并没有太大影响,但会使雨滴在云中携带的电荷量到达峰值的时间有一定的提前。

本模式未曾考虑气溶胶对冰晶的影响,这也是下一步工作的重点。

参考文献

References

- [1] Simpson G, Scrase F J. The distribution of electricity in thunderclouds[J]. Proc R Soc London, Ser A, 1937, 161 (906): 309-352
- [2] Simpson G, Robinson G D. The distribution of electricity in thunderclouds II [J]. Proc R Soc London, Ser A, 1941, 177 (970): 281-329
- [3] Chiu C-S. Numerical study of cloud electrification in an axisymmetric, time-dependent cloud model[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 1978, 83 (C10): 5025-5049
- [4] Takahashi T. Thunderstorm electrification: A numerical study[J]. J Atmos Sci, 1984, 41(17): 2541-2558
- [5] 言穆弘, 刘欣生, 安学敏, 等. 雷暴非感应起电机制的模拟研究 I: 云内因子影响[J]. 高原气象, 1996, 15 (4): 425-437
YAN Muhong, LIU Xincheng, AN Xuemin, et al. A simu-

- lation study of non-inductive charging mechanism in thunderstorm I :Affect of cloud factor[J]. Plateau Meteorology,1996,15(4):425-437
- [6] 言穆弘,刘欣生,安学敏,等. 雷暴非感应起电机制的模拟研究 II :环境因子影响[J]. 高原气象,1996,15(4):438-447
- YAN Muhong,LIU Xinsheng,AN Xuemin,et al. A simulation study of non-inductive charging mechanism in thunderstorm II :Affect of environmental factor[J]. Plateau Meteorology,1996,15(4):438-447
- [7] Rawlins F. A numerical study of thunderstorm electrification using a three dimensional model incorporating the ice phase[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society,1982,108(458):779-800
- [8] 郭凤霞,张义军,郗秀书,等. 雷暴云不同空间电荷结构数值模拟研究[J]. 高原气象,2003,22(3):268-274
- GUO Fengxia,ZHANG Yijun,QIE Xiushu,et al. Numerical simulation of different charge structures in thunderstorm[J]. Plateau Meteorology,2003,22(3):268-274
- [9] Mansell E R,MacGorman D R,Ziegler C L,et al. Charge structure and lightning sensitivity in a simulated multicell thunderstorm [J]. Journal of Geophysical Research,2005,110(D12):D12100-D12101
- [10] Khain A,Rosenfeld D,Pokrovsky A. Aerosol impact on the dynamics and microphysics of deep convective clouds [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society,2005,131(611):2639-2663
- [11] 杨慧玲,肖辉,洪延超. 气溶胶对冰雹云物理特性影响的数值模拟研究[J]. 高原气象,2011,30(2):445-460
- YANG Huiling,XIAO Hui,HONG Yanchao. Numerical simulation of aerosol impact on cloud physics of hailstorm [J]. Plateau Meteorology,2011,30(2):445-460
- [12] Segal Y,Pinsky M,Khain A. The role of competition effect in the raindrop formation [J]. Atmospheric Research,2007,83(1):106-118
- [13] 谭涌波,陶善昌,祝宝友,等. 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,2007,50(4):1053-1065
- TAN Yongbo,TAO Shanchang,ZHU Baoyou,et al. 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,2007,50(4):1053-1065
- [14] Leporini M,Wobrock,Flossmann A I. Simulations of stratocumuli clouds with warm detailed microphysics [C] //Proceedings of the International Conference on Clouds and Precipitation,Bologna,Italy:2004
- [15] Meszaros E. Present status of our knowledge on the atmospheric condensation nuclei:Problems of cloud physics [M]. Gidrometeorozdat,1978:157-170
- [16] Khain A,Ovtchinnikov M,Pinsky M,et al. Notes on the state-of-the-art numerical modeling of cloud microphysics [J]. Atmospheric Research,2000,55(3):159-224
- [17] 刘校辰,刘奇俊. 云模式中气溶胶物理过程参数化方案研究概述[J]. 气象,2006,32(6):426-434
- LIU Xiaochen,LIU Qijun. Review on parameterization schemes of aerosol microphysical processes in cloud models [J]. Meteorological Monthly,2006,32(6):426-434

Effect of aerosol on electric charge of particle

WANG Ningning^{1,2} TAN Yongbo^{1,2} SHI Zheng^{1,2} GUO Xiufeng^{1,2}

1 Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education,
Nanjing University of Information Science & Technology,Nanjing 210044

2 School of Atmospheric Physics,Nanjing University of Information Science & Technology,Nanjing 210044

Abstract In this article,a complete thunderstorm electrification model is proposed by adding the aerosol module to the existing two-dimensional thunderstorm electrification model. The SEET case is used to discuss the effect of different aerosol concentration on the electric charge of various particles in thunderstorm cloud. The result shows that a good positive correlation exists between the aerosol concentration and maximum charge density/quantity carried by particles like the cloud droplet,graupel grain,hail or raindrop in the thunderstorm cloud,and the increase of the aerosol particle concentration will bring forward the time of the charges brought by the raindrop to reach its peak.

Key words aerosols;particle;numerical simulation models;maximum charge density;charges