

师正,陈浩琛,樊艳峰,等,2025.不同核化过程对雷暴云放电过程影响的数值模拟研究[J].气象,51(10):1215-1225. Shi Z, Chen H C, Fan Y F, et al, 2025. Numerical simulation study on effects of different nucleation parameterizations on electrification in thunderstorms[J]. Meteor Mon, 51(10):1215-1225(in Chinese).

不同核化过程对雷暴云放电过程影响的数值模拟研究^{*}

师 正^{1,2} 陈浩琛¹ 樊艳峰² 曲凯悦¹ 崔雪东³ 陈家豪¹ 王玉莹⁴

1 南京信息工程大学应急管理学院, 南京 210044

2 中国气象局雷电重点开放实验室, 北京 100081

3 浙江省气象安全技术中心, 杭州 310008

4 南京信息工程大学大气物理学院, 南京 210044

提 要:近年来,气溶胶与雷暴云电学活动的相互作用关系已成为学术界关注的重点之一。可溶气溶胶液滴的同质核化和冰核异质核化是冰晶粒子形成的两种来源,而雷暴云中冰晶粒子大小和浓度对电荷的产生及其分层状况有一定影响,是导致闪电发生的重要因素。文中利用三维雷暴云模式,选取一次山地弱雷暴个例,研究了三种冰晶核化方案对雷暴云放电特征的影响。结果表明:同质核化在云顶低温区形成大量冰晶粒子,雷暴云中放电持续时间长,电荷结构以偶极性为主,闪电频次较低,产生的闪电以云闪为主,其触发点高度高。异质核化在高温区形成冰晶,导致雷暴云中出現更早的起电过程,高温区冰晶易满足电荷反转条件,显著增加了负非感应起电率,雷暴云电荷结构易形成三极型。此背景下,闪电发生时间提前且触发点相对较低,即异质核化促进了闪电的发生。同质核化和异质核化同时发生时,雷暴起电过程强,闪电频次高。此外,两种核化过程造成闪电首次发生时间提前,闪电的触发点高度分布范围大,三极型电荷结构促进了更多负地闪的发生。

关键词:核化过程,同质核化,异质核化,闪电频次,数值模拟

中图分类号: P427

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2025.040301

Numerical Simulation Study on Effects of Different Nucleation Parameterizations on Electrification in Thunderstorms

SHI Zheng^{1,2} CHEN Haochen¹ FAN Yanfeng² QU Kaiyue¹

CUI Xuedong³ CHEN Jiahao¹ WANG Yuying⁴

1 School of Emergency Management, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

2 Key Laboratory of Lightning, CMA, Beijing 100081

3 Zhejiang Meteorological Safety Technology Center, Hangzhou 310008

4 School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

Abstract: In recent years, the interaction between aerosols and thunderstorm electrification has emerged as a focal point in academic research. Homogeneous nucleation of soluble aerosol droplets and heterogeneous nucleation of ice nuclei are two primary sources for ice crystal formation. The size and concentration of ice crystals in thunderstorms significantly influence charge generation and distribution, and are critical factors in lightning events. This paper employs a three-dimensional thunderstorm model to investigate the impact

^{*} 国家自然科学基金重点项目(42030606)、中国气象局雷电重点开放实验室开放课题(2024KELL-A004)和浙江省自然科学基金联合基金项目(LZJMJ224D050009)共同资助

2024 年 7 月 23 日收稿; 2025 年 4 月 3 日收修定稿

第一作者:师正,主要从事大气电学、雷电物理学研究. E-mail:gyshiz@126.com

of three distinct ice nucleation schemes on lightning discharge characteristics, focusing on a mountain weak thunderstorm case. The results demonstrate that homogeneous nucleation generates a substantial number of ice crystals in the low-temperature zones at the cloud top, resulting in prolonged discharge duration within the thunderstorm. The charge structure is predominantly dipolar, with a lower lightning frequency, primarily consisting of cloud flashes originating from higher altitudes. In contrast, heterogeneous nucleation forms ice crystals in high-temperature zones, leading to an earlier charging process in thunderstorms. Ice crystals in these zones readily meet charge reversal conditions, significantly increasing the negative non-inductive charging rate and favoring the formation of tripolar charge structures. Under these conditions, lightning occurs earlier and initiates from relatively lower altitudes, with heterogeneous nucleation facilitating lightning occurrence. When both homogeneous and heterogeneous nucleation processes occur simultaneously, the thunderstorm charging process intensifies, resulting in a high lightning frequency. Furthermore, both nucleation processes advance the initial lightning occurrence time and expand the height range of the initial lightning trigger points. The tripolar charge structure promotes the occurrence of a substantial number of negative cloud-to-ground flashes.

Key words: nucleation process, homogeneous nucleation, heterogeneous nucleation, lightning frequency, numerical simulation

引 言

气溶胶与云、雾、降水的相互耦合作用一直是大气科学领域的核心问题之一,而起、放电过程作为雷暴云动力-微物理过程的产物之一,其与气溶胶的关系日益受到重视。可溶气溶胶液滴的同质核化和冰核异质核化是冰晶粒子形成的两种来源,而雷暴云中冰晶粒子微物理特征对电荷的产生及其分层状况有一定影响,是导致闪电发生的重要因素之一。

可溶性气溶胶液滴的同质核化或是在大气冰核帮助下完成的异质核化,是云中冰晶粒子形成的重要来源(Pruppacher and Klett, 1997; Koop et al, 2000; Liu and Penner, 2005; DeMott et al, 2010),因此,不同核化过程可能通过改变冰晶粒子特征影响雷暴电过程。由于目前对云微物理发展过程的观测手段比较有限,人们主要基于云模式进行冰晶核化过程对雷暴云电过程影响的研究,而且主要集中在研究大气冰核对雷暴动力、微物理及起电过程的作用上。例如,李泽宇等(2016)基于一维半云和气溶胶分档云模式,对不同初始沙尘浓度的非感应起电过程进行了敏感性试验,模拟结果表明:随着沙尘粒子数浓度的增多,云中冰晶粒子与霰粒子的数浓度都有所增加,初始起电时间提前,空间电荷密度大小增加。苏正军等(2010)基于催化剂检测试验的时间特征数据,对核化速率进行了深入研究,发现同一样

