

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

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

摘要: 近年来, 气溶胶与雷暴云电学活动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。本文利用三维雷暴云模式, 选取一次山地弱雷暴个例, 研究了三种不同的冰晶核化方案对闪电放电特征的影响。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, 电荷结构以偶极性电荷结构为主, 闪电频次较低, 产生的闪电为云闪为主, 其触发点高度高。异质核化在高温区形成冰晶, 导致雷暴中出现更早的起电过程, 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电荷结构。此背景下, 闪电发生时间提前且始发点相对较低, 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, 闪电频数高。此外, 两种核化过程造成首次闪电发生时间提前, 闪电的初始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

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2025.040301

国家自然科学基金项目 (41805002)、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资助项目(LZJMZ24D050009)共同资助

2024-07-23 收稿; 2025-04-03 收修订稿

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

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

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

² Key Laboratory of Lightning, China Meteorological Administration, Beijing 100081

³ Zhejiang Meteorological Safety Technology Center, Hangzhou 310008

Abstract: In recent years, the interaction between aerosols and thunderstorm electrification had emerged as a focal point in academic research. Homogeneous nucleation of soluble aerosol droplets and heterogeneous nucleation of ice nuclei represent two primary mechanisms for ice crystal formation. The size and concentration of ice crystals in thunderstorms significantly influenced charge generation and distribution, which are critical factors in lightning occurrence. This study employed a three-dimensional thunderstorm model to investigate the impact of three distinct ice nucleation processes on lightning discharge characteristics, focused on a weak mountain thunderstorm case study. The results demonstrated that homogeneous nucleation generated a substantial number of ice crystals in the low-temperature region at the cloud top, resulting in prolonged discharge duration within the thunderstorm. The charge structure was predominantly dipolar, with a lower frequency of lightning, primarily consisting of cloud flashes originating from higher altitudes. In contrast, heterogeneous nucleation formed ice crystals in high-temperature regions, leading to an earlier charging process in thunderstorms. Ice crystals in these regions readily met charge reversal conditions, significantly increasing the negative non-inductive charging rate and favoring the formation of tripolar charge structures. Under these conditions, lightning occurred earlier and initiated from relatively lower altitudes, with heterogeneous nucleation facilitating lightning occurrence. When both homogeneous and heterogeneous nucleation processes occurred simultaneously, the thunderstorm charging process intensifies, resulting in a high lightning frequency. Furthermore, both nucleation processes advanced the initial lightning occurrence time and expanded the height range of the initial lightning trigger points. The tripolar charge structure promoted the occurrence of a substantial number of negative cloud-to-ground flashes.

Keywords: nucleation processes; homogeneous nucleation; heterogeneous nucleation; lightning frequency; numerical simulation

57

58 引言

59 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
60 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
61 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
62 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。

63 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
64 形成的重要来源 (Pruppacher and Klett, 1997; Koop et al, 2000; Liu and Penner, 2005; DeMott
65 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
66 对云微物理发展过程观测手段比较有限，人们主要基于云模式进行冰晶核化过程对雷暴云电
67 过程影响的研究，而且主要是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这
68 些科学问题上，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
69 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，
70 云中冰晶粒子与霰粒子的数浓度都分别增加，初始起电时间提前，空间电荷密度大小增加。
71 苏正军等 (2010) 基于催化剂检测实验的时间特征数据，对核化速率进行了深入研究，发现
72 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
73 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
74 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。
75 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
76 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，
77 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
78 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
79 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
80 云砧处的冰晶，有利于提高霰收集云滴的效率，表现为极高的霰比含水量，促进低温区非感
81 应起电过程的发生。师正等 (2023) 研究了大气冰核浓度变化对雷暴云动力、微物理及空间
82 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
83 量生成，而同质核化过程被抑制，因此冰晶整体含量降低，引起低温区中霰粒含量降低和高
84 温区中霰粒尺度降低。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
85 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
86 复杂四极性。在雷暴云消散阶段电荷结构均呈现偶极性电荷结构，且随着冰核浓度的增加电
87 荷密度值逐渐减小。

88 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。如：王婷波等
89 (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
90 其发展特性进行了统计分析。张萍萍等 (2021) 借助 FY-4 闪电成像仪，有效地捕捉到了对

91 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
92 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
93 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
94 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
95 et al（1982）发现正地闪触发时，空中电荷结构均为偶极型。Carey and Rutledge（1998）发
96 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
97 地闪，可能与云中的反三极电荷结构有关（张义军，2006）；对于负地闪而言，底部的次正
98 电荷中心则是个关键（Clarence and Malan, 2010; Williams, 1989; Tan et al, 2014a）。底部
99 次正电荷区足够大时，将容易产生反极性云闪（张义军，2002；郟秀书，2005；Tan et al,
100 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;
101 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
102 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闪电活动特征产生重要影
103 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
104 理、降水及闪电发生率的作用，得出了细菌性冰核会使对流云中的冰晶离子浓度增加，从而
105 使闪电频率增加，总降雨量减少。但其放电结果仅基于简单计算的公式，并未揭示其中
106 详细的微物理和起电过程。

