

谭涌波, 杨忆, 师正, 等. 2015. 冰晶核化对雷暴云微物理过程和起电影响的数值模拟研究 [J]. 大气科学, 39 (2): 289-302, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1405.13330. Tan Yongbo, Yang Yi, Shi Zheng, et al.. 2015. Numerical simulation research on the effect of ice nucleation on thundercloud microphysical process and electrification [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 39 (2): 289-302.

冰晶核化对雷暴云微物理过程和起电影响的数值模拟研究

谭涌波^{1,2} 杨忆^{1,2} 师正^{1,2} 周博文^{1,2} 张冬冬^{1,2} 廖义慧^{1,2}

¹ 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044

² 南京信息工程大学中国气象局气溶胶与云降水重点开放实验室, 南京 210044

摘要 本文在已有的二维对流云模式中采用了一种与气溶胶有关的冰晶核化方案替代原有的冰晶核化经验公式, 并选取个例, 分别就两种方案进行了模拟对比试验。模拟结果表明: (1) 新方案所得冰晶比含水量主要分布在 $-0.1\sim-7.6^{\circ}\text{C}$ 温区之间, 高于原方案所得的 $-50.1\sim-24.2^{\circ}\text{C}$ 温区; 在整个雷暴云的发展过程中新方案冰晶的分布高度、温度区间以及最大浓度值均大于原方案。(2) 在新方案中, 温度相对较高的过冷区产生大量冰晶, 其争食云中水汽抑制了云滴、雨滴的增长。此外, 与原方案相比, 霰增长受雨滴大幅减小的影响进一步得到限制, 导致生成的霰小于原方案, 且空间分布具有较大区别。(3) 两方案在雷暴云初期形成的电荷结构不同; 在发展旺盛与消散阶段新方案中电荷空间分布区域和电荷量均大于原方案, 此外, 在不同时刻主正电荷区和主负电荷区的中心高度存在差异。本文对云微物理过程及起电的分析为后继探讨气溶胶与雷暴云起电过程、电荷结构之间的相互关系提供了有利条件。

关键词 冰晶 核化方案 微物理过程 云模式

文章编号 1006-9895(2015)02-0289-14

中图分类号 P446

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1405.13330

Numerical Simulation Research on the Effect of Ice Nucleation on Thundercloud Microphysical Process and Electrification

TAN Yongbo^{1,2}, YANG Yi^{1,2}, SHI Zheng^{1,2}, ZHOU Bowen^{1,2}, ZHANG Dongdong^{1,2},
and LIAO Yihui^{1,2}

¹ Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

² Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

Abstract Based on an existing two-dimensional convective cloud model, this work adopts a nucleation scheme associated with aerosols to replace the original ice crystal nucleation empirical formula, and conducts a simulation contrast test on the two schemes. Simulation results show that: (1) The mass of ice crystals in the new scheme is mainly distributed in the -50.1°C to -7.6°C temperature region, higher than the original scheme's temperature region of -50.1°C to -24.2°C . Throughout the thundercloud development process in the new scheme, the distribution height, temperature

收稿日期 2013-12-10; 网络预出版日期 2014-05-23

资助项目 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目2014CB441403, 国家自然科学基金项目41175003、41475006, 江苏高校优势学科建设工程资助项目PAPD, 江苏省普通高校研究生科研创新计划项目CXZZ13_0515

作者简介 谭涌波, 男, 1977年生, 副研究员, 主要从事雷电物理学以及雷气象学研究。E-mail: ybtan@ustc.edu

region, and maximum concentration value of ice crystals are greater than in the original scheme. (2) The new scheme produces a large number of ice crystals at relatively high temperature that dodge the water vapor and inhibit the growth of cloud droplets and rain. In addition, compared with the original scheme, graupel growth is greatly affected by the impact of raindrops and is dramatically reduced. This leads to the graupel being smaller than in the original scheme and to differences in its spatial distribution. (3) For thunderclouds, the early charge structure of the two schemes is different. The charge distribution area and amount of charge in the new scheme are greater than in the original scheme. In addition, the center heights of the main positive and the main negative charges differ at different times. This analysis of cloud microphysical process reveals the conditions favorable for researching the relationship between the thundercloud electrification process and the aerosol charge structure.

Keywords Ice crystals, Nucleation scheme, Microphysical process, Cloud model

1 引言

气溶胶是指悬浮在气体中的固体和液体微粒与气体载体共同组成的多相体系,气溶胶可以通过吸收和散射太阳辐射直接影响地—气系统的辐射平衡,也可以作为云凝结核和冰核影响云微物理过程。目前,人们对气溶胶—云滴的相互作用了解较多,但对气溶胶—冰晶的相互作用了解较少,冰晶粒子由可溶性气溶胶液滴同质核化形成或在不可溶气溶胶粒子(冰核)帮助下异质核化形成,异质核化过程有多种机制,如凝华、碰触、浸润等,多种气溶胶可以充当冰核,如沙尘、黑碳、花粉等(Blyth and Latham, 1993; 王春明等, 1997; Yin et al., 2000, 2002; Murray et al., 2010; 房文和郑国光, 2011)。大量观测证明气溶胶浓度改变对冰晶含量及冰晶尺度均有影响,其中气溶胶对冰晶数浓度影响最为明显,气溶胶数浓度增加导致云中过冷水量增多,冰晶粒子增加,霰粒子浓度降低(van den Heever et al., 2006; Fan et al., 2007; Yang et al., 2011); Khain (2009) 使用二维云模式证明了海洋上空气溶胶的增多会增加雷暴云中过冷水滴含量、冰晶含量以及上升风速;在沙尘天气系统下,许多学者认为沙尘气溶胶作为有效冰核,在低于 -8°C 时通过接触冻结核化、低于 -15°C 时凝华核化,在 $-9\sim-30^{\circ}\text{C}$ 时依靠表面的化学物质通过浸润冻结核化(Pruppacher and Klett, 1997; Khain et al., 2005);近几年一些学者探讨了生物气溶胶(如细菌、真菌和藻类)作为冰核影响冰晶形成,尤其典型的冰核活性细菌能有效地促进其他冰核的异质核化过程(Morris et al., 2004; Gonçalves et al., 2012)。可见,气溶胶是参与冰晶形成的主要成分,它的分布可以改变云内的动力以及微物理过程,尤其是对冰晶的空间分布和谱变化影响最为突出。

目前云模式中气溶胶数浓度和类型有关的冰晶核化方案尚少。初期的云模式中,冰晶数浓度由野外探测或云室实验得到的经验公式计算,冰核活化有不同的表达式,Fletcher (1962) 认为冰核浓度是温度的函数,Cooper (1980) 认为冰核浓度是饱和度的函数,许焕斌等(2004)和Thompson et al. (2008) 则同时考虑空气饱和度和温度。但完全根据经验公式得到的冰晶谱与实际观测结果存在较大差异。Cooper (1980)、Saunders and Al-Naimi (1985) 收集飞机观测和云室结果,他们的研究结果中并没有显示出冰晶数浓度和温度之间很好的相关性,此外,Ryan (2000) 使用模型计算的冰晶数浓度在 -17°C 时为 $8\times 10^5\text{ m}^{-3}$,而在 -47°C 时减小到 $2\sim 3\times 10^4\text{ m}^{-3}$,他的结果显示冰晶数浓度并不是随着温度的降低而增加;Gultepe et al. (2000) 在文章中总结了四个现场观测,尽管是在不同的时期和不同的地方进行的,但冰晶数浓度的分布范围与所对应的温区范围是相似的,在温区 $-46\sim-2^{\circ}\text{C}$ 时对应的冰晶数浓度量级为 $0.001\sim 1\times 10^6\text{ m}^{-3}$,但并未发现冰晶数浓度和温度之间很好的相关性。鉴于此,近几年许多学者用基于物理过程的参数化方案取代原有的经验公式,改进对冰云的模拟,如Barahona and Nenes (2009) 给出的冰晶参数化方案,该方案考虑了气溶胶的微物理化学特征以及同质核化和异质核化之间的竞争,根据不同粒度分布及化学组成的气溶胶计算了冰晶数浓度、粒度分布和最大过饱和度;Liu and Penner (2002) 专门考虑了硫酸盐气溶胶的同质核化和烟尘气溶胶的异质核化并发现硫酸盐气溶胶液滴在 205 K 以下,呈现出类似于玻璃的特性,不再发生同质核化,并提出冰晶核化参数化方案可以很大程度上影响核化的发生概率,进而影响冰晶数浓度以及其他物理过程;Gultepe et al. (2000) 提出风速、冰面过饱和度、

气溶胶数浓度、温度均应被考虑到计算冰晶数浓度的参数化方案中, 这和 Heymsfield and Sabin (1989) 对冰相卷云的研究结论一致。此外, 风速是一个计算冰晶数浓度的重要参数, Blyth and Latham (1993) 使用飞机观测夏季积云, 他们发现不断增加的风速很可能导致低的冰晶数浓度, 而在风速小于 3 m s^{-1} 的地方冰晶数浓度很大。而冰晶对于冷云降水、云的辐射效应、水分循环甚至平流层的水汽含量、雷暴云的起放电等均有重要影响; 冰晶谱分布能够改变冰相粒子的垂直结构, 从而改变非感应起电率的时空分布, 导致雷暴云内放电属性、放电位置以及闪电频次产生差异 (Rawlins, 1981; 周志敏和郭学良, 2009; 谢屹然等, 2005; Krämer, 2009; Gonçalves et al., 2012); 冰晶粒子尺度和冰晶含量等均可影响卷云辐射特征, 冰晶含量增加, 尺度变小可以导致卷云在整个短波波段的反照率增大 (Rangno and Hobbs, 1994; 毛节泰和李成才, 2005; 李娟和毛节泰, 2006); 冰相物理过程增强, 抑制雨水的生成, 从而影响云的微物理过程 (Pruppacher and Klett, 1997; Morris et al., 2004; Khain et al., 2005; 陈丽等, 2007; 王亚玲等, 2012; Gonçalves et al., 2012)。因此, 如何提高云模式中对冰晶核化过程的描述能力变得日益重要。