品在不同温度下的动态特性呈现出显著差异:在低温区间(低于 -16°C),冰晶的形成是一个快速过程,其主要特征包括凝结冻结核化与凝华核化;相比之下,在较高温度区间(不低于 -12°C),冰晶的形成则主要由慢速过程主导,这一过程涉及接触核化与浸入核化机制。李璐滢等(2021)基于二维雷暴云模式,引入一种新型冰晶异质核化方案,揭示了不同的异质核化过程对雷暴电过程的影响,结果表明:浸润核化是冰晶生成的最重要异质核化过程,较高数浓度的冰晶消耗雷暴云内液态水含量,抑制淞附过程,导致霰粒子比含水量低,表现为较强的负极性非感应起电率;接触核化生成的冰晶量最少,仅对雷暴云中下层 3~5 km 处的冰晶有贡献,同时霰粒子数浓度较低,导致该方案下的起电过程最弱;沉积核化主要影响云砧处的冰晶,有利于提高霰收集云滴的效率,表现为极高的霰粒子比含水量,促进低温区非感应起电过程的发生。师正等(2023)研究了大气冰核浓度对雷暴云动力、微物理及空间电荷结构的影响,结果表明:大气冰核浓度提升有利于异质核化过程增强,冰晶在高温区大量生成,而同质核化过程被抑制,因此冰晶整体含量降低,引起低温区中霰粒子含量降低和高温区中霰粒子尺度降低。不同大气冰核浓度下的雷暴云空间电荷结构在雷暴云发展初期均呈现负的偶极性电荷结构。在雷暴云旺盛期,随着冰核浓度增加,空间电荷结构由三极性转变为复杂四极性。在雷暴云消散阶段,电荷结构均呈现偶极

性,且电荷密度值随着冰核浓度的增加逐渐减小。

此外,科技进步促使多种观测技术被应用于雷暴活动过程的深入研究中。王婷波等(2020)依据国家闪电监测网络提供的云地闪电定位数据,对我国中东部地区的雷暴发生及其发展特性进行了统计分析。张萍萍等(2021)借助 FY-4A 闪电成像仪,有效地捕捉到了对流系统的发展演变特征。阮悦等(2022)在研究中整合了 VLF/LF 三维闪电监测数据、S 波段双偏振雷达观测以及地面观测资料,揭示出在冰雹云的成熟阶段,云闪频率达到最高,而在其发展阶段则相对较低。大量的实际观测结果以及模式研究工作揭示雷暴云闪电活动特征与空间电荷结构密切相关。例如,通过对日本冬季雷暴的观测,Takeuti et al(1978)和 Brook et al(1982)发现正地闪始发时,空间电荷结构均为偶极型。Carey and Rutledge(1998)发现云底部分出现足够大的负电荷堆有利于正地闪的形成。而冰雹云之所以能够生成大量的正地闪,可能与云中的反三极电荷结构有关(张义军等,2006);对于负地闪而言,底部的次正电荷中心则是个关键(Clarence and Malan, 1957; Williams, 1989; Tan et al, 2014a)。底部次正电荷区足够大时,将容易产生反极性云闪(张义军等, 2002; 郅秀书等, 2005; Tan et al, 2014a)。闪电发生类别及地闪接地点的选择都受雷暴云电环境特征影响(Tan et al, 2012; Tan et al, 2014b)。雷暴云内不同核化过程对起电过程和空间电荷结构产生重要影响,而空间电荷结构又与放电过程息息相关,因此不同核化过程可能对雷暴云闪电活动特征产生重要影响。但目前仅有 Gonçalves et al(2012)基于区域模式研究了细菌性冰核浓度对雷暴云微物理、降水及闪电发生率的作用,发现细菌性冰核会使对流云中的冰晶离子浓度增加,从而使闪电频率增加,总降水量减少。但其放电结果仅基于简单计算的经验公式,并未揭示其中详细的微物理和起电过程。

综上所述,冰晶核化过程对雷暴云起电过程存在影响,但不同核化过程和放电过程关系的研究很少。因此,为了全面了解冰晶核化过程影响雷暴云放电过程的物理原因,有必要开展相应的模式研究。本研究拟在已有的雷暴云三维随机起、放电模式基础上,将同质核化与异质核化参数化方案植入模式中,探讨不同核化方式对雷暴云放电特征的影响,并给出合理性解释。

1 模式介绍及初始场设置

本文所采用的云模式是中国气象科学研究院开发的云模式框架(胡志晋和何观芳,1987;王谦和胡志晋,1990;于达维等,2001)。在此基础上,谭涌波(2006)对 Mansell et al(2002)提出的随机放电参数化方案进行了改进,建立了包含雷暴云起、放电参数化方案的三维雷暴云-电耦合模式。该模型视大气为无黏性的可压缩流体,采用非静力平衡的假设。模型涵盖云滴、雨滴、冰晶、霰和雹共 5 种水成物粒子,包含了 22 个预测变量和 5 个诊断变量,其涉及水成物的物理特性、空间总电荷密度、电位及电场强度等电过程的关键参数。下文将对模式采用的主要参数化方案进行简要介绍。

1.1 冰晶核化方案

迄今为止,雷暴云起、放电的模式中往往采用相对简单的经验公式来计算冰晶核化过程。例如,计算冰晶的核化率时往往采用一种与温度或相对于水的过饱和度相关的经验公式(Fletcher 1962; Cooper 1980; Meyers et al, 1992),其具有计算方便的优势,但由于不考虑冰核类型和具体核化物理过程,无法表征真实自然界中大气冰核浓度、时空分布和类型上的变化。想要合理地再现雷暴云起、放电过程必须以正确描述冰晶微物理特征为基础,因此,在雷暴云起、放电模式中完善冰晶核化过程十分重要。

本文引入了 Koop and Murray(2016)改进的同质核化方案,通过研究特定温度下界面自由能的变化,确定相应的同质核化速率。直径为 $10\text{ }\mu\text{m}$ 的液滴在 -35°C 的环境温度下需经过数小时才能冻结,而当低至 -38°C 后冻结仅需数秒时间,因此 -38°C 被认定为同质核化阈值(Liu et al, 2005)。但环境温度低于阈值时,同质核化并不是必然发生,因为临界分子簇的形成具有随机性,冻结概率的高低取决于液滴体积和冻结持续时间(Knopf et al, 2020)。模式中同质核化的计算基于经典成核理论,过冷液滴的同质核化速率取决于特定温度下界面自由能的变化。同时,为减少误差,低于 -45°C 时,所有液滴被处理为完全冻结,起始冻结温度定为 -32°C 。具体参数化方案见师正等(2023)。

本文在模式中植入了 Diehl and Grützun(2018)提出的冰晶异质核化方案,将异质核分为接触核、浸

润核和沉积核三种,综合考虑了各种不溶性气溶胶的核化特性,其中接触冻结核化通常是指干燥的气溶胶颗粒与液滴碰并冻结的过程。方案重点考虑:(1)环境温度低于冻结温度;(2)冰核与过冷液滴相互碰并;(3)作为冰核的气溶胶粒子为干燥状态。浸润冻结核化的温度与液滴体积存在正比的关系。根据随机假设,不可溶气溶胶表面成核时更低的能量势垒加速了液滴内分子簇的形成,提高了核化率,更大体积的液滴能捕获浸润核的概率也会增加。沉积核化与冰面过饱和度密切相关,冰面过饱和度的增加可有效提高冰核活化率。三种异质核化方案详见李璐滢等(2021)。