107 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
108 的研究很少。因此，要想全面了解冰晶核化过程影响雷暴云放电过程的物理原因，则有必要
109 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
110 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
111 理性解释。

112 1 模式介绍及初始场设置

113 本文所采用的云模式采用中国气象科学研究院（胡志晋和何观芳，1987；王谦和胡志晋，
114 1990；于达维等，2001）开发的云模式框架。在此基础上，谭涌波（2006）对 Mansell et al
115 （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电和放电参数化方案
116 的三维雷暴云电耦合模式。该模型视大气为无粘性的可压缩流体，采用非静力平衡的假设。
117 模型涵盖云滴、雨滴、冰晶、霰和雹五种水成物粒子，包含了 22 个预测变量和 5 个诊断变
118 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
119 文将对模式采用的主要参数化方案进行简要介绍。

120 1.1 冰晶核化方案

121 迄今为止，关于雷暴云起、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
122 过程。例如：计算冰晶的核化率时往往采用一种与温度或饱和度相关的关系式（Fletcher 1962；
123 Cooper 1986；Meyers et al, 1992）。经验公式具有计算方便的优势，但由于不考虑冰核类型
124 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

125 要合理的再现雷暴云起、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
126 起、放电模式中完善冰晶核化过程十分重要。

127 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
128 自由能的变化，确定相应的同质核化速率。10 μm 的液滴在 -35°C 的环境温度下需经过数小
129 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
130 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
131 有随机性，冻结概率的高低取决于液滴的体积、冻结持续时间 (Knopf et al, 2020)。模式中
132 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
133 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
134 在 -32°C 。具体参数化方案见师正等 (2023)。

135 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
136 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
137 核化通常是指干燥的气溶胶颗粒与液滴碰并冻结的过程。方案重点考虑了以下三点：(1) 环
138 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
139 态。浸润冻结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
140 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
141 的几率也会增加。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
142 活化率。三种异质核化方案详见李璐滢等 (2021)。

143 1.2 电过程参数化方案

144 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
145 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
146 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
147 基于 Ziegler et al (1991) 的方案。

148 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
149 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
150 (160 kv 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，
151 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
152 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
153 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要小于 5 次。为了限制雷
154 暴云中电荷的过量累计，本研究中每次放电结束后空间电荷减小至原来的 70%。

155 1.3 模式启动条件

156 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。第一种
157 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
158 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

159 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
 160 来初始化对流。模式中采用轴对称形式的椭球体扰动函数：

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

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

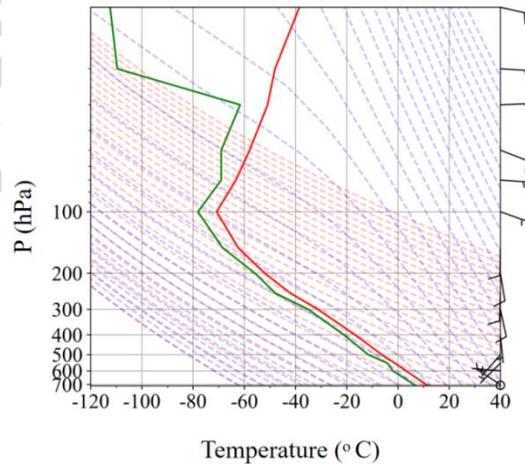
161 式中 θ 为位温， θ_0 为初始温度扰动（设定为 2.5 K）， $\Delta\theta$ 为中心最大扰动位温，
 162 Q_v 为比湿， Q_{v0} 为初始湿度扰动（设定为 80%）， Q_{vs} 为考虑了位温扰动后的饱和比湿。

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

163 式中 x, y 为所求目标格点的空间位置， (x_c, y_c) 是扰动场的中心坐标， x_r, y_r 分别是扰动区
 164 在两个坐标方向的半径。

165 1.4 初始场简介

166 本文采用了一次典型的雷暴云电过程作为模拟个例（王宁宁，2012；Shi et al, 2015；
 167 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
 168 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
 169 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
 170 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实验，分别为：仅考虑同质核
 171 化过程、仅考虑异质核化过程以及同时考虑同质核化和异质核化过程，并分别命名为 Ho 个
 172 例、He 个例以及 Co 个例。



173
 174 注：红色实线表示环境温度，绿色实线表示露点温度，黑色实线表示状态曲线，风场以风矢量的形式表示在右侧图框。背
 175 景蓝色虚线为假绝热线，红色虚线为干绝热线，抬升凝结高度为 5.59 °C, 652.51 hPa。