目前, 国内现有云模式中冰晶核化参数方案大都采用依靠云室实验得出的经验公式, 模拟所得的冰晶分布也与实际观测结果存在较大差异, 除此之外, 也难以探讨气溶胶浓度、化学组分等对冰晶数浓度、尺度、分布等的影响。基于此, 本文在已有的二维对流云起、放电模式 (谭涌波等, 2006, 2007, 2012; Tan et al., 2006) 中耦合了一个与气溶胶有关的冰晶核化方案, 取代通过云室观测得到的经验公式; 通过对比模拟试验, 探讨新方案对冰晶比含水量空间分布的影响, 以及新方案加入后云滴、雨滴、霰、雹比含水量空间分布发生的调整; 分析新方案对五种水成物粒子比含水量、电荷结构的影响, 为继后探讨气溶胶与雷暴云起放电过程、电荷结构之间的相互关系提供了有利条件。

2 模式、参数化方案及背景场介绍

2.1 模式简介

本文利用马明和谭涌波等学者 (马明, 2004; 谭涌波等, 2006, 2007, 2012; Tan et al., 2006) 在中国气象科学研究院发展的二维对流云数值模式

(胡志晋和何观芳, 1987; 王谦和胡志晋, 1990; 于达维等, 2001) 的基础上, 先后加入二维雷暴云起、放电参数化方案, 建立的二维雷暴云起、放电数值模式, 该模式中微物理过程根据积云中水粒子增长、下落速度以及物理特征的不同, 将它们分成云滴、雨滴、冰晶 (包括雪团)、霰 (包括冻雨滴)、雹五种成分, 模式包括 21 个预报量, 与微物理过程相关的预报量有水汽、云滴、雨滴、冰晶、霰、雹的比含水量 ($Q_v, Q_c, Q_r, Q_i, Q_g, Q_h$) 和五种水成物粒子的比浓度 (N_r, N_i, N_g, N_h), 单位分别为 g kg^{-1} 和 kg^{-1} , 其中云滴比浓度 N_c 取常数 ($4 \times 10^8 \text{ kg}^{-1}$)。云内的微物理过程考虑了云中凝结蒸发、碰并、自动转化、核化繁生、融化冻结等, 包括积雨中 27 种主要微物理过程, 有冰、雨、云、霰、雹的凝结 (凝华) 和蒸发; 冰、雨、霰、雹对云滴的碰并, 雨和冰的碰并, 霰、雹碰并雨, 霰、雹碰并冰晶; 冰晶核化、繁生; 云雨转化, 冰霰转化, 霰雹转化, 雨冻结成霰, 霰、雹、冰融化成雨; 冰晶碰并, 雨滴碰并, 雹的湿增长极限过程等。其中微物理过程参数化的具体方程组以及各种水成物粒子谱和下落末速度公式详见文献 (胡志晋等, 1987), 本文不再赘述。

在已有的微物理参数化方案的基础上, 本文选用 Liu and Penner (2005) 发展的冰晶核化参数化方案 (简称 LP 方案) 取代原来模式中所采用的游来光和石安英 (1964) 通过云室观测得到的经验公式 (简称 YS 方案), 并通过模拟对比试验, 探讨两种方案在云微物理过程中的差异。因此除参数化方案外, 模式中还需考虑气溶胶成分。在 LP 方案中气溶胶通过同质核化或作为冰核异质核化直接形成冰晶, 此外, 气溶胶也可充当云凝结核形成云滴, 但气溶胶—云滴这部分工作已完成, 详见文献 (王宁宁等, 2013a, 2013b), 本文不再赘述。

2.2 气溶胶设置

参考 Liu and Penner (2005) 的做法, 气溶胶暂作为背景场, 只是为核化过程提供初始分布, 而不作为模式中新的预报量。将气溶胶简单分为硫酸盐气溶胶、沙尘气溶胶和粉尘气溶胶, 不考虑气溶胶的谱分布, 仅考虑了气溶胶的数浓度。考虑到布朗运动和重力沉降作用, 气溶胶随高度的增加按指数关系递减 (Yin et al., 2000; 王宁宁等, 2013b)。其指数递减率为

$$A_n(z) = A_0 \times \exp(-z/2.0), \quad (1)$$

其中, A_0 表示高度 $z=0$ 时的气溶胶数浓度, A_n 表示不同高度对应的气溶胶数浓度。对气溶胶各个网格点初始化时, 模式假设各层气溶胶数浓度是均匀分布的, 所以只需给出地面气溶胶的初始浓度就可算出整个空间的气溶胶分布。

2.3 新冰晶核化方案

自然云通常是固、液相混合云, 冰晶是形成其他大冰相粒子的“胚胎”, 在冰相云微物理过程中有着重要作用 (黄美元和徐华英, 1999), 因此, 合理确定冰晶数浓度就非常重要。LP 方案考虑了与核化有关的诸多因素, 下面简单介绍一下耦合进云模式中的新核化方案。LP 方案结合了 Meyers et al.

(1992, 1994)、Liu and Penner (2002) 给出的接触冻结核化、浸润核化、沉积核化计算理论, Kärcher and Lohmann (2002a, 2002b) 通过实验室实验得到的硫酸盐同质核化方案, 以及 Kärcher and Lohmann (2003) 在同质核化框架下得到的异质核化方案等。该方案中发生同质核化的为硫酸盐气溶胶, 发生异质核化的为粉尘气溶胶和沙尘气溶胶。在一定温度和上升速度情况下, 若有冰核的帮助, 异质核化能发生在过饱和度 (相对于冰) 较低情况下, 若冰核数目较少 (小于 10 L^{-1}), 生成的冰晶少, 对水汽的消耗相对也小, 过饱和度还可以继续上升, 当过饱和度达到同质核化所要求时 (至少 0.4 以上), 同质核化便可发生。通常过冷气溶胶溶液滴浓度很高, 一旦有同质核化发生, 便生成大量冰晶, 过饱和度立即下降。因此, 同质核化持续时间很短。若冰核的数浓度足够多, 异质核化生成的冰晶可阻止上升到同质核化所需的过饱和度, 同质核化不再发生, 可见同质核化和异质核化之间还存在竞争关系 (Liu and Penner, 2005; Barahona and Nenes, 2009)。在 LP 方案中, 在给定的气溶胶数浓度和气块儿上升速度情况下, 首先依据温度判断同质核化是否会发生, 这个温度阈值 (定义为 T_c) 是气溶胶数浓度和上升风速的函数, 当气块儿温度高于 T_c 时, 同质核化不可能发生, 冰晶来自异质核化。当温度小于 $T_c - 5$ 时, 同质核化发生, 冰晶主要来自同质核化, 仅由同质核化计算。当温度在 $T_c - 5$ 到 T_c 之间时, 为过度区间, 由同质核化和异质核化共同计算。下面简单介绍参数方案主要步骤。

(1) 求温度阈值:

$$T_c = [12.884 - 1.4938 \times \ln(N_{\text{dust+soot}})] \times \ln(w) - 10.41 \times \ln(N_{\text{dust+soot}}) - 67.69, \quad (2)$$

其中, $N_{\text{dust+soot}}$ 表示总的沙尘气溶胶和粉尘气溶胶的数浓度 (m^{-3}), w 为上升速度 (m s^{-1}), T_c 表示温度阈值, 单位采用 $^{\circ}\text{C}$ 。

(2) 若 $-64.0 \leq T \leq T_c - 5.0$, 可能发生同质核化:

$$H_{Rw} = (6 \times 10^{-4} \times \ln(w) + 6.6 \times 10^{-3}) \times T^2 + (6 \times 10^{-2} \times \ln(w) + 1.052) \times T + (1.68 \times \ln(w) + 129.35), \quad (3)$$

H_{Rw} 为湿度阈值, 若气块湿度超过阈值 H_{Rw} , 同质核化才发生, 方案中, 将同质核化分成两类情况分别处理。一是冰晶快速增长, 二是冰晶缓慢增长。依据温度和上升速度的关系, 判断属于哪种情况。

(一) 当 $T > 6.07 \times \ln(w) - 55.0$ 时, 冰晶快速增长, 冰晶快速增长公式为

$$N_{ia} = \min[\exp(a_2) \times N_a^{a_1} \times \exp(b \times T) \times w^c, N_a], \quad (4)$$

$$\begin{cases} b = b_1 \times \ln(N_a) + b_2, \\ c = c_1 \times \ln(N_a) + c_2, \end{cases} \quad (5)$$

(二) 当 $T \leq 6.07 \times \ln(w) - 55.0$ 时, 冰晶增长缓慢, 冰晶慢增长公式为

$$N_{ia} = \min\{\exp[a_2 + (b_2 + b_3 \times \ln(w)) \times T + c_2 \times \ln(w)] N_a^{a_1 + b_1 \times T + c_1 \times \ln(N_a)}, N_a\}, \quad (6)$$

其中, a_1 、 a_2 、 b_1 、 b_2 、 b_3 、 c_1 、 c_2 为给定系数或是与风速、温度有关的量, N_a 表示硫酸盐气溶胶的数浓度 (m^{-3}), N_{ia} 表示硫酸盐气溶胶同质核化生成的冰晶数浓度。

(3) 若 $T_c \leq T \leq -5.0$ 发生异质核化

(一) 沙尘气溶胶发生沉积核化, 计算公式为 $N_{id} = 1 \times 10^{-3} \times \exp\{-0.639 + 0.1296[100 \times (H_{Ri} - 1)]\}$, (7)

其中, H_{Ri} 为冰面相对湿度, N_{id} 表示沙尘气溶胶异质核化生成的冰晶数浓度。

(二) 粉尘气溶胶发生浸润核化, 计算公式为

$$N_{is} = \min\{\exp(a_{22}) \times N_s^{b_{22}} \times \exp(b \times T) \times w^c, N_s\}, \quad (8)$$

$$b = (a_{11} + b_{11} \times \ln N_s) \times \ln(w) + (a_{12} + b_{12} \times \ln N_s), \quad (9)$$

$$c = a_{21} + b_{21} \times \ln N_s, \quad (10)$$

其中, a_{11} 、 a_{12} 、 a_{21} 、 a_{22} 、 b_{11} 、 b_{12} 、 b_{21} 、 b_{22} 为给定系数, N_s 表示粉尘气溶胶的数浓度 (m^{-3}), N_{is} 表示粉尘气溶胶异质核化生成的冰晶数浓度。