1.2 电过程参数化方案

模式中综合考虑了非感应起电过程和感应起电过程。霰(雹)与冰晶(雪晶)碰并回弹产生的非感应起电参数化方案采用 GZ(Gardiner/Ziegler)方案(Gardiner et al,1985;Ziegler et al,1991;Shi et al,2015);感应起电过程考虑霰(雹)和云滴之间的碰撞分离,其方案基于 Ziegler et al(1991)的方案。

本文采用的随机放电参数化方案基于谭涌波(2006)的方案。当空间电场值达到逃逸击穿区域内电场阈值(随高度变化)或模式中任何位置的电场强度超过常规的空气击穿阈值($160 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$)时,闪电启动;通道的随机演变过程采用了 Mansell et al(2005)提出的方法,这种方法强调闪电通道的逐步发展,即每次正、负通道各自仅扩展至一个后继的通道点。地闪发生时,通道会把地面电位引到云内,从而导致强烈的后续放电过程。为了更加合理地模拟地闪放电过程以及云内后续放电,在模式中限制了后续放电的次数(小于 5 次)。为了限制雷暴云中电荷的过量累积,假定每次放电结束后空间电荷减小至原来的 70%。

1.3 模式启动条件

在对流云数值模式中,通常采用两种方法在水平均匀的环境场中触发对流过程。一种方法适用于由动力抬升机制引发的对流过程,称为冷空气出流辐合启动机制;另一种为热力扰动启动机制。本研究采取后者,并在其基础上考虑湿度扰动因素,在模式域的下层施加一个范围有限的湿热扰动场,其湿度和温度均高于周边环境,并利用垂直运动方程中的浮力项来初始化对流。模式中采用轴对称形式的

椭球体扰动函数:

$$\theta = \theta_0 + \Delta\theta \cdot \cos^2\left(\frac{\pi}{2}\beta\right) \quad (1)$$

$$q_v = q_{v0} + (q_{vs} - q_v) \cos^2\left(\frac{\pi}{2}\beta\right) \quad (2)$$

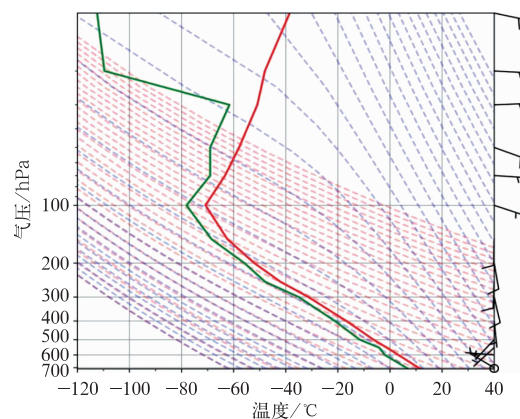
式中: θ 为位温, θ_0 为初始位温扰动(设定为 2.5 K), $\Delta\theta$ 为中心最大扰动位温, q_v 为比湿, q_{v0} 为初始湿度扰动(设定为 80%), q_{vs} 为考虑了位温扰动后的饱和比湿。

$$\beta = \left(\frac{x - x_c}{x_r}\right)^2 + \left(\frac{y - y_c}{y_r}\right)^2 \quad (3)$$

式中: x, y 为所求目标格点的空间位置; x_c, y_c 为扰动场的中心坐标; x_r, y_r 分别为扰动场在两个坐标方向的半径。

1.4 初始场

本文采用 1999 年 7 月 23 日美国新墨西哥州发生的一次山地雷暴云电过程作为模拟个例(王宁宁,2012;Shi et al,2015;2016;Tan et al,2017)。该个例的探空数据如图 1 所示,大气探测数据源于 NCEP 再分析资料。本次模拟的雷暴为山地弱雷暴,初始地面温度约为 12°C ,初始露点温度约为 8°C 。 0°C 层位于约 550 hPa 的高度。模拟总时长为 90 min,时间步长为 2 s。为了探讨大气冰核不同核化方案对放电过程造成的影响,本文进行了三组敏感性模拟试



注:红色实线表示环境温度,绿色实线表示露点温度,背景蓝色虚线为假绝热线,红色虚线为干绝热线,紫色虚线为蓝色虚线与红色虚线重叠部分,抬升凝结高度为 652.51 hPa。

图 1 1999 年 7 月 23 日美国新墨西哥州发生的一次山地雷暴个例的 T - $\ln p$ 图和风场(风羽)
Fig. 1 The T - $\ln p$ chart and wind field (barb) of the mountain thunderstorm case in New Mexico, USA on 23 July 1999

验,分别为:仅考虑同质核化过程(Ho 方案)、仅考虑异质核化过程(He 方案)以及同时考虑同质核化和异质核化过程(Co 方案)。

2 模拟结果

表 1 给出了三种方案中闪电(包括正、负地闪和云闪)频次,可见,Ho 方案发生闪电的频次最少,Co 方案发生闪电频次最多。

表 1 三种方案的闪电放电频次(单位:次)

Table 1 Frequency of lightning discharges in three schemes (unit: number)

闪电类型		Ho 方案	He 方案	Co 方案
地闪	正地闪	1	6	0
	负地闪	0	4	107
云闪		41	148	185

图 2 给出了不同方案下闪电放电频次随时间的变化。Ho 方案的首次云闪出现在第 24 min,唯一一次地闪为正地闪,发生在第 25 min。云闪活动在第 27 min 达到峰值(1 min 内发生了 21 次),最后一

次闪电活动记录出现在第 51 min。He 方案的首次云闪出现在第 19 min,闪电活动最频繁的时间点为第 23 min,1 min 内记录了 46 次云闪,最后一次云闪发生在第 31 min。地闪活动多于第 22 min 时发生,1 min 内集中发生了 6 次正地闪,3 次负地闪。Co 方案中,云闪在第 19 min 首次出现,于第 23 min 和 27 min 分别记录了 41 次和 42 次云闪。此外,从第 22 min 开始观测到负地闪,在第 30 min 和 35 min,负地闪活动尤为频繁,分别达到了 48 次和 58 次。通过对比分析可知:He 和 Co 方案的闪电活动发生时间相比 Ho 方案要早,因此异质核化可能有助于闪电的提前发生。在 Ho 和 He 方案中,云闪的发生频次显著高于地闪,而在 Co 方案中,地闪的次数则显著增加,且均为负地闪。这表明当同质核化与异质核化同时发生时,会促使地闪频率上升。

为了揭示不同核化过程对闪电始发点高度的影响,图 3 展示了三种方案不同时间的闪电始发点高度。由图 3 可见,Ho 方案中闪电始发点高度最高,主要分布在 6~8 km 高度范围内。其中,第 25 min 时正地闪的始发点位于 6.5 km 的高度;而云闪则主

