

楼小凤, 孙晶, 史月琴, 等. 2015. 霰粒子参数对强对流云降水和催化影响的数值模拟研究 [J]. 大气科学, 39 (3): 474–488, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1410.14115. Lou Xiaofeng, Sun Jing, Shi Yueqin, et al. 2015. Numerical simulation study of the impacts of graupel parameters on strong convective rainfall and seeding effects [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 39 (3): 474–488.

霰粒子参数对强对流云降水和催化影响的数值模拟研究

楼小凤 孙晶 史月琴 师宇

中国气象科学研究院/中国气象局云雾物理实验室, 北京 100081

摘 要 本文利用三维对流云 AgI 催化模式, 开展了霰粒子密度和落速参数的敏感性模拟试验, 以研究高淞附度时霰粒子参数的选取对催化模拟结果的影响。敏感性试验中对七个霰微物理过程进行了调整。分析发现改变霰落速参数和霰密度, 可以引起 3 小时模拟的总降水量增加 4.9%。催化后改变了敏感性试验中霰落速和上升气流的配置, 并影响到霰碰并云水和冰晶的过程, 及霰融化成雨水的过程。在高淞附度云中如果只增加霰密度而没有增加相应的落速系数, 将使云中霰含量大幅增加。霰参数也影响了自然云和催化云的降水效率。过量催化使得催化云的降水效率低于自然云。增加霰密度的同时也增加霰落速系数, 将使其降水效率高于对照试验, 从而影响催化效果。在高淞附度云中采用大密度和较大下落系数, 并且利用比数浓度平均落速计算霰粒子比数浓度的下落过程, 会使催化效率从 25%减少到 15%, 极大地改变催化效果。所以在高淞附度的暴雨个例中, 应当采用高霰密度和相应的高霰落速, 否则减雨的催化效果将会被大幅夸大。

关键词 霰参数 敏感性试验 催化数值模拟

文章编号 1006-9895(2015)03-0474-15

中图分类号 P401

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1410.14115

Numerical Simulation Study of the Impacts of Graupel Parameters on Strong Convective Rainfall and Seeding Effects

LOU Xiaofeng, SUN Jing, SHI Yueqin, and SHI Yu

Chinese Academy of Meteorological Sciences/Key Laboratory for Cloud Physics of China Meteorological Administration, Beijing 100081

Abstract By using a three-dimensional convective cloud model with the AgI seeding scheme, sensitivity simulations are conducted with various graupel densities and fall velocities. These parameters influence seven microphysics processes of graupel particles. Numerical simulations show that these parameters affect rainfall amount as much as 4.9%. The relationship between graupel fall velocities and wind updrafts are modified after seeding, and the values of collection of cloud water by graupel, collection of ice by graupel, and melting of graupel to rain water are influenced. When increasing only graupel density, graupel mixing ratios are increased significantly. Graupel density and fall speed parameter also change the rainfall efficiency of both seeding and natural clouds. Increasing the graupel density along with the fall velocity parameter results in relatively high rainfall efficiency, and their seeding effects are only 15% rather than the 25% noted in control seeding simulation. Therefore, in the simulation of the rime density of convective clouds, both the graupel density and fall velocity parameter should be increased; otherwise, the seeding effect will be significantly

收稿日期 2014-01-16; 网络预出版日期 2014-11-16

资助项目 公益性行业(气象)科研专项 GYHY201406001, 中国气象科学研究院基本科研业务研究专项 2011Z005、2013Z009, 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目 2011CB403404, 国家自然科学基金项目 41275148

作者简介 楼小凤, 女, 1969 年出生, 博士, 主要从事云物理学和人工影响天气研究。E-mail: louxf@cma.gov.cn

enlarged.