176 图 1 试验个例的初始场

177 Figure 1 Initial conditions of the experimental cases

178

179 2 模拟结果

180 表 1 给出了三次个例中闪电（包括正、负地闪和云闪）频次。从表中可以发现，Ho 个
 181 例发生闪电的频次最少，共计 41 次云闪和 1 次正地闪。He 个例中闪电频次次之，发生了
 182 148 次云闪和 10 次地闪，其中正地闪 6 次，负地闪 4 次。Co 个例发生闪电频次最多，共计
 183 185 次云闪和 107 次负地闪。

184

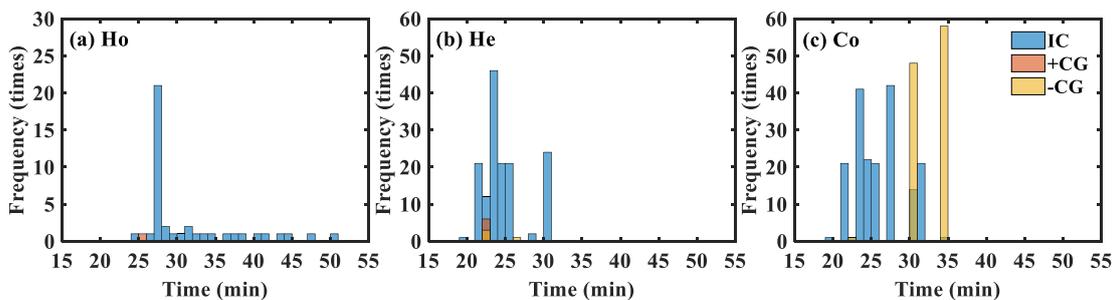
表 1 不同个例的闪电放电频次

185

Table 1 Frequency of Lightning discharges in different cases

闪电类型	Ho 个例/次	He 个例/次	Co 个例/次
地闪	正地闪	1	6
	负地闪	0	4
云闪	41	148	185

186 图 2 给出了不同方案下闪电放电频次随时间的变化。Ho 个例的首次云闪出现在第 24 min，
 187 唯一一次地闪为正地闪，发生在第 25 min。云闪活动在第 28 min 达到峰值，其每 min 发生
 188 了 21 次，最后一次闪电活动记录在第 52 min。He 个例的首次云闪出现在第 19 min，闪电活
 189 动最频繁的时间点为第 24 min，期间记录了 46 次云闪，最后一次云闪发生在第 31 min。地
 190 闪活动多于第 22 min 时发生，该 min 内集中发生了 6 次正地闪，3 次负地闪。Co 个例中，
 191 云闪在第 19 min 首次出现，于第 23 和 27 min 分别记录了 41 次和 42 次云闪。此外，从第
 192 22 min 开始观测到负地闪，在第 30 和 35 min，负地闪活动尤为频繁，分别达到了 48 次和
 193 58 次。通过对比分析可知：首先，He 和 Co 个例的闪电活动发生时间相比 Ho 个例要早，
 194 因此异质核化可能有助于闪电的提前发生。在 Ho 和 He 个例中，云闪的发生频率显著高于
 195 地闪，而在 Co 个例中，地闪的次数则显著增加，且发生的均为负地闪。这表明当同质核化
 196 与异质核化同时发生时，会促使地闪频率上升。