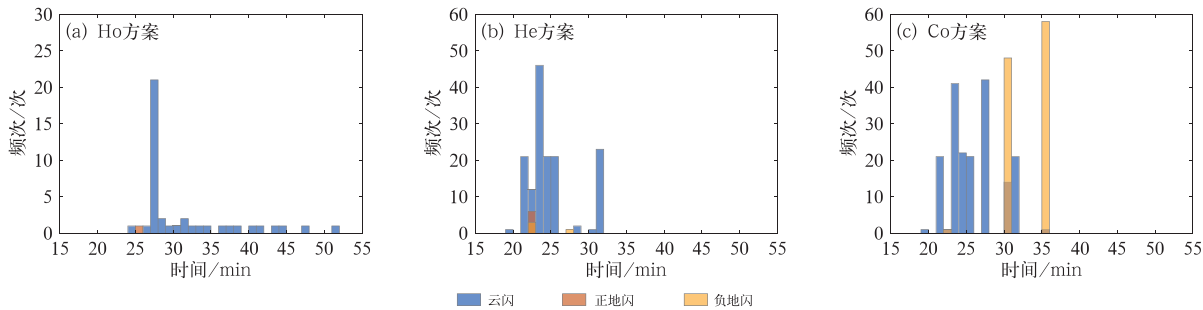


图 2 三种方案下闪电放电频次随时间的分布

Fig. 2 Lightning discharge frequency with time in three schemes

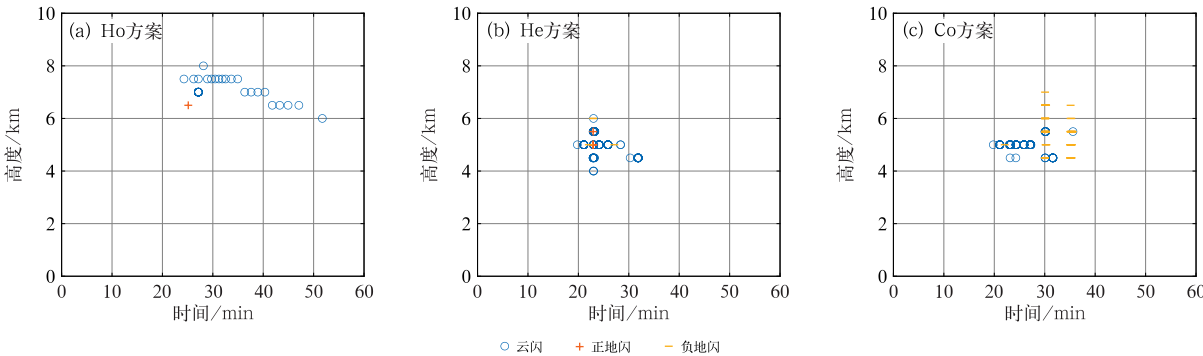


图 3 三种方案下闪电的始发点位置

Fig. 3 Initiation points of lightning in three schemes

要发生在第 24~51 min 内,其始发点最高和最低高度分别位于 8 km 和 6 km,在 7.5 km 的高度上记录了 24 次云闪事件。He 方案的闪电始发点主要集中在 4~6 km 的高度,其中,5 km 高度上闪电最频繁,在此高度上共发生了 5 次正地闪、2 次负地闪和高达 72 次的云闪。10 次地闪活动均发生在第 22~27 min 内,其始发点主要在 5~6 km;而在第 19~31 min 内共发生了 148 次云闪,其始发点高度则在 4~6 km。Co 方案共发生了 107 次负地闪,其始发点最高和最低高度分别位于 7 km 和 4.5 km,时间范围为第 22~35 min。此外,该方案中还记录了 185 次云闪,主要集中在 4.5~5.5 km 的高度,发生时间在第 19~35 min。Co 方案有 3 个地闪的频发高度:在 4.5、5.5、6.5 km 处分别发生了 29、39、14 次;而其云闪最频发的高度则是 5 km,总计发生了 147 次。此外,Co 方案闪电始发高度的垂直分布最宽广。

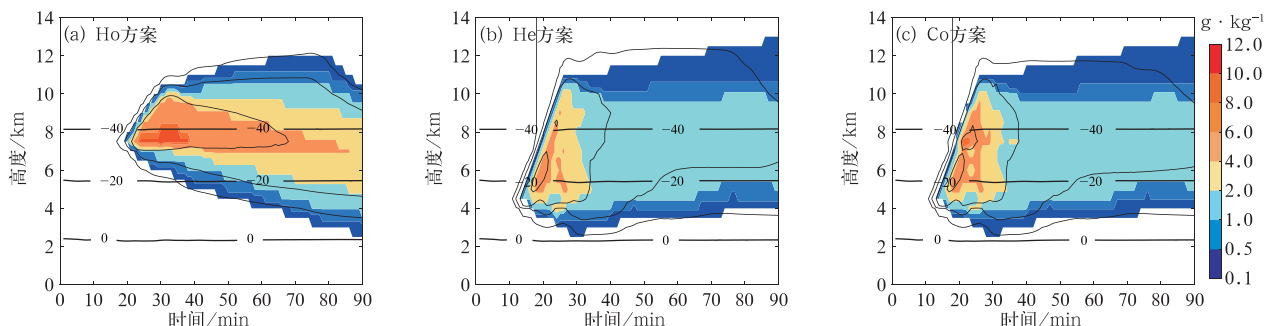
综上所述,仅考虑同质核化,雷暴云中产生大量云闪,云闪始发点高度相对高(6~8 km),放电持续时间长。当仅考虑异质核化时,闪电发生的时间提前,闪电始发点高度分布在 4~6 km。当同时考虑两种核化过程,雷暴云中放电提前,同时产生大量地闪,闪电始发点高度在 4.5~7 km。

3 讨论分析

不同核化过程决定了初始冰晶的含量与分布,并且影响雷暴云微物理特征。图 4 为冰晶最大混合比和数浓度的时间-高度分布,从图中可以看出 Ho 方案中冰晶从第 20 min 左右开始产生,混合比大于

$0.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的冰晶主要集中在 6~9 km,为云中的低温区(低于 -20°C),与 Alizadeh-Choobari and Gharaylou(2017)的研究结果类似,且冰晶的分布较为稳定,整体来看,随着时间的推移 Ho 方案的冰晶受重力作用逐步下沉。He 方案冰晶产生的时间要早于 Ho 方案,冰晶的混合比明显小于 Ho 方案,并且中心位置明显低于 Ho 方案,这与 Shi and Tan (2014)的研究相吻合:同质核化主要发生于云顶低温区,而异质核化主要发生在高温区。Co 方案的冰晶最大混合比的分布情况整体与 He 方案相似,但是其冰晶混合比大于 $4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的范围更广,高温区冰晶是异质核化产生,而低温区冰晶源于同质核化过程,但上层冰晶存在的时间明显短于 Ho 方案,可以证明异质核化的存在明显抑制了同质核化。