Keywords Graupel parameters, Sensitivity experiments, Seeding simulation

1 引言

随着数值模式的发展及其在人工影响天气中的应用, 数值模式在人工影响天气理论的发展、可播性评估、外场试验设计、催化方案的确定和决策、效果评估等方面发挥了较大的作用 (Orville, 1996; 黄美元和徐华英, 1999)。数值模式被用来科学研究和业务应用的前提是要合理地模拟云雨的发展演变过程。模式中一些微物理参数的选取会影响到模拟结果 (McCumber et al., 1991; van den Heever and Cotton, 2004)。数值模式的微物理过程仍然有许多不确定性, 尤其是冰相微物理过程, 如粒子的形状和种类等。如何确定淞附过程中冰相粒子的密度已经有许多研究工作 (Bain and Gayet, 1983)。Macklin (1962) 建议淞附过程粒子的密度可以是云滴的体积中值半径、云粒子的冲击碰撞速度和平均表面温度的函数。Pruppacher and Klett (1978) 计算了雷诺数 30~200 范围的粒子与霰粒子的碰撞速度, Heymsfield and Pflaum (1985) 证实这种参数化可以被用来精确计算淞附增长霰粒子的密度。Locatelli and Hobbs (1974) 曾对雪团、霰和雹的下落末速进行观测, 得出霰的下落末速一般大于密淞柱形雪花, 更大于密淞辐枝状的雪花, 并将霰的落速按粒霰、锥霰、六角霰等进行分类拟合。由于冰相粒子的多样性, Straka and Manshelli (2005) 根据粒子的习性、大小和密度, 在模式中定义了 10 类冰相粒子, 其中柱状和片状 2 种冰晶、淞附云冰、雪团、不同密度和谱截距的 3 类霰粒子、冻滴、小冰雹和大冰雹。霰粒子密度分为小密度 (0.3 g cm^{-3})、中密度 (0.5 g cm^{-3}) 和大密度 (0.7 g cm^{-3})。Heymsfield and Pflaum (1985) 通过对比理论计算和试验观测的霰碰冻过冷水增长, 探讨了碰并效率和霰粒子密度和下落速度计算方法。Pflaum (1978) 指出, 霰的增长与霰的形状, 霰表面的粗糙程度和霰的质量分布等有关。由于自然界中霰粒子密度变化幅度很大, 而其落速也随之发生改变, 同时霰是混合云降水中很重要的雨水源项, 尤其是强对流云降水过程 (Lou et al., 2003), 所以有必要对霰粒子参数对云降水过程的影响开展研究, 并研究这些参数对降水催化效果的影响。

近年来数值模式也开展了对霰粒子参数的敏

感性试验研究。在双参数 Milbrandt-Yau 总体水方案中, 对霰粒子密度进行了预报 (Milbrandt and Morrison, 2013)。不同的密度, 直接导致不同的下落速度, 改变了霰在云中的分布, 使得更多的霰含量集中在对流区域, 从而影响到地面降水的分布。敏感性试验表明, 增加霰粒子的落速, 使得暴雨中心的雨强增强。当霰粒子的平均尺度减小时, 层状云降水的范围增加。当增大霰和雹粒子的大小时, 粒子间碰并系数降低, 同时导致模式低层的霰粒子融化较慢, 从而减小雨滴的蒸发 (Cohen and McCaul, 2006)。

人工减雨试验往往采用大剂量的催化方法, 从而影响降水粒子的混合比质量和落速, 从而减少降水。Orville et al. (1989) 对暖底积云人工催化模拟试验时, 发现播撒大量 AgI 后较早形成的雪和霰多数被上升气流输送到云砧中, 而不能形成有效的降水。霰通过冰晶碰并过冷雨水等过程形成, 使霰粒子浓度增大而粒子平均尺度减小, 导致霰落速减弱并且小于上升速度, 使霰难于下落至暖区融化成雨, 大部分滞留于冷区上空, 是雨水减小的主要原因 (孙晶等, 2010)。所以在人工减少对流性降水的试验中, 霰粒子的落速和粒子大小的合理模拟尤为重要, 将直接影响催化效果。但是对于这类试验中霰粒子采用不同的密度和落速参数, 到底会对催化后的降水量有多少影响, 对催化效果会有什么影响, 都还没有人进行过研究。

根据 Locatelli and Hobbs (1974) 给出的拟合曲线, 柱状霰的密度在 $0.1 \sim 0.2 \text{ g cm}^{-3}$ 时, 霰落速的系数 (A_{vg}) 为 $500 \text{ cm}^0 \text{ s}^{-1}$, 当柱状霰的密度在 $0.2 \sim 0.45 \text{ g cm}^{-3}$ 之间时, 霰落速的系数 (A_{vg}) 为 $800 \text{ cm}^0 \text{ s}^{-1}$ 。本文将利用对流云模式中 Locatelli and Hobbs (1974) 的观测结果建立的霰落速与其直径的 0.8 次方成正比的经验近似式 (胡志晋和何观芳, 1987), 模拟过冷水含量非常丰富、淞附程度很高的对流性降水个例, 进行霰粒子的落速和密度参数的敏感性试验, 研究霰粒子的密度与下落速度对对流性降水的模拟会产生多大的影响, 并进一步研究这些参数对减缓对流性降水的催化效果的影响。