197

198

注：Ho 个例为仅发生同质核化过程；He 个例为仅发生异质核化过程；Co 个例为同时发生同质核化与异质核化过程（下

199

同); 蓝色柱代表云闪发生频次, 橙色柱代表正地闪发生频次, 黄色柱代表负地闪发生频次

200

图2 三种个例下闪电放电频次随时间分布直方图

201

Figure 2 Histogram of Lightning discharge frequency over time for three cases

202

203

204

205

206

207

208

209

210

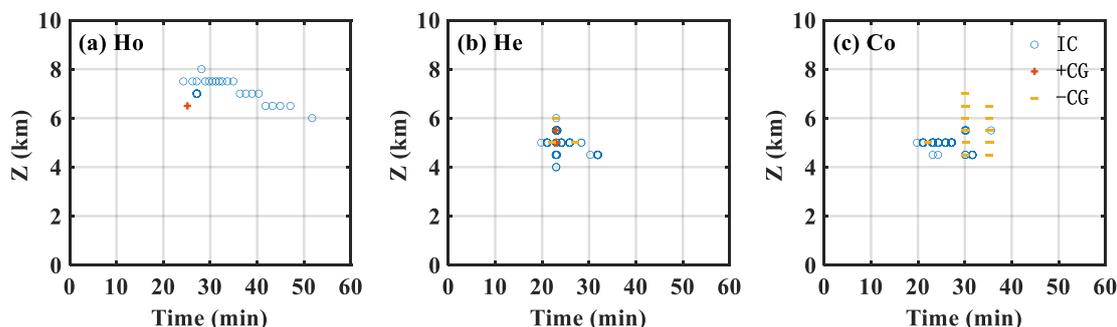
211

212

213

214

为了揭示不同核化过程对闪电始发点高度的影响, 图3中详细展示了三种不同方案下不同时间上闪电始发点高度。由图3不难发现, Ho个例中闪电始发点高度最高, 主要分布在6~8 km的高度范围内。其中, 第25 min时正地闪的始发点位于6.5 km的高度; 而云闪则主要发生在第22~51 min内, 其始发点最高和最低分别位于8 km和6 km, 在7.5 km的高度上记录了24次云闪事件。He个例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, 在这高度上共发生了6次正地闪、1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19~32 min内发生了148次云闪, 其始发点高度则在4~6 km之间。Co个例共发生了107次负地闪, 其始发点最高和最低分别位于7 km和4.5 km, 时间范围为第22~35 min。此外, 该个例中还记录了185次云闪, 主要集中在4.5~5.5 km的高度, 发生时间从第20 min~36 min。该个例有三个地闪的频发高度: 在4.5 km、5.5 km和6.5 km处分别发生了29次、39次和14次地闪; 而其云闪最频发的高度则是5 km, 总计发生了147次云闪。此外, Co个例闪电始发高度的垂直分布最宽广。



215

注: 蓝色圆圈代表云闪, 橙色实心圆圈代表正地闪, 黄色短横线代表负地闪。

216

217

218

图3 三种方案下闪电的始发点位置

219

Figure 3 Initiation points of Lightning in three scenarios

220

221

222

223

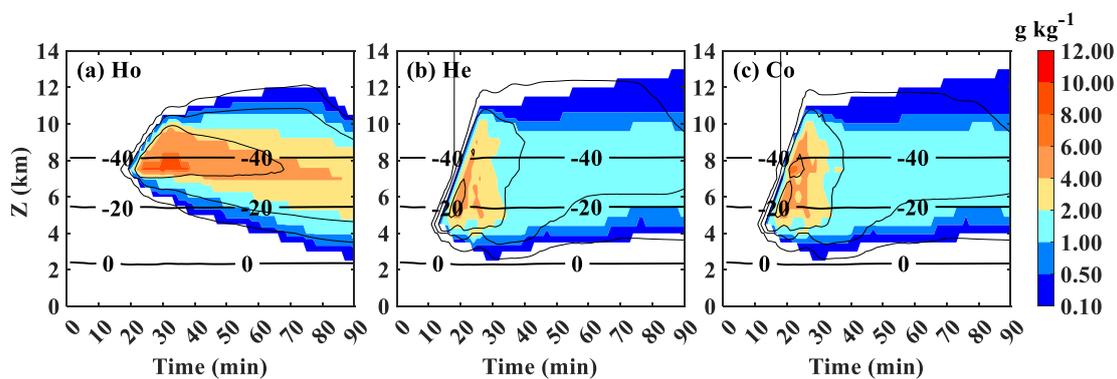
综上所述, 仅考虑同质核化, 雷暴云中产生大量云闪, 云闪始发高度相对高(6~8 km), 放电持续时间长。当仅考虑异质核化时, 闪电发生的时间提前, 闪电始发点分布在4~6 km高度范围内。当同时考虑两种核化过程, 雷暴云中放电提前, 同时产生大量地闪, 闪电始发点在4~7 km高度范围内。

224 3 讨论分析

225

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

226 最大混合比和数浓度的时空分布,从图中可以看出Ho个例中冰晶从第20 min左右开始产生,
 227 混合比大于 0.5 g kg^{-1} 的冰晶主要集中在 $6\sim 9 \text{ km}$,与 Alizadeh-Choobari and Gharaylou (2017)
 228 的研究结果类似,为云中的低温区(低于 -20°C),且冰晶的分布较为稳定,整体来看随着时
 229 间的推移 Ho 个例的冰晶受重力作用逐步下沉。He 个例冰晶产生的时间要早于 Ho 个例,并
 230 且冰晶的混合比明显小于 Ho 个例,并且中心位置明显低于 Ho 个例,这与 Shi and Tan(2014)
 231 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 个例
 232 的冰晶最大和混合比的分布情况整体与 He 个例相似,但是其冰晶混合比大于 4 g kg^{-1} 的范
 233 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
 234 时间明显短于 Ho 个例,可以证明异质核化的存在明显抑制了同质核化。



235

236 注:黑色粗实线为 -40°C 、 -20°C 、 0°C 等温线,下同。黑色细实线为冰晶数浓度等值线(分别为: 104 、 105 、 106 、 107 kg^{-1});
 237 彩色区域表示冰晶比质量(单位: g kg^{-1})