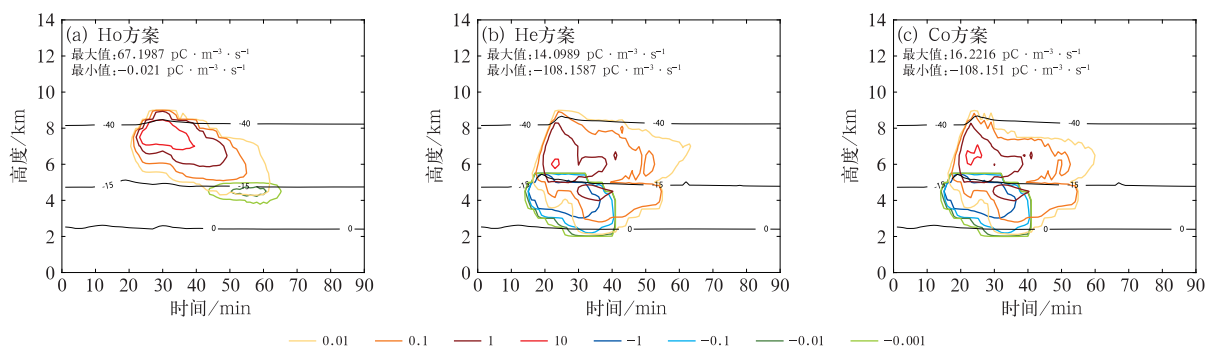
雷暴闪电放电特征与空间雷暴云电荷结构息息相关。因此,为了解释不同核化过程对闪电放电特征影响的物理原因,本文首先给出了不同方案的起电过程的演变特征。非感应起电目前被认为是雷暴云内最重要的起电过程,其产生原理为霰粒子和冰晶粒子碰撞引起的电荷分离。图 5 给出了三种方案下非感应起电率随时间的变化,这代表了冰晶荷电情况。从图中可以看出 Ho 方案的正非感应起电率最大($67.1987 \text{ pC} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$),这是因为云顶高度附近(7~9 km)高处同质核化生成大量的小尺度冰晶,这些小冰晶与霰粒子产生碰撞分离形成非感应起电过程。这与 Shi et al(2024)的模拟结果是一致的。由于温湿条件在雷暴云不同高度上存在差异,冰粒子在不同温湿条件下所带的电荷极性不同。当温度低于反转温度(-15°C)时,霰粒子荷为负电,而冰晶粒子荷为正电。随着大量冰晶低于反转温度,



注:黑色粗实线为 -40 、 -20 、 0°C 等温线,下同;冰晶数浓度等值线自外至内分别为: 10^4 、 10^5 、 10^6 、 10^7 个 $\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

图 4 三种方案下冰晶最大混合比(填色)和最大数浓度(等值线)随时间的变化

Fig. 4 Temporal variation of maximum ice crystal mixing ratio (colored) and maximum number concentration (contour) in three schemes

图 5 三种方案下非感应起电率随时间的变化(单位: $\text{pC} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$)Fig. 5 Temporal variation of the non-inductive charging rate in three schemes (unit: $\text{pC} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$)

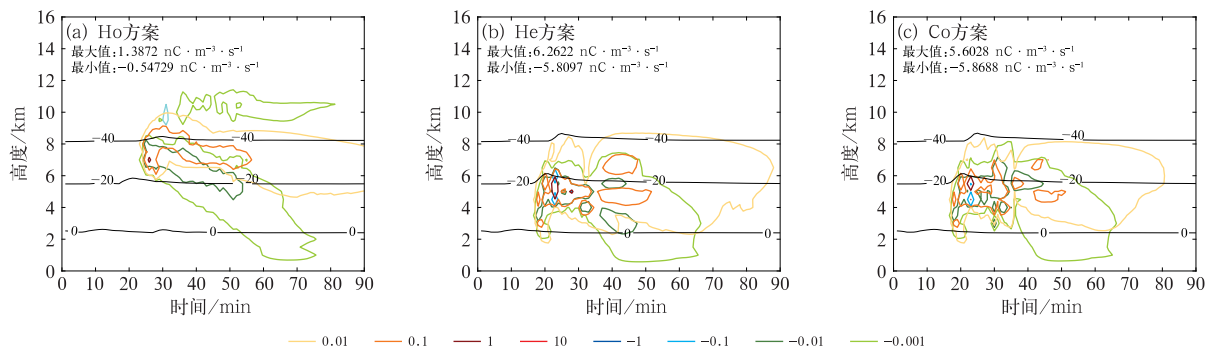
且云水含量大于 $0.1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 时,粒子荷电情况发生了反转,变成霰粒子带正电,而冰晶粒子带负电。此外,随着雷暴进一步发展,云水含量减少至 $0.1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 以下后,电荷的转移不再满足反转条件,冰晶在 -15°C 以下依旧带正电(图 4b, 4c)。He 方案的正非感应起电率的最大值为 $14.0989 \text{ pC} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$, 负非感应起电率的最大绝对值为 $108.1587 \text{ pC} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$, Co 方案与 He 方案相似:正非感应起电率的最大值为 $16.2216 \text{ pC} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$, 负非感应起电率的最大绝对值为 $108.151 \text{ pC} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ 。这表明异质核化在高温区产生的冰晶对负非感应起电贡献作用明显,结果与 Shi et al(2024)相同。