(4) $T_c - 5.0 < T < T_c$ 同质核化和异质核化同时发生

(一) $T < -40.0^{\circ}\text{C}$ 并且 $w > 1.0 \text{ m s}^{-1}$, 同质核

化占主导抑制异质核化的发生, 只考虑同质核化。

(二) 其他情况下两者同时发生, 冰晶数浓度的计算公式为

$$N_i = (N_{id} + N_{is}) \times (N_{id} + N_{is}) / N_{ia}^{(T-T_c)^{5.0}}, \quad (11)$$

其中 N_i 表示同质核化和异质核化同时发生时生成的冰晶数浓度。

(5) 冰晶比浓度和比含水量的计算公式为

$$H_i = N_{ice} \times 10^6 / \rho, \quad (12)$$

$$Q_i = H_i \times m_{i0}, \quad (13)$$

其中, N_{ice} 为气溶胶核化生成的冰晶数浓度, ρ 表示空气密度, $m_{i0}=10^{-10}$ g 为单个冰晶的质量, H_i 和 Q_i 分别表示最终计算得到的冰晶比浓度和比含水量。

2.4 背景场介绍

图 1 为 2005 年 6 月 10 日 20:00 (北京时, 下同) 长春站环境温、湿层结, 0°C 层位于 685 hPa 左右, 地面温度为 21°C 左右, 露点温度为 14°C 左右。低层大气相对湿度为 40%~75%, 在 400~600 hPa 间层结呈现弱的热力不稳定状态。周志敏等 (2012) 使用三维强风暴冰雹分档模式对此探空个例进行了模拟和分析证明为强降雹个例, 且该次对流过程发展迅速且强烈, 过程伴有雷鸣和闪电, 表明云内电场能发展到击穿阈值, 因此该探空曲线适合用来模拟一次雷暴过程。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, 中心位于模拟区域中心左侧, 高度为 1 km 的格点上, 垂直扰动半径为 40 km, 水平扰动半径为 6 km,

温度扰动和湿度扰动分别取 0.5 K 和 72%, 从中心向外以余弦函数递减。模式的计算域为 $76 \text{ km} \times 20 \text{ km}$, 模拟时间为 80 min, 时间步长 2 s。地面气溶胶的初始浓度参考 2006 年春季飞机在天津—唐山一带进行航测得到的观测资料 (杨素英等, 2010), 沙尘气溶胶和硫酸盐气溶胶的地面初始浓度取 100 m^{-3} , 粉尘气溶胶地面初始浓度取 10 m^{-3} 。

3 结果分析

3.1 冰晶比含水量的空间分布对比验证

在耦合新冰晶核化方案的二维起、放电云模式的基础上, 对 YS 经验公式和 LP 方案进行对比验证。核化方案直接影响冰晶空间分布, 其他微物理过程受冰晶核化的影响发生不同程度的变化, 进而造成水成物粒子空间分布发生调整, 因此有必要将模拟得到的冰晶空间分布与国内外一些模拟和观测结果进行对比验证。若 LP 方案得到的冰晶空间分布正确, 本文认为由核化引起的其他云内水成物粒子 (云滴、雨滴、霰、雹) 空间分布变化也是合理的。

图 2 给出了 LP 方案和 YS 方案 Q_i 在 31、35、45、55、65、75 min 的空间分布。从图 2 可以明显看出: (1) 在冰晶发生核化的初始阶段 (雷暴云发展至 31~40 min), 两种不同核化方案背景下, 冰晶出现的高度差异明显, 其中 LP 方案下的冰晶中心高度在 6 km 左右, 而 YS 方案冰晶则出现在 8 km

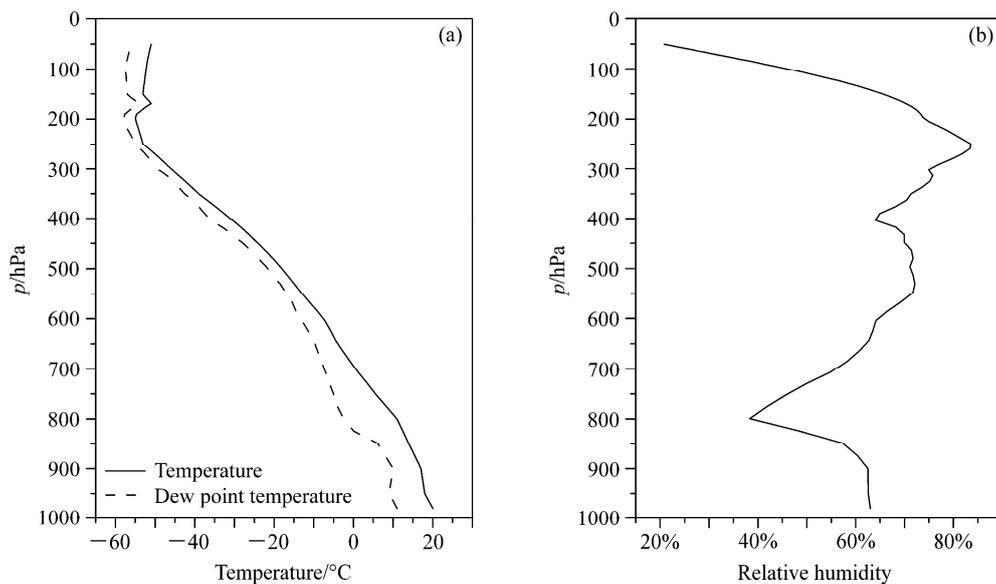


图 1 环境温、湿层结: (a) 露点温度和环境温度; (b) 相对湿度

Fig. 1 Environment temperature and humidity stratification: (a) The dew point temperature and environmental temperature; (b) the relative humidity

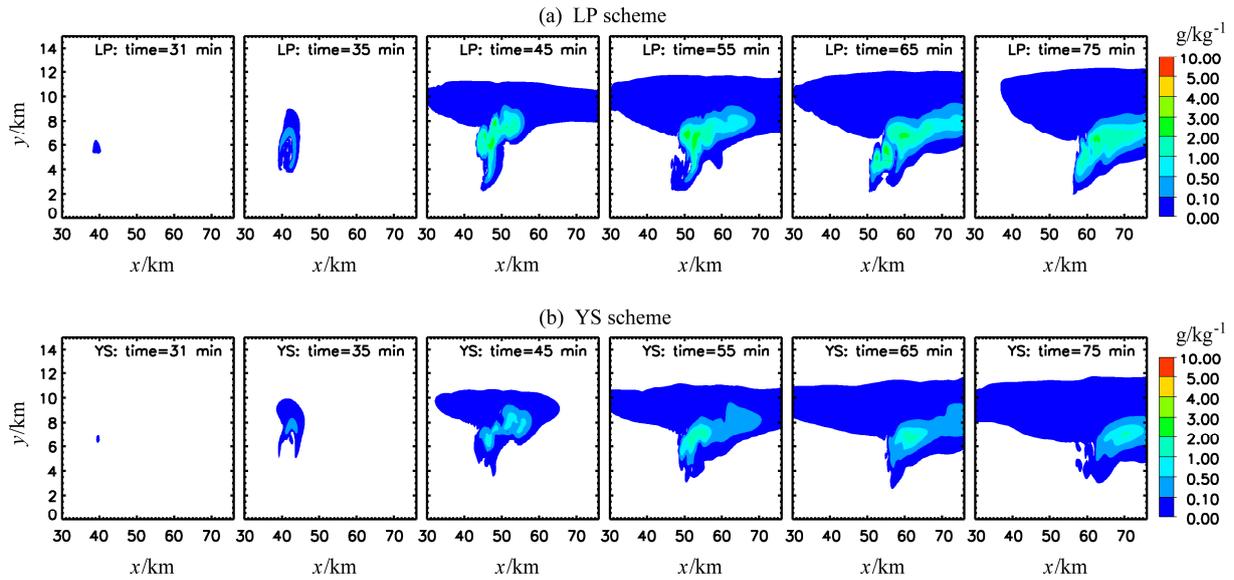


图2 冰晶比含水量的空间分布: (a) 冰晶核化参数化方案 (LP 方案); (b) 云室观测经验公式 (YS 方案)

Fig. 2 The specific water content distribution of the ice crystal: (a) ice crystal nucleation empirical formula (LP scheme); (b) cloud chamber observation experience formula (YS scheme)

左右, 相比 YS 方案, LP 方案中浓度大于 0.1 g kg^{-1} 的冰晶垂直空间分布区域更大; (2) 40~65 min 为核化发展最为旺盛阶段, LP 方案和 YS 方案下模拟得到的冰晶空间分布情况存在明显区别, LP 方案中冰晶空间分布区域大于 YS 方案, 除 45 min 在 10 km 左右处的冰晶水平分布增大外, 此阶段浓度大于 0.5 g kg^{-1} 的冰晶垂直高度区间同样增加明显, 例如: 在 45 min 时刻, 耦合 LP 方案后浓度大于 0.5 g kg^{-1} 冰晶的垂直分布区间由 YS 方案中的 6.0~8.8 km 范围变为 3.3~9.0 km, 此外, 在旺盛阶段 LP 方案中的冰晶最大浓度值大于 YS 方案; (3) 在雷暴云消散阶段 (65~75 min), 浓度大于 0.5 g kg^{-1} 的冰晶存在高度区间和最大浓度值依然大于 YS 方案。

为了更加细致的了解两种不同冰晶核化方案对冰晶空间分布的影响, 表 1 给出了 Q_i 在不同时刻对应的空间分布高度和温度区间。从表 1 可以看出: (1) 雷暴云发展至 35 min 时 (冰晶核化发生初始阶段), LP 方案中浓度大于 0.1 g kg^{-1} 的冰晶分布在 4.2~7.5 km 高度区间以及 $-14.6 \sim -40.7^\circ\text{C}$ 温度区间, YS 方案则分布在 7.2~8.4 km, $-39.2 \sim -46.9^\circ\text{C}$, 因此, LP 方案和 YS 方案高度区间段和温区段分别为 3.3 km, 26.1°C 和 1.2 km, 7.7°C , LP 方案高度区间段是 YS 方案的 2.8 倍, 温度区间