238

图 4 三种方案下冰晶最大混合比和最大数浓度随时间的变化

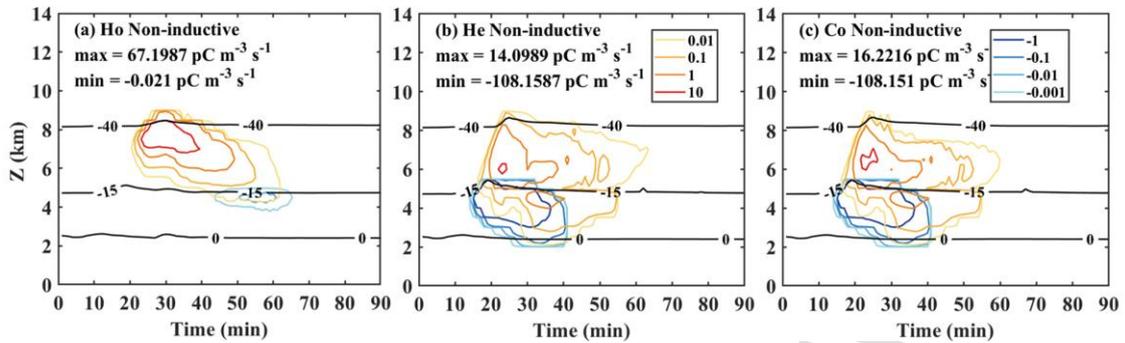
239

Figure 4 Temporal variation of maximum ice crystal mixing ratio and maximum number concentration for three scenarios

240

241 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
 242 放电特征影响的物理原因,本文首先给出了不同个例的起电过程的演变特征。非感应起电目
 243 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
 244 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
 245 看出 Ho 个例的正非感应起电率最大 ($67.20 \text{ pC m}^{-3} \text{ s}^{-1}$),这是因为云顶高度附近 ($7\sim 9 \text{ km}$)
 246 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
 247 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
 248 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
 249 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,且云水含量大于 0.1 g m^{-3}
 250 时,粒子荷电情况发生了反转,转而变成霰粒子带正电,而冰晶粒子带负电。此外,随着雷
 251 暴进一步发展,云水含量减少至 0.1 g m^{-3} 以下后,电荷的转移不再满足反转条件,冰晶在
 252 -15°C 以下依旧带正电(图 4b, 4c)。He 个例的正非感应起电率的最大值为 $14.10 \text{ pC m}^{-3} \text{ s}^{-1}$,
 253 负非感应起电率的最大值为 $-108.16 \text{ pC m}^{-3} \text{ s}^{-1}$, Co 个例的非感应起电率与 He 个例相似:正

254 非感应起电率的最大值为 $16.22 \text{ pC m}^{-3} \text{ s}^{-1}$ ，负非感应起电率的最大值为 $-108.11 \text{ pC m}^{-3} \text{ s}^{-1}$ 。这
 255 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)
 256 相同。



257
 258

图 5 三个个例下非感应起电率随时间的变化 (单位: $\text{pC m}^{-3} \text{ s}^{-1}$)

259

Figure 5 Temporal variation of the non-inductive charging rate in the three cases(unit: $\text{pC m}^{-3} \text{ s}^{-1}$)

260

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、起电过程及放电
 261 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
 262 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
 263 正、负电荷密度各自的极大值。

264

Ho 个例整体上是偶极性电荷结构，并且持续时间最久，正电荷区的位置是三个个例中
 265 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
 266 出下沉的趋势，主负电荷区的中心位于 5~8 km 处 (图 6a)。这种现象可能是由于雷暴云发
 267 生了贝吉隆效应，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
 268 晶粒子并抑制云滴形成。因此 Ho 个例中的闪电始发点普遍较高。如图 7a 所示，当雷暴发
 269 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 处。
 270 此外，Ho 个例中雷暴在第 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
 271 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
 272 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)。

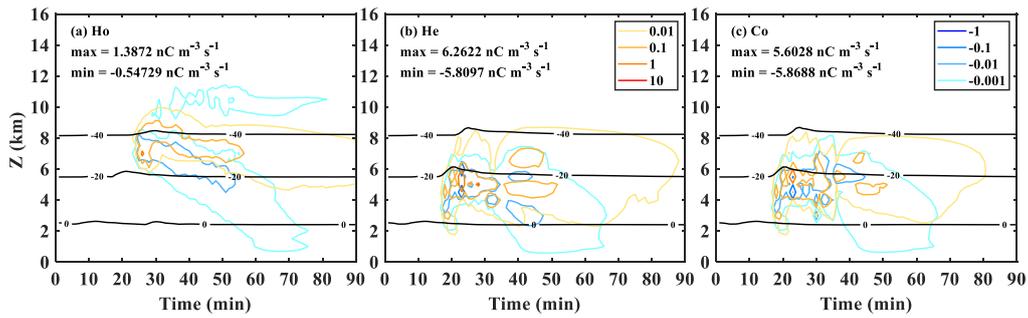
273

He 个例中，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
 274 极性电荷结构 (图 6b)。此个例首次放电的时间为第 19 min，此时云闪起始于主正电荷堆与
 275 主负电荷堆之间，约为 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
 276 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
 277 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
 278 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。