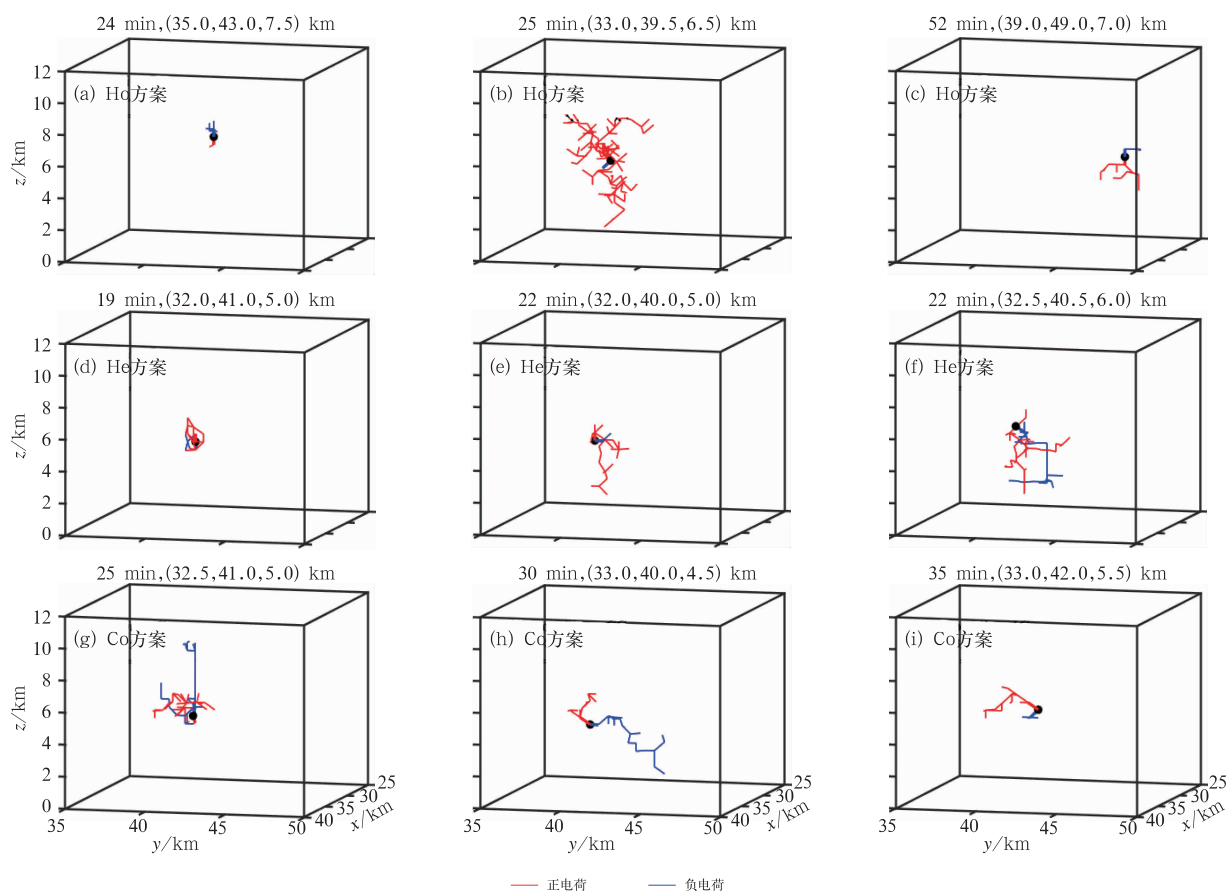
本文所使用的三维雷暴云模式涉及到多种水成物粒子的物理变化过程及起、放电过程,其中雷暴空间电荷结构对放电特征作用明显。本文假定闪电下行先导通道发展到距地面 1 km 处即发生地闪(谭涌波, 2006)。图 6 给出了雷暴云内空间电荷结构的演变特征,取正、负电荷密度各自的极大值。

Ho 方案整体上是偶极性电荷结构,持续时间

最久,正电荷区的位置是三个方案中最高的(8 km 左右),并且主正电荷区的电荷量更大,在雷暴发展旺盛的时期负电荷区表现出下沉的趋势,主负电荷区的中心位于 $5 \sim 8 \text{ km}$ 处(图 6a)。这种现象可能是由于雷暴云发生了贝吉龙过程,即当云层伸展到过冷区,其中存在的大量过冷水滴将通过同质核化产生冰晶粒子并抑制云滴形成。因此 Ho 方案中的闪电始发点普遍较高。如图 7a 所示,当雷暴发展至第 24 min 时,偶极性电荷结构背景下,雷暴云中首次发生云闪,其高度为 7.5 km 。此外, Ho 方案中雷暴在第 25 min 时偶极性电荷结构背景下发生了一次正地闪,正先导穿过雷暴中下部的负电荷堆接地(图 7b)。第 52 min 时,雷暴处于消散阶段,此时雷暴电荷结构仍然为偶极性电荷结构,但其高度有所下降,此时云闪起始高度为 7 km 高度附近(图 7c)。

He 方案中,异质核化导致更早的起电过程,雷暴云在前 40 min 主要呈现出偶极性和三极性电荷结构(图 6b)。此方案首次放电的时间为第 19 min , 此时云闪起始于主正电荷堆与主负电荷堆之间,约

图 6 三种方案下电荷密度极值垂直结构随时间的变化(单位: $\text{nC} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$)Fig. 6 Temporal variation of charge density extremes in vertical structure in three schemes (unit: $\text{nC} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$)



注:图上方文字为触发时间和触发位置。

图 7 三种方案下不同类型闪电的三维通道结构
(a, d, g)首次云闪, (b, e, h)正地闪, (c, f, i)末次云闪

Fig. 7 Three-dimensional channel structures of different types of lightning for three schemes
(a, d, g) first cloud flash, (b, e, h) positive cloud-to-ground flash, (c, f, i) last cloud flash

为 5 km 高度处(图 7d)。在偶极性电荷结构背景下,正电荷堆和负电荷堆之间产生正地闪,其正先导穿过负电荷堆后接地(图 7e)。此外,在第 22 min 时电荷结构演变为三极型电荷结构,负先导穿过底部次正电荷堆接地(图 7f)。随后,随着雷暴进一步发展,雷暴空间电荷结构逐渐演变为偶极性,闪电以云闪为主。

Co 方案中,异质核化促进起电过程提前出现,同时出现两种核化过程导致雷暴起电量更强(相对于 Ho 和 He 方案)(图 6c),Co 方案同样以云闪开始,此时雷暴云电荷结构以偶极性为主,电荷量强,云闪的正负通道更长(图 7g)。在第 30 min 时雷暴电荷结构演变为三极性,负地闪起始于主负电荷堆与次正电荷堆之间(图 7h)。随后,雷暴电荷结构变为偶极性,闪电以云闪为主(图 7i)。如前文所述, Ho 和 He 方案中的正地闪是在偶极性电荷结构下

产生的。由图 6b 和图 7e 可见,在 He 方案中,下行的正先导穿过底部的主负电荷堆后接地。而在 Co 方案中,电荷结构以三极性电荷结构为主。由图 6c 可以看到,此时中部的主负电荷堆最大电荷量明显高于上部的主正电荷堆。结合图 3c 可以发现,部分负地闪起始于主正电荷堆与主负电荷堆之间,此时正极性先导仅限于在负电荷堆内部移动,而负极性先导不仅横向穿越正电荷堆传播到远处,还能抵达地面形成负地闪。因此,Co 方案中负地闪活动的次数显著增加。

4 结论与讨论

本文利用三维雷暴云电耦合模式,选取一次山地弱雷暴个例,研究了三种冰晶核化过程对雷暴云放电特征的影响,探讨了不同核化过程对雷暴云的

动力学、微物理过程及电过程的作用。分析结果如下:

(1)同质核化主要发生于云顶低温区,雷暴云通过发生贝吉龙过程,使其中存在的过冷水滴产生大量冰晶粒子并抑制云滴形成。当温度低于反转温度(-15°C)且云水含量低于 $0.1\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 时,冰晶粒子为正电荷。因此,该方案下正电荷区的位置最高,且主正电荷区的电荷量更大,雷暴云易呈现出偶极性电荷结构,并且持续时间较长。故仅考虑同质核化时,雷暴云中产生大量云闪,云闪始发点高度相对较高,且放电持续时间长。

(2)由于异质核化主要发生在雷暴云中高温区,导致更早的起电过程,且产生的冰晶中心位置也较低。随着大量冰晶低于反转温度,且云水含量大于 $0.1\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 时,粒子荷电极性发生反转,霰粒子带正电,而冰晶粒子带负电。随着雷暴进一步发展,云水含量减少至 $0.1\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以下后,电荷的转移不再满足反转条件,冰晶在 -15°C 以下依旧带正电,导致雷暴云易呈现出三极性到偶极性电荷结构的转变。此外,仅考虑异质核化时,闪电发生的时间提前,闪电始发点高度相对较低,同时偶极性电荷结构背景下促进了正地闪的发生。