2 霰落速和霰密度敏感性设计

本文的对流云模式中霰 (包括冻雨滴) 采用

Marshall-Palmer 谱, 即 $\alpha=0$, 此类霰谱已为观测资料所肯定。

$$N(D) = N_0 D^\alpha \exp(-\lambda D), \quad (1)$$

式中 N 为粒子比浓度, D 为霰粒子直径, N_0 和 λ 为谱参数。

霰的比数浓度

$$N_g = \int_0^\infty N_0 e^{-\lambda_g D} dD = N_0 \lambda_g^{-1}, \quad (2)$$

霰混合比质量

$$Q_g = \int_0^\infty N_0 e^{-\lambda_g D} A_{mg} D^3 dD = 6 A_{mg} N_0 \lambda_g^{-4}, \quad (3)$$

$$\text{平均立方直径 } D_g = \left(\frac{Q_g}{A_{mg} N_g} \right)^{1/3}, \quad (4)$$

$$\text{单个粒子的落速 } V_g = A_{vg} D_g^{0.8} \left(\frac{p_0}{p} \right)^{\alpha_1}. \quad (5)$$

霰粒子落速是根据 Locatelli and Hobbs (1974) 的观测结果建立的经验近似式。粒子落速受空气的压力和温度影响, 在实际大气中主要受气压影响, 根据理论计算结果归纳成 $(p_0/p)^{\alpha_1}$ 的经验近似式。(3) ~ (5) 式中 A_{mg} 和 A_{vg} 分别是质量系数和下落系数。 A_{mg} 与霰的密度有关, $A_{mg} = \pi/6 \rho_g = 0.065 \text{ g cm}^{-3}$ 。由于霰的落速与其形状、密度和直径有关, 也与空气的气压有关, A_{vg} 就代表了与霰直径和气压以外的形状和密度等影响落速的因素, 一般取值为 $500 \text{ cm}^{0.2} \text{ s}^{-1}$, $\alpha_1 = 0.286$ 。

根据 Pruppacher and Klett (1978) 模式, 霰粒子密度和下落速度的参数都与霰粒子的凇附程度有关。当云中过冷水较多时, 霰粒子表面凇附了大量的液水, 导致霰粒子的密度较大, 其变化范围可以从 0.14 g cm^{-3} 到 0.4 g cm^{-3} 。同时下落速度也有变化, 具体表现为随着霰粒子表面凇附度的增加, A_{vg} 从 $500 \text{ cm}^{0.2} \text{ s}^{-1}$ 增加到 $900 \text{ cm}^{0.2} \text{ s}^{-1}$ 。

粒子下落速度的计算有两种方法: 数浓度平均落速 (\bar{V}_g^n) 和质量平均落速 (\bar{V}_g^q)。数浓度平均落速表示单个霰粒子落速累积后与所有霰粒子数量进行平均, 质量平均落速是指单个霰粒子落速与霰粒子质量相累积后与所有霰粒子质量之和进行平均。对数浓度平均落速代表的是数量居多的小粒子, 而质量与粒子大小的三次方成正比, 质量平均落速代表的是中等大小的霰粒子。所以计算比数浓度的下落时采用数浓度平均落速, 计算混合比质量的下落时采用质量平均落速, 可以让大粒子快速下落, 小粒子较慢地下落, 使得模拟更加合理。

根据霰粒子的谱分布函数, 可以得出质量平均落速和数浓度平均落速的计算公式为

$$\bar{V}_g^q = \frac{\int n_{0g} \cdot e^{-\lambda_g D_g} \cdot A_{vg} \cdot D_g^3 \cdot A_{mg} D_g^{0.8} dD \left(\frac{p_0}{p} \right)^{\alpha_1}}{\int n_{0g} \cdot e^{-\lambda_g D_g} A_{mg} D_g^3 dD} = 2.97 A_{vg} \lambda_g^{-0.8} \left(\frac{p_0}{p} \right)^{\alpha_1}, \quad (6)$$

$$\bar{V}_g^n = \frac{\int n_{0g} \cdot e^{-\lambda_g D_g} \cdot A_{vg} \cdot D_g^{0.8} dD \left(\frac{p_0}{p} \right)^{\alpha_1}}{\int n_{0r(g)} \cdot e^{-\lambda_g D_g} dD} = 0.93 A_{vg} \lambda_g^{-0.8} \left(\frac{p_0}{p} \right)^{\alpha_1}, \quad (7)$$