279

Co 个例中，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
 280 更强 (相对于 Ho 和 He 个例) (见图 6c)，Co 个例同样以云闪开始，此时雷暴云电荷结构以
 281 偶极性为主，电荷量强，云闪的正负通道长度更大 (见图 7g)。在 30 min 时雷暴电荷结构
 282 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

283 变为偶极性，闪电以云闪为主（见图 7i）。如前文所说，Ho 和 He 个例中的正地闪是在偶极
 284 性电荷结构下产生的。由图 6b 和图 7e 可以看到，在 He 个例中，下行的正先导穿过底部
 285 的主负电荷堆后接地。而在 Co 个例中，电荷结构以三极性电荷结构为主。由图 6c 可以看到，
 286 此时中部的负电荷堆最大电荷量明显高于上部的正电荷堆。结合图 3c 可以发现，部分
 287 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，
 288 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 个
 289 例中负地闪活动的次数显著增加。

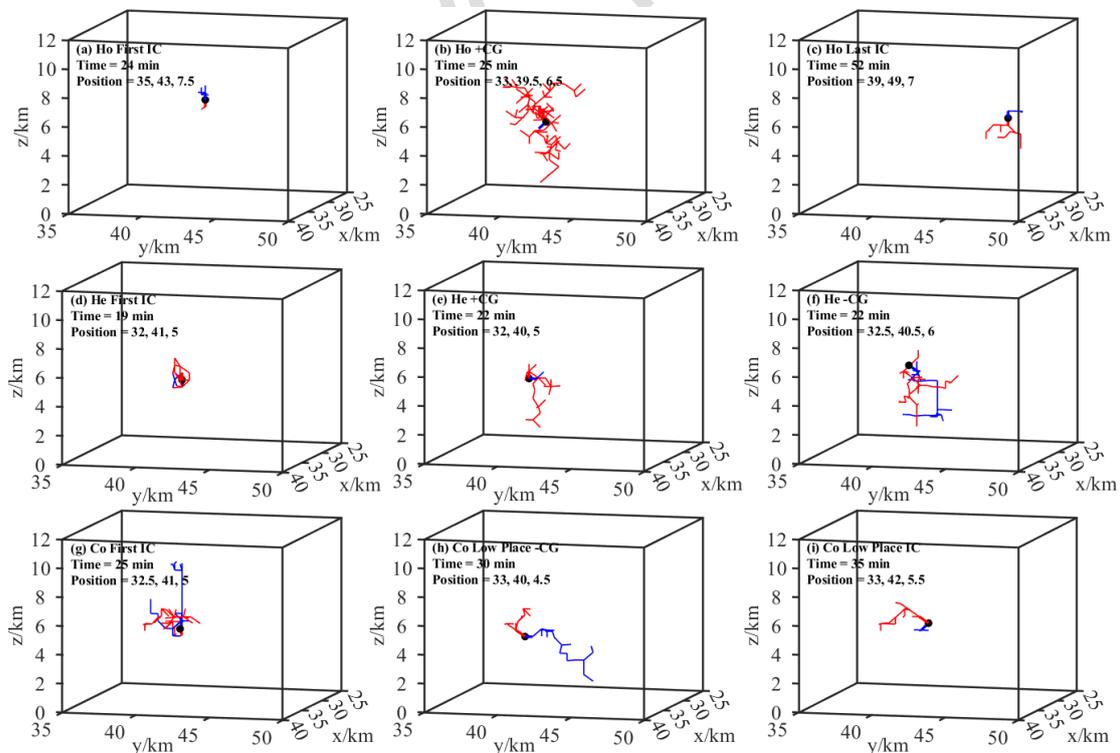


290
291

图 6 电荷密度极值垂直结构随时间变化的分布（单位： $\text{nC m}^{-3} \text{s}^{-1}$ ）

292 Figure 6 Distribution of charge density extremes vertical structure over time (unit: $\text{nC m}^{-3} \text{s}^{-1}$ positive charge density
 293 maxima, negative charge density minima)

294



295
296

注：红色为正通道，蓝色为负通道。

297

图 7 三种核化方案下不同类型闪电的三维通道结构

298

299

300

301 4 结论

302 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,研究了三种不同的冰晶核
303 化过程对雷暴云闪电放电特征的影响,深入探讨了不同核化过程对雷暴云的动力学、微物理
304 过程及电过程的作用。分析结果如下:

305 (1) 同质核化主要发生于云顶低温区,雷暴云通过发生贝吉隆效应,使其中存在的过
306 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 g m^{-3}
307 m^{-3} 时,冰晶粒子荷为正电。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
308 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
309 中产生大量云闪,云闪始发高度相对高,且放电持续时间长。