(3)当两种核化过程同时发生时,雷暴冰晶空间分布与仅考虑异质核化过程相似,但冰晶含量更高,其导致雷暴起电量更强(相对于仅发生同质核化和仅发生异质核化)。同时考虑两种核化过程时,雷暴云中放电提前,闪电频次最大。同时,雷暴三极型电荷结构背景下主负电荷堆和次正电荷堆之间产生了大量负地闪。该方案中闪电不仅可触发于高温区的主负电荷堆和次正电荷堆之间,而且可以触发于低温区的主正电荷堆和主负电荷堆之间,因此闪电始发点高度范围更大。

近年来,随着对对流云中冰晶的观测和理论研究得到发展,人们对云中冰晶生成过程的认识得到了深化,从而有效揭示了冰晶在云微物理和降水过程的作用。次生冰晶产生于冰晶繁生过程中,例如霰粒子碰撞小水滴后产生冰晶碎片,这些冰晶碎片随后和其他过冷水滴相互作用,使得云内冰晶数浓度不断增加。冰晶繁生过程在对流云中尤为重要,是导致对流云内冰晶数浓度快速增加的最重要原因。那么,对流云中的冰晶繁生是否也会影响雷暴云的起、放电过程?不同的冰晶繁生过程对雷暴云起电过程、空间电荷结构影响如何?目前,这类问题

还缺乏深入的探讨,而相应的研究工作也鲜有报道。未来将致力于研究冰晶繁生过程对雷暴云起电过程和空间电荷结构的影响,为雷电预警技术的改善提供重要的理论基础。

此外,本文为了对比同质核化和异质核化过程对雷暴放电特征的作用,综合考虑了接触核化、浸润核化和沉积核化三种异质核化过程,并且与异质核化相关的气溶胶浓度设置也相对高,这可能会导致异质核化作用加强。然而,需指出的是,不同学者通过野外观测以及室内试验的方法得到不同条件下冰核浓度过冷却谱经验公式,其往往表征气溶胶中一种机制或者两种成核机制下冰核浓度,这些经验公式也被许多模式所使用(Fletcher, 1962; Cooper, 1980; Meyers et al, 1992)。这主要由于不同地区的大气冰核特征具有显著差异,其大气环境与核化方式也有所差异,本文综合考虑三种异质核化过程,为一种理想状态的数值模拟研究。着重探讨不同核化过程对放电过程产生的不同影响,虽然模拟结果可能不能完全表征实际雷暴中的闪电活动特征,但不同核化过程对雷暴放电过程影响机制可能具有重要研究价值。同时,我们也认识到,为了更加准确地反映真实情况,未来研究应进一步优化模拟参数化方案,并尽可能采用观测事实对模拟结果进行验证。

参考文献

- 胡志晋,何观芳,1987. 积雨云微物理过程的数值模拟——(一)微物理模式[J]. 气象学报, 45(4): 467-484. Hu Z J, He G F, 1987. Numerical simulation of microprocesses in cumulonimbus clouds—I microphysical model[J]. Acta Meteor Sin, 45(4): 467-484(in Chinese).
- 李璐滢,师正,谭涌波,等,2021. 冰晶异质核化对雷暴云电过程影响的数值模拟[J]. 热带气象学报, 37(3): 468-477. Li L Y, Shi Z, Tan Y B, et al, 2021. Numerical simulation of effects of heterogeneous nucleation on microphysical process and electrification in thunderstorms[J]. J Trop Meteor, 37(3): 468-477(in Chinese).
- 李泽宇,孙继明,牛生杰,2016. 沙尘冰核对积云起电过程影响的初步数值模拟试验[J]. 气候与环境研究, 21(1): 107-120. Li Z Y, Sun J M, Niu S J, 2016. Preliminary modelling for the effects of dust on the cumulus electrification process[J]. Climatic Environ Res, 21(1): 107-120(in Chinese).
- 郅秀书,张义军,张其林,2005. 闪电放电特征和雷暴电荷结构研究[J]. 气象学报, 63(5): 646-658. Qie X S, Zhang Y J, Zhang Q L, 2005. Study on the characteristics of lightning discharges and the electric structure of thunderstorm[J]. Acta Meteor Sin, 63(5): 646-658(in Chinese).
- 阮悦,黄慧琳,魏鸣,等,2022. 福建冰雹云三维闪电及双偏振雷达回