段是 YS 方案的 3.4 倍; (2) 40~65 min 为核化发展旺盛阶段, 来自 LP 方案中的浓度大于 0.5 g kg^{-1} 的冰晶垂直空间分布为: 3.3~9.0 km, $-7.6 \sim -50.1^\circ\text{C}$, 而 YS 方案中其分布在 5.5~9.0 km, $-24.2 \sim -50.1^\circ\text{C}$, 即 LP 方案和 YS 方案高度区间段和温区段分别为 5.7 km, 42.5°C 和 3.5 km, 25.9°C , 此时 LP 方案高度区间段和温度区间段是 YS 方案的 1.6 倍; (3) 在雷暴云的消散阶段 (65~80 min), 不同方案中浓度大于 0.5 g kg^{-1} 的冰晶空间分布同样存在差异, LP 方案 (高度区间: 3.5~8.5 km, 温度区间: $-9.1 \sim -49.1^\circ\text{C}$) 和 YS 方案 (高度区间: 5.9 km~8.7 km, 温度区间: $-27.8 \sim -48.5^\circ\text{C}$) 高度区间段和温度区间段分别为 5.0 km, 40.0°C 和 2.8 km, 20.7°C , LP 方案高度区间段是 YS 方案的 1.8 倍, 温度区间段是 YS 方案的 1.9 倍。从整体来看, LP 方案得到的冰晶空间分布高度和温度区间分别在 3.3~9.0 km, $-50.1 \sim -7.6^\circ\text{C}$ 范围内, YS 方案背景下核化发生在 5.5~9.0 km, $-50.1 \sim -24.2^\circ\text{C}$ 。

由此可见, 在雷暴云整个发展过程中, 与 YS 方案相比 LP 方案得到的冰晶高度以及温度分布区间要更大。YS 方案产生的冰晶主要集中在低温区 (小于 -25°C), 在大于 -25°C 的温区几乎没有冰晶存在, 而 LP 方案在高温区 (大于 -25°C) 和低

温区 (小于 -25°C) 均有大量冰晶存在, 且 LP 方案在整个雷暴云的发展过程中冰晶的分布高度、温度区间以及最大浓度值均大于 YS 方案。

表 1 LP 和 YS 方案值较大的 Q_i 在不同时刻的分布高度和温区

Table 1 The height and temperature region of the larger value Q_i of LP and YS schemes at different time

模拟时间/min	Q_i 对应的高度/km		Q_i 对应的温区/ $^{\circ}\text{C}$	
	LP 方案	YS 方案	LP 方案	YS 方案
35	4.2~7.5	7.2~8.4	-14.6~-40.7	-39.2~-46.9
40	5.0~8.5	7.5~9.0	-20.3~-49.1	-40.7~-50.1
45	3.3~9.0	6.0~8.8	-7.6~-50.1	-28.3~-49.1
50	3.5~8.6	5.7~8.5	-9.1~-48.2	-26.0~-49.1
55	3.7~8.5	5.5~8.0	-10.9~-49.1	-24.2~-44.0
60	4.0~8.5	5.6~8.7	-13.2~-49.1	-25.0~-48.5
65	3.6~8.2	5.7~7.6	-9.4~-45.2	-26.0~-43.9
70	3.5~8.5	5.9~7.7	-9.1~-49.1	-27.8~-41.8
75	3.6~7.7	6.0~7.8	-9.4~-41.8	-28.3~-42.8
80	3.5~7.9	6.0~8.7	-9.1~-43.2	-28.3~-48.5

注: 表中的高度和温区仅考虑了值较大的 Q_i (模拟时间 35 min 为 Q_i 大于 0.1 g kg^{-1} 的分布, 其余时刻均为 Q_i 大于 0.5 g kg^{-1} 的分布)

模式中 Q_i 有关的源项为核化过程、冰晶繁生以及新生冰晶和云滴的碰并, 而核化产生的冰晶量远远大于其他两项, 对 Q_i 产生影响的主要为核化过程 (孔凡铀等, 1991a, 1991b)。模式中冰晶比浓度变化率和单个冰晶质量 (模式中冰晶质量取定值) 的乘积为比含水量变化率, 所以核化产生的冰晶数浓度直接影响 Q_i 的空间分布。因此造成以上现象的主要原因是不同冰晶核化方案得到的冰晶谱不同进而造成 Q_i 空间分布差异很大 (Fletcher, 1962; Huffman, 1973; Meyers et al., 1992; 肖辉等, 2012)。YS 方案中基于云室观测得到的冰晶谱分布很难观测到每个温度下的冰晶数浓度, 只是按照温度高低选取几个温度, 记录冰晶的日变化, 根据这几个高低不同温度所对应的冰晶数浓度的变化趋势建立与温度相关的函数关系, 但由于气溶胶种类不同以及随高度变化的空间分布, 温度、湿度、压强等随高度的变化, 以及不同地区不同条件下冰核谱分布的差异等, 所以传统的以温度为函数的 YS 经验公式存在不准确性 (游来光和石安英, 1964; 杨磊等, 2013)。原方案采用 YS 经验公式随温度的降低呈 e 指数递增, 只是针对具体条件对某些参数进行了修订和限制如在云水含量较低或过饱和度为 0 的空间, 核化不发生, 在温度大于 -40°C 时, 冰晶数浓

度随着温度的降低而增加, 低于 -40°C 时按照 -40°C 计算, 所以在高温区 (大于 -25°C), 核化产生的冰晶量极少, 在 -40°C 左右为冰晶主要集中的温区, 而 LP 方案中用气溶胶计算冰晶数浓度, 生成的冰晶数浓度与温度、过饱和度和上升风速等多个量相关, 所以冰晶数浓度并不同经验公式随着温度的降低而增加, 它与温度并无直接的相关性, 而是与风速、相对与冰的过饱和度, 和气溶胶数浓度、温度等多个物理量有关, 考虑的更为全面 (Heymsfield and Sabin, 1989; Meyers et al., 1992; Gultepe et al., 2000)。

关于冰晶分布已有大量的模拟和探测资料, 许多学者 (Cooper, 1980; Saunders and Al-Naimi, 1985; Meyers et al., 1992; Heymsfield and Milosheovich, 1993; Ryan, 2000) 收集飞机观测和云室结果, 研究显示冰晶数浓度主要集中在 10^6 m^{-3} , 它并不是随着温度的降低而呈 e 指数增加, 并未发现冰晶数浓度和温度之间很好的相关性。由于 YS 方案冰晶数浓度随温度的降低呈 e 指数增加造成核化主要发生在低温区 (小于 -25°C), 显然 YS 方案高估了低温区冰晶的核化能力。此外, YS 方案在高温区 (大于 -25°C) 几乎无冰晶的存在, 但研究发现气溶胶粒子在云水过饱和度更高的条件下, 在大于 -12°C 时可自发发生核化产生高达 10^6 m^{-3} 的冰晶浓度, 沙尘气溶胶在低于 -8°C 时通过接触冻结核化、低于 -15°C 发生凝华核化 (Rangno and Hobbs, 1985; Levin et al., 2005; 李磊, 2007), 可见 YS 方案中基于云室观测得到的经验公式低估了高温区 (大于 -25°C) 冰晶核化能力, 此外许多探空观测也证实了这一点, 如 CCOPE 实验、自动光学冰粒子计数器和二维云探针测量和观测以及一些资料统计结果证明冰晶在云中 $-15 \sim -4^{\circ}\text{C}$, 平均浓度在 $4 \times 10^5 \text{ m}^{-3}$ 左右, 最高浓度可达 10^6 m^{-3} 左右 (Turner and Radke, 1973; Knollenberg, 1981)。

综上所述, LP 方案中冰晶数浓度并不同 YS 方案随温度的降低呈 e 指数增加, 而是与上升风速、相对与冰的过饱和度、气溶胶数浓度、气溶胶种类和温度等多个物理量有关, 造成新核化方案和 YS 经验公式得到的 Q_i 空间分布存在明显差异, 主要体现在 LP 方案和 YS 方案冰晶核化发生的主要高度和温度区间分别集中在 $3.3 \sim 9.0 \text{ km}$, $-50 \sim -7.6^{\circ}\text{C}$ 左右和 $5.5 \sim 9.0 \text{ km}$, $-50.1 \sim -24.2^{\circ}\text{C}$ 左右, YS 方案冰晶主要集中在低温区 (小于 -25°C),

在高温区（大于 -25°C ）几乎无冰晶的存在，而 LP 方案冰晶的空间分布高度和温度区间大于 YS 方案，在高温区和低温区均分布大量的冰晶，通过对比国内外的相关探测和模拟结果来看新的核化方案要比原经验公式更为合理。

3.2 五种水成物粒子比含水量的变化

雷暴云中起、放电特征，依赖于云中微物理过程的发展和各粒子的空间分布特征，其中在非感应和感应起电机制下粒子所得到的电荷量大小、主负电荷区高度、以及电荷载体等均与各水成物粒子的空间分布相关，由此可见微物理过程的发展和各水成物粒子的空间分布特征和雷暴云的起电存在密切而又复杂的关系（言穆弘等，1996；孙平安等，2000；谢屹然等，2005），本文在二维对流云起、放电模式中耦合一个新冰晶核化方案，取代通过云室观测得到的经验公式后，致使核化过程发生变化，进而影响其他微物理过程的变化，水成物粒子空间分布和数值大小势必会改变？通过详细讨论两方案引起的不同微物理过程变化，所导致的各水成物粒子的空间分布的不同，能为继后分析雷暴云起电提供理论依据。

3.2.1 对比含水量最大值的影响

图 3 给出了各水成物最大比含水量 (Q_{\max}) 随模拟时间的变化；其中图 3a 为以 YS 经验公式计算的冰晶数浓度各水成物最大比含水量随模拟时间的变化；图 3b 为耦合了 LP 参数化方案后各水成物最大比含水量随模拟时间的变化。表 2 给出了各水