310 (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
311 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 g m^{-3} 时,粒子荷电极性
312 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 g m^{-3}
313 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
314 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,
315 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。

316 (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
317 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
318 考虑两种核化过程时,雷暴云中放电提前,闪电频数最大。同时,雷暴三极型电荷结构背景
319 下主负电荷堆和次正电荷堆之间产生了大量负地闪。该个例中闪电不仅可触发于高温区的主
320 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
321 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
322 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。
323 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
324 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
325 重要,它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
326 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
327 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。我们未来将
328 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
329 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,
330 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
331 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
332 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

333 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,
334 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
335 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
336 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
337 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
338 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
339 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。
340

气象学报

参考文献

- 341
342 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.
343 Numerical simulation of microprocesses in cumulonimbus clouds—I microphysical model[J]. Acta Meteor Sin, 45(4): 467-484 (in
344 Chinese).
- 345 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,
346 Shi Z, Tan Y B, et al, 2021. Numerical simulation of effects of heterogeneous nucleation on microphysical process and electrification in
347 thunderstorms[J]. J Trop Meteor, 37(3): 468-477 (in Chinese).
- 348 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
349 Y, Sun J M, Niu S J, 2016. Preliminary modelling for the effects of dust on the cumulus electrification process[J]. Climatic Environ Res,
350 21(1): 107-120 (in Chinese).
- 351 郗秀书, 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
352 Q L, 2005. Study on the characteristics of lightning discharges and the electric structure of thunderstorm[J]. Acta Meteor Sin, 63(5):
353 646-658 (in Chinese).
- 354 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征分析[J]. 气象, 48(4): 442-451. Ruan Y, Huang H
355 L, Wei M, et al, 2022. Analysis of three dimensional lightning and dual-polarization radar echo characteristics of hail cloud over Fujian[J].
356 Meteor Mon, 48(4): 442-451 (in Chinese).
- 357 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
358 X T, et al, 2023. Numerical simulation on the effect of ice nuclei on the electrification process of thunderstorms[J]. Chin J Atmos Sci,
359 47(1): 20-33 (in Chinese).
- 360 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.
361 Experimental study on nucleation rate of artificial ice nuclei[J]. Meteor Mon, 36(11): 46-49 (in Chinese).
- 362 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.
363 Numerical simulation of the relationship of the lightning discharge with the space charge and potential distribution in thundercloud[D].
364 Hefei: University of Science and Technology of China: 173 (in Chinese).
- 365 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
366 simulation of the effects of the aerosol on thunderstorm cloud charge structure[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science
367 and Technology: 73 (in Chinese).
- 368 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.
369 Three-dimensional elastic atmospheric numerical model and the simulations of a severe storm case[J]. Acta Meteor Sin, 48(1): 91-101 (in
370 Chinese).
- 371 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,
372 2020. Statistic analysis of thunderstorm characteristics in central and eastern China[J]. Meteor Mon, 46(2): 189-199 (in Chinese).
- 373 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,
374 Zhou Y, et al, 2001. Three-dimensional convective cloud seeding model and its field application[J]. Quart J Appl Meteor, 12(S1):
375 122-132 (in Chinese).

376 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
377 P, Liu W T, Zhang C H, et al, 2021. Observation characteristics of FY-4A lightning mapping imager during a severe rainfall[J]. Meteor
378 Mon, 47(11): 1391-1401 (in Chinese).

379 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
380 R, Liu X S, 2002. Reverse polarity discharges and charge structure in thunderstorms[J]. Chin Sci Bull, 47(15): 1192-1195 (in Chinese).

381 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):
382 98-108. Zhang Y J, Meng Q, Krehbiel P R, et al, 2006. Temporal and spatial structural features of positive ground flash development with
383 lightning bi-directional precursors[J]. Scientia Sinica (Terrae), 36(1): 98-108 (in Chinese).

384 Alizadeh-Chooabari O, Gharaylou M, 2017. Aerosol impacts on radiative and microphysical properties of clouds and precipitation
385 formation[J]. Atmos Res, 185: 53-64.

386 Brook M, Nakano M, Krehbiel P, et al, 1982. The electrical structure of the Hokuriku winter thunderstorms[J]. J Geophys Res
387 Oceans, 87(C2): 1207-1215.

388 Carey L D, Rutledge S A, 1998. Electrical and multiparameter radar observations of a severe hailstorm[J]. J Geophys Res Atmos,
389 103(D12): 13979-14000.

390 Clarence N D, Malan D J, 1957. Preliminary discharge processes in lightning flashes to ground[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 83(356):
391 161-172.