$$\bar{V}_g^n = \frac{0.93}{2.97} \cdot \bar{V}_g^q. \quad (8)$$

3 霰密度和落速相关的微物理过程

霰粒子的一些微物理过程与下落速度系数 A_{vg} 和质量系数 A_{mg} 有关, 所以敏感性试验中这些微物理过程也应进行相应的调整。在混合比质量不变的前提下, 粒子密度的改变, 直接改变了粒子的大小, 而自动转化过程是在粒子达到一定的大小才启动, 粒子的密度改变会影响粒子的自动转化过程。而粒子的落速变化, 会引起粒子表面的热量交换速率的改变, 所以凝华过程和融化过程也受落速的影响。粒子间的碰并过程则认为小粒子均匀充满空间, 而大粒子连续地扫过这空间, 所以与两个粒子的捕获截面和下落速度差有关, 因此碰并过程受粒子的密度 (捕获截面) 和落速的影响。受霰粒子参数影响的微物理过程分为 3 类过程: 仅受落速影响的物理过程, 同时受落速和密度影响的物理过程, 及只受密度影响的物理过程。进行霰粒子的密度和落速敏感性试验时, 这些微物理过程也应当做相应的调整。

3.1 受霰粒子的落速和密度影响的物理过程

随着霰粒子的落速和密度改变而变化的物理过程包括霰粒子与云粒子的碰并 C_{cg} 、与冰晶的碰并 C_{ig} 、与冰雹的碰并 C_{gh} 以及与雨滴的碰并 C_{rg} 。

(1) 霰与冰晶的碰并

$$C_{ig} = \int_0^\infty \int_0^\infty \pi N_{0g} N_{0i} D_i (D_g + D_i)^2 \cdot \left| \bar{V}_g - \bar{V}_i \right| \cdot \exp(-\lambda_i D_i - \lambda_g D_g) E_{ig} \rho Q_i dD_i dD_g = \frac{\pi}{12 A_{mg}} \cdot Q_i \rho Q_g \cdot \lambda_g \left[1 + 4 \left(\frac{\lambda_g}{\lambda_i} \right) + 10 \left(\frac{\lambda_g}{\lambda_i} \right)^2 \right] \cdot \left| \bar{V}_g - \bar{V}_i \right| \cdot \bar{E}_{ig}, \quad (9)$$

冰晶比数浓度变化 $N_{C_{ig}} = C_{ig} N_i / Q_i$, (10)

式中 λ_i 和 λ_g 分别为冰晶和霰的谱斜率, V_i 和 V_g 为冰晶和霰的平均落速, E_{ig} 为霰对冰晶的碰并系数, 它与温度及霰的表面状态有关。

(2) 霰碰并云滴

$$C_{cg} = \int_0^\infty N_0 \exp(-\lambda D) \pi D^2 A_{vg} D^{0.8} \rho Q_c E_{cg} \cdot \left(\frac{\rho_0}{p}\right)^{0.8} \cdot dD = \frac{\pi}{24 A_{mg}} \Gamma(3.8) A_{vg} \rho E_{cg} \cdot Q_c \cdot \lambda_g^{0.2} \cdot \left(\frac{\rho_0}{p}\right)^{0.8}, \quad (11)$$

式中 E_{cg} 为霰碰并云滴群的平均碰并系数, 取 $E_{cg}=0.8$ 。

(3) 霰与冰雹的碰并

$$C_{gh} = \frac{\pi \cdot \rho}{4} \cdot Q_g \cdot N_h \lambda_h^{-2} [(\lambda_h D_*)^2 + 2\lambda_h D_* + 2 + 8 \frac{\lambda_h}{\lambda_g} (\lambda_h D_* + 1) + 20 \left(\frac{\lambda_h}{\lambda_g}\right)^2] \cdot |V_h - V_g| \cdot E_{gh}, \quad (12)$$

$$N_{C_{gh}} = \frac{\pi \cdot \rho}{4} \cdot N_g \cdot N_h \lambda_h^{-2} [(\lambda_h D_*)^2 + 2\lambda_h D_* + 1 + 2 \frac{\lambda_h}{\lambda_g} (\lambda_h D_* + 1) + 2 \left(\frac{\lambda_h}{\lambda_g}\right)^2] \cdot |V_h - V_g| \cdot E_{gh}. \quad (13)$$