成物最大比含水量的峰值以及到达峰值的时间。

新冰晶核化方案对冰晶和霰的影响最大，进而对雨滴等含量也有很大影响。对云滴和雨滴的影响主要从 17 min 和 30 min 后开始，加入气溶胶后使云水消耗变快，雨滴在 34 min 后出现急剧下降 56 min 后又缓慢回升的过程，在 42 min 时雨滴出现 $0.0000012 \text{ g kg}^{-1}$ 的极小值。这主要是由于高温时（大于 -25°C ）LP 方案中的冰晶数浓度高于 YS 方案中的，加入气溶胶后，在温度较高的过冷区中产生大量的冰晶，争食云中的水分，由于贝吉龙效应（Bergeron），冰晶生长比过冷云滴和小雨滴快得多，使得大量过冷水提前冻结而转化到冰相粒子上，同时，减慢过冷云滴的生长及其向雨水的自动转化速率，所以云中高温冰晶数浓度高导致云中液态水提前消耗，阻止云滴的凝结增长和雨滴的长大（胡志晋等，1987）。此外，冰晶数浓度大量级集中在 35~60 min 左右，因此在 35~60 min 时，

表 2 LP 方案和 YS 方案各水成物粒子最大比含水量的峰值以及到达的时间

Table 2 Peak and arrival time of the max mass of hydrometeors of LP and YS schemes

水成物 粒子	最大比含水量的峰值/ g kg^{-1}		到达峰值的时间/min	
	LP 方案	YS 方案	LP 方案	YS 方案
云	6.19	6.26	31	30
雨	0.96	2.47	33	32
冰	3.48	2.18	48	50
霰	5.77	7.82	43	43
雹	0.0019	0.0637	44	36

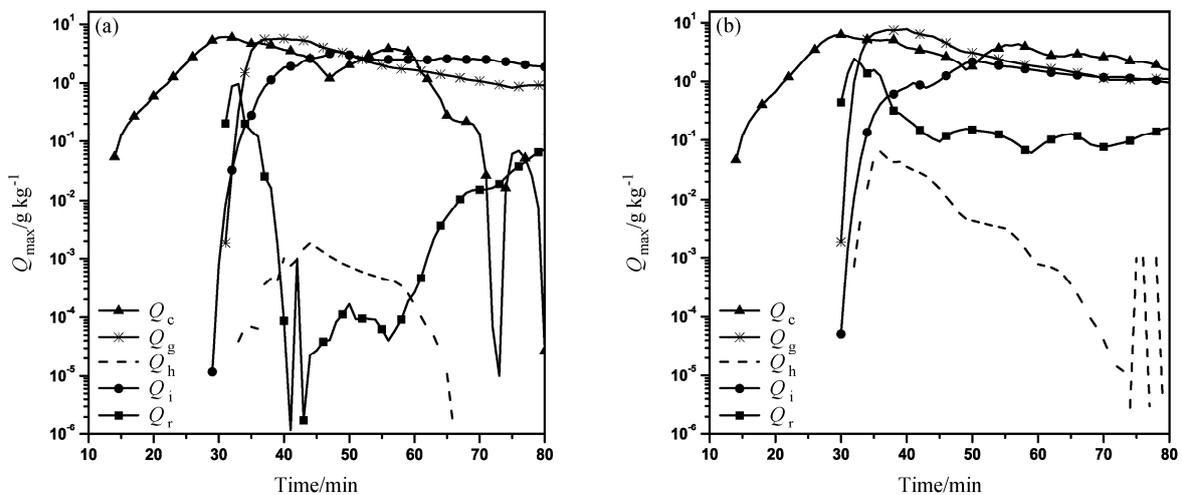


图 3 LP 方案和 YS 方案各水成物最大比含水量 (Q_{\max}) 随模拟时间的变化：(a) LP 方案；(b) YS 方案。 Q_c 、 Q_r 、 Q_i 、 Q_g 、 Q_h 分别代表云滴、雨滴、冰晶、霰、雹的比含水量

Fig. 3 The peak emergence time and value of maximum specific water content (Q_{\max}) of hydrometeors of LP and YS schemes: (a) LP scheme; (b) YS scheme

冰晶数浓度是整个雷暴云中值最大的时段, 此时有大量冰晶和雨滴发生碰撞, 消耗掉雨滴, 这是雨滴比含水量出现急剧下降的主要原因, 随后的缓慢回升是由于高空中的霰和冰晶在 0°C 层下融化造成的 (Pruppacher and Klett, 1997; 肖辉等, 2004; 刘校辰, 2006; 杨慧玲等, 2011)。

与霰比含水量有关的微物理过程繁多, 有冰晶碰并霰, 冰晶碰并雨滴, 雨滴碰并冰晶, 霰碰并云滴, 雨滴冻结成霰, 冰晶转化为霰、云滴自动转化成霰等, 对比 YS 方案, 其中造成 Q_g 值变化较大的物理过程有: 雨滴冻结成霰和冰晶和雨滴间的碰并。LP 方案得到的 Q_g 值基本均小于 YS 方案, 其主要原因是 Q_r 在这时段大幅度减小, 致使雨滴冻结成霰和雨滴碰并冰晶两个物理过程要比 YS 方案减弱很多。

从图 3 可看出: LP 方案的 Q_i 最大值基本均大于 YS 方案中的 Q_i 。冰晶核化参数化方案可以很大程度上影响核化的发生概率, 进而影响冰晶数浓度以及其他微物理过程, 不同的核化方案得到冰晶谱不同, 必然会造成 Q_i 在出现时间、峰值大小等方面差异, 如 Meyer et al. (1992) 的参数化公式, 在较暖的温区可给出较高的活化冰晶数浓度; 而 Fletcher (1962) 和 Huffman (1973) 的参数化公式, 在较低的温区则产生出较高的活化冰晶数浓度。

相比 YS 方案霰的比含水量有所减小, 与霰的形成和增长有关的过程有: 霰碰并霰, 霰自动转化, 霰的凝华增长, 雨滴碰并霰, 冰晶碰并霰等, 大多数物理过程都有不同程度的减弱, 其中减弱最为明显的是霰向霰的自动转化和霰的增长过程, 前者减弱的主要原因是, 气溶胶加入后使大霰粒子所占比例减小, 从而造成霰向霰的转化率减小; 后者减小的主要原因是, 霰的增长过程与霰比浓度和霰的直径有关, 气溶胶的加入使霰比浓度和直径均减小, 所以造成 Q_h 的减小。

3.2.2 云滴、雨滴、霰、霰比含水量空间分布的变化

如图 4 所示由 LP 方案得到的云滴和雨滴空间分布不同于 YS 方案, 造成这种现象的原因同上述造成云滴和雨滴比含水量值不同的原因, 新核化方案在温度较高的过冷区中产生大量的冰晶, 争食云中的水分, 由于贝吉龙效应, 冰晶生长比过冷云滴和小雨滴快得多, 使得大量的过冷水提前冻结而转化到各种冰相粒子上, 同时, 减慢过冷云滴的生长及其向雨水的自动转化速率, 所以云中高温冰晶数

浓度高导致云中液态水提早消耗, 阻止云滴的凝结增长和雨滴的长大。此外, 生成的冰晶和雨滴发生碰撞, 消耗掉雨滴, 这也是 LP 方案得到的雨滴在核化阶段小于由 YS 方案得到的雨滴的原因。随后雨滴的缓慢回升是由于高空中的霰和冰晶在 0°C 层下融化造成的。

除上述提到的 Q_g 值小于由 YS 方案计算得到的值外, 从图 4 可以看到另一个最大不同是 Q_g 在 4 km 以下的空间分布, LP 方案得到的 Q_g 在 40 min 时全部分布在 4 km 以上, 在 45 min 时 Q_g 全部分布在 2.3 km 以上, 在 50 min 时 Q_g 全部分布在 2.2 km 以上, 在 55 min 时 Q_g 全部分布在 2.1 km 以上, 而 YS 方案得到的 Q_g 在 40 min 时全部分布在 1.5 km 以上, 在 45 min 时 Q_g 全部分布在 0.5 km 以上, 在 50 min 时 Q_g 全部分布在 0.7 km 以上, 在 55 min 时 Q_g 全部分布在 1.0 km 以上。4 km 以下 Q_g 的空间分布主要受雨滴影响, 从图 3 可知由 LP 方案得到的雨滴在 35~60 min 为整个雷暴云峰谷阶段, 此阶段 LP 方案的 Q_r 要小于 YS 方案 4 个数量级, 因此大幅度的减弱了雨滴冻结成霰, 雨滴碰并冰晶生成霰, 雨滴碰并霰生成霰三个物理过程, 这是导致 Q_g 在 4 km 以下的空间分布不同于 YS 方案的主要原因。

由于 Q_h 的值相比其他四种水成物粒子值极小且有的时段为 0, 所以图略。LP 方案得到的霰比含水量空间分布范围和值均要小于 YS 方案, 原因同上述, 与霰有关的多个物理过程均有不同程度的减弱。

3.3 电荷结构空间分布的变化

在起电过程中, 冰晶—霰 (软霰) 的非感应碰撞过程是雷暴云中主要荷电机理, 因此冰晶的物理特征、出现时间等影响电过程的强弱、主负电荷区的高度及分布区域、和电荷载体等 (孙安平等 2002, 2004); 此外, 冰晶—霰 (软霰) 的非感应碰撞过程是雷暴云中强电场产生的根本原因, 因为感应起电需要在一定的雷暴环境电场作用下发生, 因此冰晶粒子又间接影响感应起电过程, 而气溶胶是参与冰晶形成的主要成分, 它的分布特征不仅改变高层冰晶的分布, 而且还通过核化过程影响云的微物理过程, 而雷暴云的起电机理, 依赖云中微物理过程的发展和各粒子的空间分布特征, 尤其是冰相粒子的分布特征, 由 3.1 节知, 考虑气溶胶后的核化方案得到的冰晶空间分布和原经验公式得到的冰晶