- 波特特征分析[J]. 气象, 48(4):442-451. Ruan Y, Huang H L, Wei M, et al, 2022. Analysis of three dimensional lightning and dual-polarization radar echo characteristics of hail cloud over Fujian [J]. Meteor Mon, 48(4):442-451(in Chinese).
- 师正, 管啸林, 林晓彤, 等, 2023. 大气冰核对雷暴云电过程影响的数值模拟[J]. 大气科学, 47(1):20-33. Shi Z, Guan X L, Lin X T, et al, 2023. Numerical simulation on the effect of ice nuclei on the electrification process of thunderstorms[J]. Chin J Atmos Sci, 47(1):20-33(in Chinese).
- 苏正军, 郑国光, 关立友, 2010. 人工冰核的核化速率实验[J]. 气象, 36(11):46-49. Su Z J, Zheng G G, Guan L Y, 2010. Experimental study on nucleation rate of artificial ice nuclei[J]. Meteor Mon, 36(11):46-49(in Chinese).
- 谭涌波, 2006. 闪电放电与雷暴云电荷、电位分布相互关系的数值模拟[D]. 合肥: 中国科技大学: 173. Tan Y B, 2006. Numerical simulation of the relationship of the lightning discharge with the space charge and potential distribution in thundercloud [D]. Hefei: University of Science and Technology of China: 173(in Chinese).
- 王宁宁, 2012. 气溶胶对雷暴云电荷结构影响的数值模拟研究[D]. 南京: 南京信息工程大学: 73. Wang N N, 2012. Numerical simulation of the effects of the aerosol on thunderstorm cloud charge structure[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology: 73(in Chinese).
- 王谦, 胡志晋, 1990. 三维弹性大气模式和实测强风暴的模拟[J]. 气象学报, 48(1):91-101. Wang Q, Hu Z J, 1990. Three-dimensional elastic atmospheric numerical model and the simulations of a severe storm case[J]. Acta Meteor Sin, 48(1):91-101(in Chinese).
- 王婷波, 周康辉, 郑永光, 2020. 我国中东部雷暴活动特征分析[J]. 气象, 46(2):189-199. Wang T B, Zhou K H, Zheng Y G, 2020. Statistic analysis of thunderstorm characteristics in central and eastern China[J]. Meteor Mon, 46(2):189-199(in Chinese).
- 于达维, 何观芳, 周勇, 等, 2001. 三维对流云催化模式及其外场试用[J]. 应用气象学报, 12(S1):122-132. Yu D W, He G F, Zhou Y, et al, 2001. Three-dimensional convective cloud seeding model and its field application[J]. Quart J Appl Meteor, 12(S1):122-132(in Chinese).
- 张萍萍, 刘文婷, 章翠红, 等, 2021. 一次强降水过程中 FY-4A 闪电成像仪观测特征分析[J]. 气象, 47(11):1391-1401. Zhang P P, Liu W T, Zhang C H, et al, 2021. Observation characteristics of FY-4A lightning mapping imager during a severe rainfall[J]. Meteor Mon, 47(11):1391-1401(in Chinese).
- 张义军, Krehbiel P R, 刘欣生, 2002. 雷暴中的反极性放电和电荷结构[J]. 科学通报, 47(15):1192-1195. Zhang Y J, Krehbiel P R, Liu X S, 2002. Reverse polarity discharges and charge structure in thunderstorms[J]. Chin Sci Bull, 47(15):1192-1195(in Chinese).
- 张义军, 孟青, Krehbiel P R, 等, 2006. 正地闪发展的时空结构特征与闪电双向先导[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 36(1):98-108. Zhang Y J, Meng Q, Krehbiel P R, et al, 2006. Temporal and spatial structural features of positive ground flash development with lightning bi-directional precursors[J]. Sci Sin(Terrae), 36(1):98-108(in Chinese).
- Alizadeh-Chooabari O, Gharaylou M, 2017. Aerosol impacts on radiative and microphysical properties of clouds and precipitation formation[J]. Atmos Res, 185:53-64.
- Brook M, Nakano M, Krehbiel P, et al, 1982. The electrical structure of the Hokuriku winter thunderstorms [J]. J Geophys Res Oceans, 87(C2):1207-1215.
- Carey L D, Rutledge S A, 1998. Electrical and multiparameter radar observations of a severe hailstorm[J]. J Geophys Res Atmos, 103(D12):13979-14000.
- Clarence N D, Malan D J, 1957. Preliminary discharge processes in lightning flashes to ground[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 83(356):161-172.
- Cooper W A, 1980. A method of detecting contact ice nuclei using filter samples [C] // Eighth International Conference on Cloud Physics. Clermont-Ferrand: 665-668.
- DeMott P J, Prenni A J, Liu X, et al, 2010. Predicting global atmospheric ice nuclei distributions and their impacts on climate[J]. Proc Natl Acad Sci USA, 107(25):11217-11222.
- Diehl K, Grützun V, 2018. Model simulations with COSMO-SPECS: impact of heterogeneous freezing modes and ice nucleating particle types on ice formation and precipitation in a deep convective cloud[J]. Atmos Chem Phys, 18(5):3619-3639.
- Fletcher N H, 1962. The Physics of Rainclouds [M]. Cambridge: Cambridge University Press: 386.
- Gardiner B, Lamb D, Pitter R L, et al, 1985. Measurements of initial potential gradient and particle charges in a montana summer thunderstorm[J]. J Geophys Res Atmos, 90(D4):6079-6086.
- Gonçalves F L T, Martins J A, Albrecht R I, et al, 2012. Effect of bacterial ice nuclei on the frequency and intensity of lightning activity inferred by the RAMS model[J]. Atmos Chem Phys, 12(13):5677-5689.
- Knopf D A, Alpert P A, Zipori A, et al, 2020. Stochastic nucleation processes and substrate abundance explain time-dependent freezing in supercooled droplets[J]. NPJ Climate Atmos Sci, 3(1):2.
- Koop T, Luo B P, Tsias A, et al, 2000. Water activity as the determinant for homogeneous ice nucleation in aqueous solutions[J]. Nature, 406(6796):611-614.
- Koop T, Murray B J, 2016. A physically constrained classical description of the homogeneous nucleation of ice in water[J]. J Chem Phys, 145(21):211915.
- Liu X H, Penner J E, 2005. Ice nucleation parameterization for global models[J]. Meteor Zeitschrift, 14(4):499-514.
- 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 Atmos, 107(D9):ACL 2-1-ACL 2-12.
- 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 Atmos, 110(D12):D12101.

- Meyers M P, DeMott P J, Cotton W R, 1992. New primary ice-nucleation parameterizations in an explicit cloud model[J]. *J Appl Meteor*, 31(7):708-721.
- Pruppacher H R, Klett J D, 1997. *Microphysics of Clouds and Precipitation*[M]. New York: Kluwer Academic Publishers.
- Shi Z, Qu K Y, Li L Y, et al, 2024. Numerical sensitivity studies on effects of ice nucleating processes on electrification in thunderstorms[J]. *J Trop Meteor*, 30(2):149-167.
- Shi Z, Tan Y B, 2014. A numerical study of aerosol effects on electrification of thunderstorms[C/A]. In *The International Conference on Lightning Protection*[C]. Shanghai, 210-214.
- Shi Z, Tan Y B, Tang H Q, et al, 2015. Aerosol effect on the land-ocean contrast in thunderstorm electrification and lightning frequency[J]. *Atmos Res*, 164-165:131-141.
- Shi Z, Tang H Q, Tan Y B, 2016. Effects of the inductive charging on the electrification and lightning discharges in thunderstorms[J]. *Terr Atmos Ocean Sci*, 27(2):241-251.
- Takeuti T, Nakano M, Brook M, et al, 1978. The anomalous winter thunderstorms of the Hokuriku coast[J]. *J Geophys Res Oceans*, 83(C5):2385-2394.
- Tan Y B, Liang Z W, Shi Z, et al, 2014a. Numerical simulation of the effect of lower positive charge region in thunderstorms on different types of lightning[J]. *Sci China Earth Sci*, 57(9):2125-2134.
- Tan Y B, Shi Z, Chen Z L, et al, 2017. A numerical study of aerosol effects on electrification of thunderstorms[J]. *J Atmos Solar Terr Phys*, 154:236-247.
- Tan Y B, Shi Z, Wang N N, et al, 2012. Numerical simulation of the effects of randomness and characteristics of electrical environment on ground strike location of cloud-to-ground lightning[J]. *Chin J Geophys*, 55(6):626-634.
- Tan Y B, Tao S C, Liang Z W, et al, 2014b. Numerical study on relationship between lightning types and distribution of space charge and electric potential[J]. *J Geophys Res Atmos*, 119(2):1003-1014.
- Williams E R, 1989. The tripole structure of thunderstorms[J]. *J Geophys Res Atmos*, 94(D11):13151-13167.
- Ziegler C L, MacGorman D R, Dye J E, et al, 1991. A model evaluation of noninductive graupel-ice charging in the early electrification of a mountain thunderstorm[J]. *J Geophys Res Atmos*, 96(D7):12833-12855.

(本文责编:王婷波)