392 Cooper W A, 1980. A method of detecting contact ice nuclei using filter samples[C]//Eighth International Conference on Cloud
393 Physics. Clermont-Ferrand: 665-668. DeMott P J, Prenni A J, Liu X, et al, 2010. Predicting global atmospheric ice nuclei distributions
394 and their impacts on climate[J]. Proc Natl Acad Sci USA, 107(25): 11217-11222.

395 Diehl K, Grützun V, 2018. Model simulations with COSMO-SPECS: impact of heterogeneous freezing modes and ice nucleating
396 particle types on ice formation and precipitation in a deep convective cloud[J]. Atmos Chem Phys, 18(5): 3619-3639.

397 Fletcher N H, 1962. The Physics of Rainclouds[M]. Cambridge: Cambridge University Press: 386.

398 Gardiner B, Lamb D, Pitter R L, et al, 1985. Measurements of initial potential gradient and particle charges in a montana summer
399 thunderstorm[J]. J Geophys Res Atmos, 90(D4): 6079-6086.

400 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
401 activity inferred by the BRAMS model[J]. Atmos Chem Phys, 12(13): 5677-5689.

402 Knopf D A, Alpert P A, Zipori A, et al, 2020. Stochastic nucleation processes and substrate abundance explain time-dependent
403 freezing in supercooled droplets[J]. NPJ Climate Atmos Sci, 3(1): 2.

404 Koop T, Luo B P, Tsias A, et al, 2000. Water activity as the determinant for homogeneous ice nucleation in aqueous solutions[J].
405 Nature, 406(6796): 611-614.

406 Koop T, Murray B J, 2016. A physically constrained classical description of the homogeneous nucleation of ice in water[J]. J Chem
407 Phys, 145(21): 211915.

408 Liu X H, Penner J E, 2005. Ice nucleation parameterization for global models[J]. Meteor Zeitschrift, 14(4): 499-514.

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

411 Mansell E R, MacGorman D R, Ziegler C L, et al, 2005. Charge structure and lightning sensitivity in a simulated multicell
412 thunderstorm [J]. *J Geophys Res Atmos*, 110(D12): D12101.

413 Meyers M P, DeMott P J, Cotton W R, 1992. New primary ice-nucleation parameterizations in an explicit cloud model[J]. *J Appl*
414 *Meteor*, 31(7): 708-721.

415 Pruppacher H R, Klett J D, 1997. *Microphysics of Clouds and Precipitation*[M]. New York: Kluwer Academic Publishers.

416 Shi Z, Tan Y B, 2014. A numerical study of aerosol effects on electrification of thunderstorms[A]. In *The International Conference*
417 *on Lightning Protection*[C]. Shanghai, 210-214.

418 Shi Z, Tan Y B, Tang H Q, et al, 2015. Aerosol effect on the land-ocean contrast in thunderstorm electrification and lightning
419 frequency[J]. *Atmos Res*, 164-165: 131-141.

420 Shi Z, Tang H Q, Tan Y B, 2016. Effects of the inductive charging on the electrification and lightning discharges in thunderstorms[J].
421 *Terr Atmos Ocean Sci*, 27(2): 241-251.

422 Shi Z, Qu K Y, Li L Y, et al, 2024. Numerical sensitivity studies on effects of ice nucleating processes on electrification in
423 thunderstorms[J]. *J Trop Meteor*, 30(2): 149-167.

424 Takeuti T, Nakano M, Brook M, et al, 1978. The anomalous winter thunderstorms of the Hokuriku coast[J]. *J Geophys Res Oceans*,
425 83(C5): 2385-2394.

426 Tan Y B, Shi Z, Wang N N, et al, 2012. Numerical simulation of the effects of randomness and characteristics of electrical
427 environment on ground strike location of cloud-to-ground lightning[J]. *Chin J Geophys*, 55(6): 626-634.

428 Tan Y B, Liang Z W, Shi Z, et al, 2014a. Numerical simulation of the effect of lower positive charge region in thunderstorms on
429 different types of lightning[J]. *Sci China Earth Sci*, 57(9): 2125-2134.

430 Tan Y B, Tao S C, Liang Z W, et al, 2014b. Numerical study on relationship between lightning types and distribution of space
431 charge and electric potential[J]. *J Geophys Res Atmos*, 119(2): 1003-1014.

432 Tan Y B, Shi Z, Chen Z L, et al, 2017. A numerical study of aerosol effects on electrification of thunderstorms[J]. *J Atmos*
433 *Solar-Terr Phys*, 154: 236-247.

434 Williams E R, 1989. The tripole structure of thunderstorms[J]. *J Geophys Res Atmos*, 94(D11): 13151-13167.

435 Ziegler C L, MacGorman D R, Dye J E, et al, 1991. A model evaluation of noninductive graupel-ice charging in the early
436 electrification of a mountain thunderstorm[J]. *J Geophys Res Atmos*, 96(D7): 12833-12855.

437

氣象
《待刊》