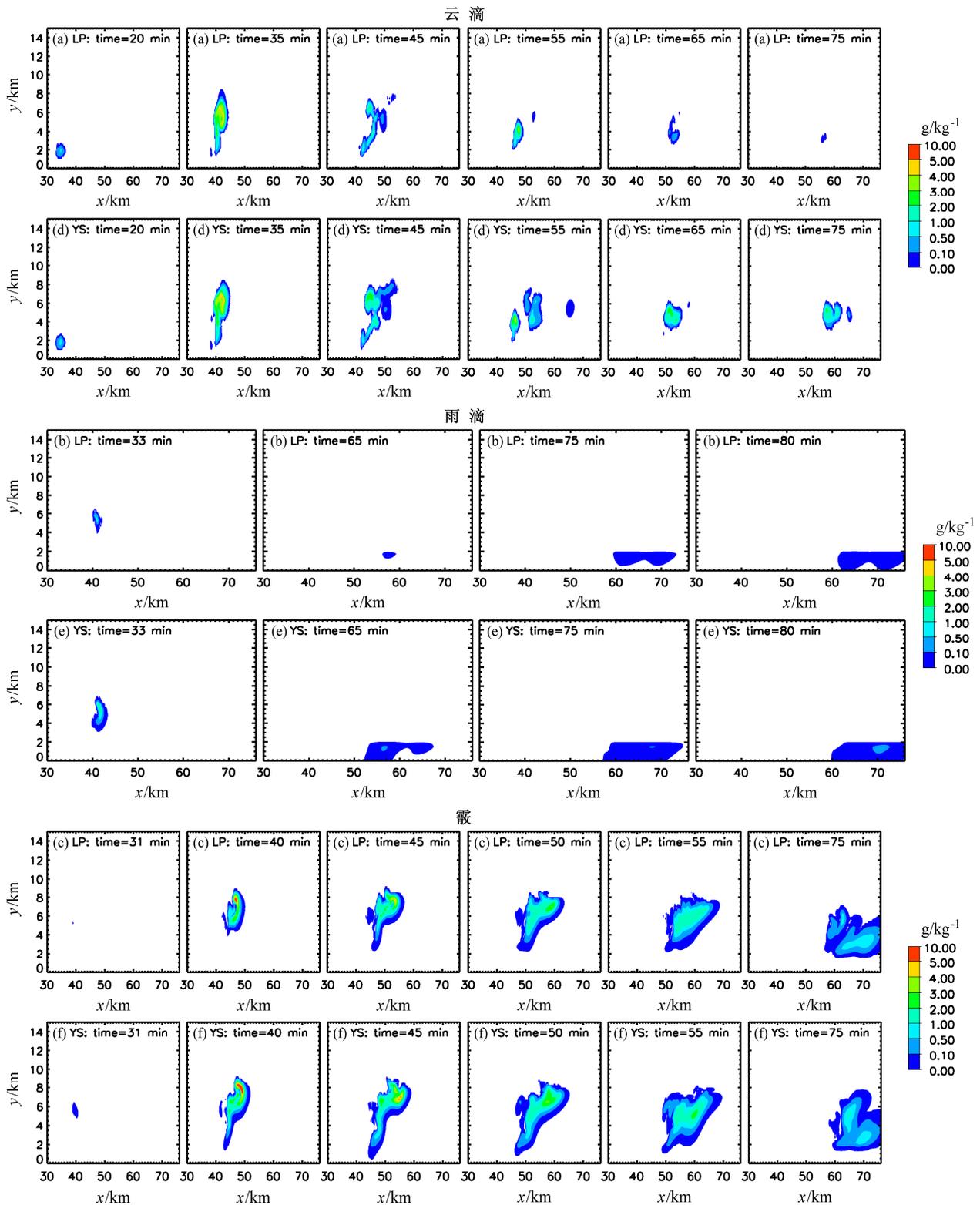


图4 云滴、雨滴、霰比含水量的空间分布: (a、b、c) LP方案; (d、e、f) YS方案

Fig. 4 The specific water content distribution of the cloud drop, rain and graupel: (a, b, c) LP scheme; (d, e, f) YS scheme

空间分布特征存在明显差别, 霰、雨滴、云滴、雹四种粒子的空间分布也略有不同, 雷暴云的起电机制与云微物理过程以及水成物粒子息息相关, 因此考

虑气溶胶后的核化方案必然对雷暴云内起电过程产生影响。

图5给出了LP方案和YS方案雷暴云在39、

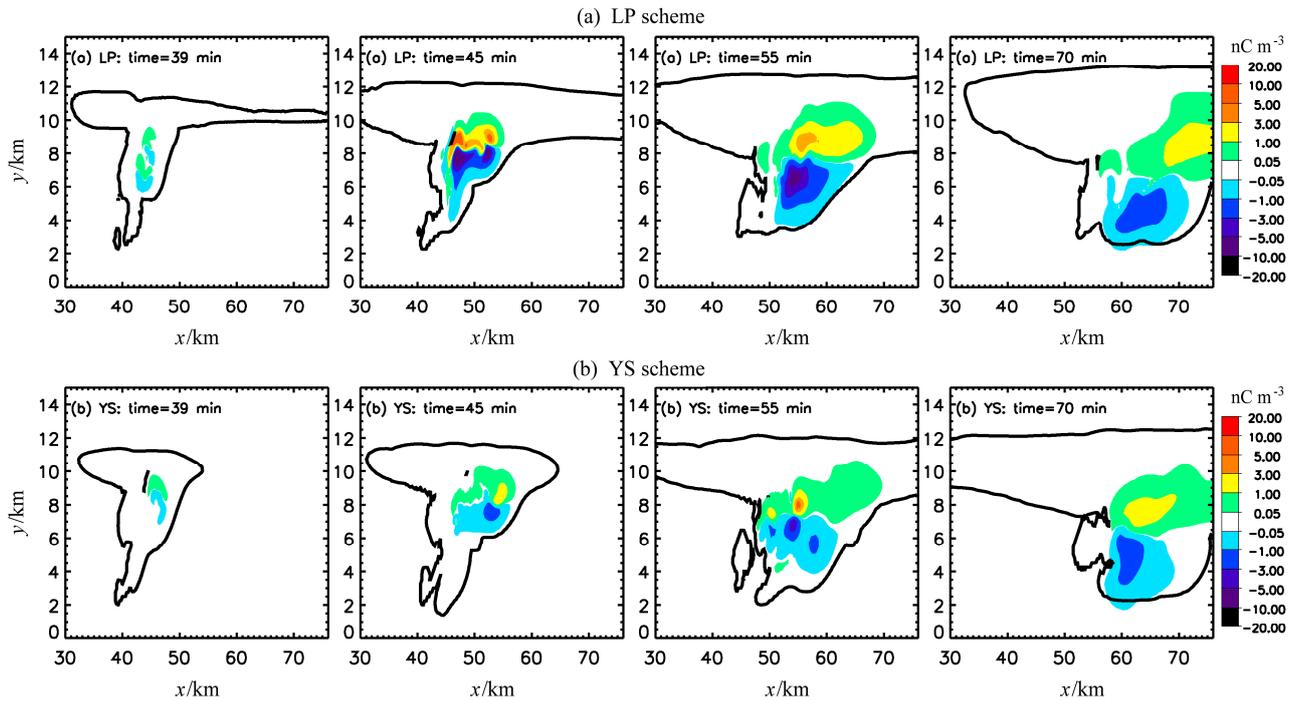


图5 电荷结构的空分布：(a) LP 方案；(b) YS 方案

Fig. 5 The charge structure distribution: (a) LP scheme; (b) YS scheme

45、55、70 min 四个时刻的空间电荷结构分布，从图 5 可以明显看出：(1) 在雷暴云初期时刻，LP 方案和 YS 方案模拟得到的电荷结构空间分布情况存在明显区别，LP 方案中为四极性电荷结构，而 YS 方案中则为偶极性电荷结构；(2) 在雷暴云发展旺盛与消散阶段（40~80 min），两种不同核化方案背景下，电荷的空间分布差异明显，LP 方案中电荷空间分布区域和电荷量均大于 YS 方案；(3) 在整个雷暴云的发展过程中两方案模拟得到的主正电荷区和主负电荷区的中心高度不同。

由此可见，在雷暴云整个发展过程中，LP 方案与 YS 方案在不同时刻得到的空间电荷在雷暴云初期结构不同，在发展旺盛与消散阶段 LP 方案中电荷空间分布区域和电荷量均大于 YS 方案，此外，在不同时刻主正电荷区和主负电荷区的中心高度不同。

4 结论

利用耦合了新冰晶核化方案的二维对流云起、放电模式对长春地区降雹型强雷暴个例的微物理特征和起电过程进行了数值模拟，验证了新的核化方案较原计算冰晶数浓度的经验公式更为合理，分析了 LP 方案的加入造成雷暴云一些微物理过程与电荷结构不同于 YS 方案的原因，得到以下结论：

(1) 冰晶数浓度在 LP 方案中与上升风速、相对与冰的过饱和度、气溶胶数浓度、气溶胶种类和温度等多个物理量有关，而在 YS 方案随温度的降低呈 e 指数增加，造成新核化方案和原经验公式得到的 Q_i 空间分布差异明显，主要体现在 LP 方案和 YS 方案冰晶核化发生的主要高度和温度区间分别集中在 3.3~9.0 km， $-50.1\sim-7.6^\circ\text{C}$ 左右和 5.5~9.0 km， $-50.1\sim-24.2^\circ\text{C}$ 左右，YS 方案冰晶主要集中在低温区（小于 -25°C ），在高温区（大于 -25°C ）几乎无冰晶的存在，而 LP 方案在高温区和低温区均分布大量的冰晶，在整个雷暴云的发展过程中 LP 方案冰晶的分布高度、温度区间以及最大浓度值均大于 YS 方案。通过对比国内外的相关探测和模拟结果来看新的核化方案要比原经验公式更加合理。

(2) 冰晶核化方案的改变使五种水成物粒子的空间分布发生了调整，相比 YS 方案的模拟结果，LP 方案中高温冰晶数浓度高导致云中液态水提早消耗，阻止云滴的凝结增长和雨滴的长大；雨滴冻结成霰、雨滴碰并冰晶生成霰、雨滴碰并霰生成霰等多个物理过程发生变化，造成 LP 方案得到的 Q_g 值小于 YS 方案，在 4 km 以下的空间分布不同于 YS 方案的模拟结果；与雹的形成和增长有关的过

程基本均有不同程度减弱, 减弱最为明显的是霰向雹的自动转化和雹的增长两个微物理过程。

(3) 雷暴云的起电机制与云微物理过程以及水成物粒子息息相关, 尤其是冰相粒子的空间分布, LP 方案与 YS 方案对云的微物理过程影响不同, 得到的冰晶空间分布差异明显, 造成在雷暴云整个发展过程中, LP 方案与 YS 方案在不同时刻得到的空间电荷在雷暴云初期结构不同, 在发展旺盛与消散阶段 LP 方案中电荷空间分布区域和电荷量均大于 YS 方案, 此外, 主正电荷区和主负电荷区的中心高度不同。

5 展望

本文利用与气溶胶有关的冰晶核化方案取代原云室观测得到的经验公式后, 通过对比模拟试验证明核化方案对云的微物理过程影响明显, 特别是冰晶的空间分布, 而雷暴云中的起电过程与冰相粒子的物理特征息息相关, 因此本文利用耦合新核化方案的云模型初步探讨了气溶胶—冰晶对雷暴云内起电过程的影响, 而气溶胶谱分布、化学成分等如何影响雷暴云起、放电过程将是下一步的工作重点。此外, 气溶胶不仅能够充当云凝结核活化成为云滴, 而且可以成为冰核核化生成冰晶粒子, 而云滴和冰晶是雷暴云中主要荷电贡献粒子, 因此气溶胶如何影响雷暴云起电过程、电荷结构等成为今后的主要工作方向。

参考文献 (References)

- Barahona D, Nenes A. 2009. Parameterizing the competition between homogeneous and heterogeneous freezing in ice cloud formation—Polydisperse ice nuclei [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 9 (16): 5933–5948.
- Blyth A M, Latham J. 1993. Development of ice and precipitation in New Mexican summer time cumulus clouds [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 119 (509): 91–120.
- 陈丽, 银燕, 杨军, 等. 2007. 沙尘气溶胶对云和降水影响的模拟研究 [J]. *南京气象学院学报*, 30 (5): 590–600. Chen Li, Yin Yan, Yang Jun, et al. 2007. Effects of sand dust particles on cloud and precipitation: A numerical study [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese)*, 30 (5): 590–600.
- Cooper W A. 1980. A method of detecting contact ice nuclei using filter samples [C]. Preprints, Eighth International Conf. on Cloud Physics, Clermont-Ferrand, France, 665–668.
- Fan J, Zhang R, Li Guohui, et al. 2007. Effects of aerosols and relative humidity on cumulus clouds [J]. *J. Geophys. Res.*, 112: D14204, doi:10.1029/2006JD008136.
- 房文, 郑国光. 2011. 巨核对暖云降水影响的模拟研究 [J]. *大气科学*, 35 (5): 938–944. Fang Wen, Zheng Guoguang. 2011. The effect of giant cloud condensation nuclei on warm-cloud precipitation [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 35 (5): 938–944.
- Fletcher N H. 1962. *Physics of Rain Clouds* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 386pp.
- Gonçalves F L T, Martins J A, Albrecht R I. 2012. Effect of bacterial ice nuclei on the frequency and intensity of lightning activity inferred by the BRAMS model [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 12 (13): 5677–5689.
- Gultepe I, Isaac G A, Hudak D, et al. 2000. Dynamical and microphysical characteristics of Arctic clouds during BASE [J]. *J. Climate*, 13 (7): 1225–1254.
- Heymsfield A J, Sabin R M. 1989. Cirrus crystal nucleation by homogenous freezing of solution droplets [J]. *J. Atmos. Sci.*, 46 (14): 2252–2264.
- Heymsfield A J, Milosovich L M. 1993. Homogenous ice nucleation and supercooled liquid water in orographic wave clouds [J]. *J. Atmos. Sci.*, 50 (15): 2335–2353.
- 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 Zhijin, He Guanfang. 1987. Numerical simulation of microprocesses in cumulonimbus cloud (I)—Microphysical model [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 45 (4): 467–484.
- 黄美元, 徐华英. 1999. 云和降水物理 [M]. 北京: 科学出版社, 218–291. Huang Meiyuan, Xu Huaying. 1999. *Physics of Cloud and Precipitation* [M]. Beijing: Science Press (in Chinese), 218–291.
- Huffman P. 1973. Supersaturation dependence of ice nucleation by deposition for silver-iodide and natural aerosols [J]. *DAI.*, 34 (05): 2224.
- Kärcher B, Lohmann U. 2002a. A parameterization of cirrus cloud formation: Homogeneous freezing of supercooled aerosols [J]. *J. Geophys. Res.*, 107 (D2): AAC 4-1–AAC 4-10, doi:10.1029/2001JD000470.
- Kärcher B, Lohmann U. 2002b. A parameterization of cirrus cloud formation: Homogeneous freezing including effects of aerosol size [J]. *J. Geophys. Res.*, 107 (D23): AAC 9-1–AAC 9-10, doi:10.1029/2001JD001429.
- Kärcher B, Lohmann U. 2003. A parameterization of cirrus cloud formation: Heterogeneous freezing [J]. *J. Geophys. Res.*, 108 (D14), doi:10.1029/2002JD003220.
- Khain A P. 2009. Notes on state-of-the-art investigations of aerosol effects on precipitation: A critical review [J]. *Environ. Res. Lett.*, 4 (1): 15004, doi:10.1088/1748-9326/4/1/015004.
- Khain A, Rosenfeld D, Pokrovsky A. 2005. Aerosol impact on the dynamics and microphysics of deep convective clouds [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 131 (611): 2639–2663.
- Knollenberg R G. 1981. *Techniques for probing cloud microstructure* [M]// *Cloud, Their Formation, Optical Properties and Effects*, Hobbs P V, Deepak A, Eds. New York: Academic Press, 15–91.
- 孔凡铀, 黄美元, 徐华英. 1991a. 冰相过程在积云发展中的作用的三维数值模拟研究 [J]. *中国科学: 化学*, 21 (9): 1000–1008. Kong Fanyou, Huang Meiyuan, Xu Huaying. 1991a. The 3D numerical simulation study on effect of ice phase processes in convective cloud in cumulus developing [J]. *Science China: Chemistry (in Chinese)*, 21 (9): 1000–1008.
- 孔凡铀, 黄美元, 徐华英. 1991b. 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. 1991b. 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.
- Krämer M. 2009. Ice supersaturations and cirrus cloud crystal numbers [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 9: 3505–3522.
- Levin Z, Teller A, Ganor E. 2005. On the interactions of mineral dust, sea-salt particles, and clouds: A measurement and modeling study from the Mediterranean Israeli Dust Experiment campaign [J]. *J. Geophys. Res.*, 110: D20202, doi:10.1029/2005JD005810.
- 李娟, 毛节泰. 2006. 冰晶性质对卷云辐射特征影响的模拟研究 [J]. *气象*, 32 (2): 9–13. Li Juan, Mao Jietai. 2006. Simulation about influences of ice property changes on cirrus radiative properties [J]. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 32 (2): 9–13.
- 李磊. 2007. 沙尘气溶胶作为冰核影响区域降水的数值研究 [D]. 南京信息工程大学硕士论文. Li Lei. 2011. The Numerical Study of the Effects of Dust Aerosols as Atmospheric Ice Nucleation Regional Precipitation [D]. M. S. thesis (in Chinese), Nanjing University of Information Science and Technology.
- 刘校辰. 2006. 气溶胶对暖云影响的数值模拟 [D]. 中国气象科学研究院硕士论文. Liu Xiaochen. 2006. Numerical Modeling of Aerosols Effects on Warm Cloud [D]. M. S. thesis (in Chinese), Chinese Academy of Meteorological Sciences.
- Liu X H, Penner J E. 2002. Effect of Mount Pinatubo H_2SO_4/H_2O aerosol on ice nucleation in the upper troposphere using a global chemistry and transport model [J]. *J. Geophys. Res.*, 107, doi:10.1029/2001JD000455.
- Liu X H, Penner J E. 2005. Ice nucleation parameterization for global models [J]. *Meteorol. Z.*, 14 (4): 499–514.
- 马明. 2004. 雷电与气候变化相互关系的一些研究 [D]. 中国科学技术大学博士学位论文. Ma Ming. 2004. A study of the relationship between lightning activity and climatic variation [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese). University of Science and Technology of China.
- 毛节泰, 李成才. 2005. 气溶胶辐射特性的观测研究 [J]. *气象学报*, 63 (5): 622–635. Mao Jietai, Li Chengcai. 2005. Observation study of aerosol radiative properties over China [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 63 (5): 623–635.
- Meyers M P, DeMott P J, Cotton W R. 1992. New primary ice-nucleation parameterizations in an explicit cloud model [J]. *J. App. Meteor.*, 31: 708–721.
- Meyers M P, Demott P J, Cotton W R. 1994. Parameterization and impact of ice initiation processes relevant to numerical model simulations of cirrus clouds [J]. *J. Atmos. Sci.*, 51: 77–90.
- Morris C E, Georgakopoulos D G, Sands D C. 2004. Ice nucleation active bacteria and their potential role in precipitation [J]. *J. Phys. IV*, 121: 87–103.
- Murray B J, Wilson T W, Dobbie S, et al. 2010. Heterogeneous nucleation of ice particles on glassy aerosols under cirrus conditions [J]. *Nat. Geosci.*, 3 (4): 233–237.
- Pruppacher H R, James D K, Pao K W. 1998. Microphysics of clouds and precipitation [J]. *Aerosol Sci. Tech.*, 28 (4): 381–382, doi:10.1080/02786829808965531.
- Rangno A L, Hobbs P V. 1985. Ice particle concentrations in clouds [J]. *J. Atmos. Sci.*, 42 (23): 2523–2549.
- Rangno A L, Hobbs P V. 1994. Ice particle concentrations and precipitation development in small continental cumuliform clouds [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 120 (517): 573–601.
- Rawlins F. 1981. A numerical study of thunderstorm electrification using a 3D model incorporating the ice phase [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 108: 779–800.
- Ryan B F. 2000. A bulk parameterization of the ice particle size distribution and the optical properties in ice clouds [J]. *J. Atmos. Sci.*, 57: 1436–1451.
- Saunders C P R, Al-Naimi R. 1985. Measurements of natural deposition and condensation-freezing ice-nuclei with a continuous-flow chamber [J]. *Atmos. Environ.*, 19 (11): 1871–1882.
- Segal Y, Pinsky M, Khain A. 2007. The role of competition effect in the raindrop formation [J]. *Atmos. Res.*, 83 (1): 106–118.
- 孙安平, 言穆弘, 张义军, 等. 2002. 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 Yijun, et al. 2002. Numerical study of thunderstorm electrification with a three-dimensional dynamics and electrification on coupled model. I: Model description and parameterization of electrical process [J]. *Quarterly Journal of Meteorology* (in Chinese), 60 (6): 722–731.
- 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.
- 谭涌波, 陶善昌, 祝宝友, 等. 2006. 雷暴云内闪电双层、分支结构的数值模拟 [J]. *中国科学: 地球科学*, 36 (5): 486–496. Tan Yongbo, Tao Shanchang, Zhu Baoyou. 2006. The numerical simulation of thundercloud lightning double and branch structure [J]. *Science China: Earth Science* (in Chinese), 36 (5): 486–496.
- 谭涌波, 陶善昌, 祝宝友. 2007. 云闪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. 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.
- 谭涌波, 师正, 王宁宁, 等. 2012. 随机性与电环境特征对闪电击地点影响的数值模拟 [J]. *地球物理学报*, 55 (11): 3534–3541, doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.11.003. Tan Yongbo, Shi Zheng, Wang Ningning, et al. 2012. Numerical simulation of the effects of randomness and characteristics of electrical environment on ground strike sites of cloud-to-ground lightning [J]. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 55 (11): 3534–3541.
- Tan Y B, Tao S C, Zhu B Y. 2006. Fine-resolution simulation of the channel structures and structures and propagation features of intracloud lightning [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 33: L09809, doi:10.1029/2005GL025523.
- Thompson G P, Field R, Rasmussen R M, et al. 2008. Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part II: Implementation of a new snow parameterization [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 136 (12): 5095–5115, doi:10.1175/2008MWR2387.1.
- Turner F M, Radke L F. 1973. The design and evaluation of an airborne optical ice particle counter [J]. *J. Appl. Meteor.*, 12: 1309–1318.
- van den Heever S C, Carrió G G, Cotton W R, et al. 2006. Impacts of nucleating aerosol on Florida storms. Part I: Mesoscale simulations [J]. *J. Atmos. Sci.*, 63: 1752–1775.
- 王春明, 叶家东, 魏绍远. 1997. 气溶胶浓度影响暖雨过程的数值模拟试

- 验 [J]. 气象科学, 17 (4): 316–324. Wang Chunming, Ye Jiadong, Wei Shaoyuan. 1997. A numerical experiment of aerosol concentration affecting warm rain process [J]. *Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 17 (4): 316–324.
- 王宁宁, 谭涌波, 师正, 等. 2013a. 气溶胶对云中水成物粒子荷电情况的影响 [J]. 南京信息工程大学学报, 5 (4): 331–335. Wang Ningning, Tan Yongbo, Shi Zheng, et al. 2013a. Effect of aerosol on electric charge of particle [J]. *Journal of Nanjing University of Information Science and Technology (in Chinese)*, 5 (4): 331–335.
- 王宁宁, 谭涌波, 师正, 等. 2013b. 耦合气溶胶模块的雷暴云起电模式 [J]. 高原气象, 32 (2): 541–548, doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2012.00051. Wang Ningning, Tan Yongbo, Shi Zheng, et al. 2013b. Coupled aerosol cloud from the power module model of thunderstorm [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 32 (2): 541–548.
- 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 Qian, Hu Zhijin. 1990. Three-dimensional elastic atmospheric model and simulation of the observed strong storms [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 48 (1): 91–101.
- 王亚玲, 杜睿, 梁宗敏, 等. 2012. 大气主要污染物与细菌气溶胶在冰核化过程中的作用: 对液滴冻结温度的影响 [J]. 中国科学: 地球科学, 42 (5): 692–700. Wang Yaling, Du Rui, Liang Zongmin, et al. 2012. The interaction between atmospheric typical pollutants and bacteria aerosols in ice heterogeneous nucleation: Effect of droplets freezing temperature [J]. *Science China: Earth Science (in Chinese)*, 42 (5): 692–700.
- 肖辉, 王孝波, 周非非, 等. 2004. 强降雨云物理过程的三维数值模拟研究 [J]. 大气科学, 28 (3): 385–404. Xiao Hui, Wang Xiaobo, Zhou Feifei, et al. 2004. A Three-dimensional numerical simulation on microphysical processes of torrential rainstorms [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 28 (3): 385–404.
- 肖辉, 杨慧玲, 洪延超, 等. 2012. 大气冰核谱分布对对流风暴云人工催化影响的数值模拟研究 [J]. 气候与环境研究, 17 (6): 833–847, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.06.20. Xiao Hui, Yang Huiling, Hong Yanchao, et al. 2012. Numerical simulation of the impacts of ice nucleus spectra on cloud seeding effects in convective storm clouds [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 17 (6): 833–847.
- 谢屹然, 郗秀书, 郭凤霞, 等. 2005. 液态水含量和冰晶浓度对闪电频数影响的数值模拟研究 [J]. 高原气象, 24 (4): 598–603. Xie Yiran, Qie Xiushu, Guo Fengxia, et al. 2005. Numerical simulation of the effect of liquid water content and ice crystal concentration on lightning flash frequency [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 4: 598–603.
- 许焕斌, 段英, 刘海月. 2004. 雹云物理与防雹的原理和设计 [M]. 北京: 气象出版社, 123–125. Xu Huanbin, Duan Ying, Liu Haiyue. 2004. *Hail Physics and the Theory of Hail Suppression [M]*. Beijing: Meteorological Press (in Chinese), 123–125.
- 言穆弘, 刘欣生, 安学敏, 等. 1996. 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, 15 (4): 425–437. Yan Muhong, Liu Xinsheng, An Xuemin, et al. 1996. A simulation study of non-inductive charging mechanism in thunderstorm. I: Affect of cloud factor [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 15 (4): 425–437.
- 杨慧玲, 肖辉, 洪延超. 2011. 气溶胶对云宏微观特性和降水影响的研究进展 [J]. 气候与环境研究, 16 (4): 525–542, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2011.04.13. Yang Huiling, Xiao Hui, Hong Yanchao. 2011. Progress in impacts of aerosol on cloud properties and precipitation [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 16 (4): 525–542.
- Yang H L, Xiao H, Hong Y C. 2011. A numerical study of aerosol effects on cloud microphysical processes of hailstorm clouds [J]. *Atmos. Res.*, 102 (4): 432–443.
- 杨洁帆, 雷恒池, 胡朝霞. 2010. 一次层状云降水过程微物理机制的数值模拟研究 [J]. 大气科学, 34 (2): 275–289. Yan Jiefan, Lei Hengchi, Hu Zhaoxia. Simulation of the stratiform cloud precipitation microphysical mechanism with the numerical model [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 34 (2): 275–289.
- 杨磊, 银燕, 杨绍忠, 等. 2013. 南京地区大气冰核浓度的测量及分析 [J]. 大气科学, 37 (3): 579–594. Yang Lei, Yin Yan, Yang Shaozhong, et al. 2013. Measurement and analysis of atmospheric ice nuclei in Nanjing [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 37 (3): 579–594.
- 杨素英, 马建中, 胡志晋, 等. 2010. 华北地区多化学组分气溶胶对暖云微物理特征的影响 [J]. 中国科学: 地球科学, 40 (11): 1468–1478. Yang Suying, Ma Jianzhong, Hu Zhijin, et al. 2010. Influence of multi-chemical-component aerosols on the microphysics of warm clouds in North China [J]. *Science China: Earth Science (in Chinese)*, 40 (11): 1468–1478.
- Yin Y, Levin Z, Reisin T G, et al. 2000. The effect of giant cloud condensation nuclei on the development of precipitation in convective clouds—A numerical study [J]. *Atmos. Res.*, 53 (1–3): 91–116.
- Yin Y, Wurzler S, Levin Z, et al. 2002. Interactions of mineral dust particles and clouds: Effects on precipitation and cloud optical properties [J]. *J. Geophys. Res.*, 107 (D23): AAC 19-1–AAC 19-14.
- 游来光, 石安英. 1964. 北京地区 1963 年春季冰核浓度变化特点的观测分析 [J]. 气象学报, 34 (4): 548–554. You Laiguang, Shi Anying. 1964. The measurement and analysis of ice-nucleus concentration at Peking during the period from March 18th to April 30th in 1963 [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 34 (4): 548–554.
- 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 (增刊): 122–132. Yu Dawei, He Guanfang, Zhou Yong, et al. 2001. Three-dimensional convective cloud seeding model and its field application [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese)*, 12 (Suppl.): 122–132.
- 赵春生, 彭大勇, 段英. 2005. 海盐气溶胶和硫酸盐气溶胶在云微物理过程中的作用 [J]. 应用气象学报, 16 (4): 417–425. Zhao Chunsheng, Peng Dayong, Duan Ying. 2005. The impacts of sea-salt and nss-sulfate aerosols on cloud microproperties [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 16 (4): 417–425.
- 周志敏, 郭学良. 2009. 强雷暴个例云内闪电与上升气流及液水含量关系的三维数值模拟 [J]. 气候与环境研究, 14 (1): 31–44, doi:10.3878/j.issn.1006-9585. Zhou Zhimin, Guo Xueliang. 2009. 3D modeling on relationships among intracloud lightning, updraft and liquid water content in a severe thunderstorm case [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 14 (1): 31–44.