(4) 霰与雨滴的碰并

$$C_{rg} = \frac{\rho}{4} \int_0^\infty \int_0^\infty N_{0g} N_{or} (D_g + D_r)^2 \cdot |A_{vr} D_r^{0.8} - A_{vg} D_g^{0.8}| \cdot \exp(-\lambda_g D_g - \lambda_r D_r) E_{rg} A_{mr} D_r^3 dD_r dD_g = \frac{\pi \cdot \rho}{24} \cdot E_{rg} A_{vr} Q_r (6 A_{mr} N_r / Q_r)^{\frac{2.8}{3}} N_g K M_{rg}, \quad (14)$$

$$K M_{rg} = \int_0^\infty \int_0^\infty (D_1 + \frac{\lambda_r}{\lambda_g} D_2)^2 D_1^3 \left| D_1^{0.8} - \frac{A_{vg}}{A_{vr}} \right| \cdot (D_2 \frac{\lambda_r}{\lambda_g})^{0.8} \exp(-D_1 - D_2) dD_1 dD_2, \quad (15)$$

如果采用平均落速差近似, 则

$$C'_{rg} = \frac{\pi \cdot \rho}{24} \cdot E_{rg} A_{vr} Q_r (6 A_{mr} N_r / Q_r)^{\frac{2.8}{3}} N_g K' M_{rg}, \quad (16)$$

$$K' M_{rg} = 120 \times 2.97 [1 + 0.4 \left(\frac{\lambda_r}{\lambda_g}\right) + 0.1 \left(\frac{\lambda_r}{\lambda_g}\right)^2] \cdot \left| 1 - \frac{A_{vg}}{A_{vr}} \left(\frac{\lambda_r}{\lambda_g}\right)^{0.8} \right|, \quad (17)$$

雨比数浓度

$$N'_{C_{rg}} = \frac{\pi \cdot \rho}{4} \cdot E_{rg} A_{vr} N_r (6 A_{mr} N_r / Q_r)^{\frac{2.8}{3}} N_g K' M_{rg}, \quad (18)$$

$$K'_{Mrg} = 2 \times 2.97 [1 + \frac{\lambda_r}{\lambda_g} + \left(\frac{\lambda_r}{\lambda_g}\right)^2] \cdot \left| 1 - \frac{A_{vg}}{A_{vr}} \left(\frac{\lambda_r}{\lambda_g}\right)^{0.8} \right|. \quad (19)$$

3.2 霰的凝华和融化过程

当 A_{vg} 改变时, 雷诺数 Re 也随之改变, 所以会影响霰的凝华和融化过程。

(1) 霰融化为雨滴

$$M_{gr} = \int_0^\infty N_{0g} \exp(-\lambda_g D) \frac{2\pi D}{L_f} [K_t(T - T_0) + L_f K_d \rho (Q_v - Q_{s0})] \cdot \lambda_g^2 \cdot [1 + 0.23 Re^{\frac{1}{2}}] dD + \frac{C_w}{L_f} (C_{cg} + C_{rg})(T - T_0) = \frac{2\pi}{L_f} [K_t(T - T_0) + L_f K_d \rho (Q_v - Q_{s0})] \cdot N_g (6 A_{mg} N_g / Q_g)^{\frac{1}{3}} \cdot [1 + 0.23 \Gamma(2.9) \sqrt{\frac{\rho A_{vg}}{\mu} \lambda_g^{-0.9}}] + \frac{C_w}{L_f} (C_{cg} + C_{rg})(T - T_0), \quad (20)$$

霰比数浓度变化 $N_{M_{gr}} = M_{gr} N_g / Q_g$. (21)

(2) 霰的凝华

$$S_{vg} = H_{Svgs} \cdot (Q_v - Q_{si}) + H_{Svgc}, \quad (22)$$

$$H_{Svgc} = -\frac{L_f K_d \rho Q_{si}}{K_t T} \left(\frac{L_s}{RT} - 1\right) \cdot (C_{cg} + C_{rg}) \cdot [1 + \frac{L_s K_d \rho Q_{si}}{K_t T} \left(\frac{L_s}{RT} - 1\right)]^{-1}, \quad (23)$$

$$H_{Svgs} = 2\pi K_d \rho N_g \lambda_g^{-1} [1 + 0.23 \Gamma(2.9) \sqrt{\frac{\rho A_{vg}}{\mu} \lambda_g^{-0.9}}] \cdot \left(\frac{1000}{p}\right) \cdot [1 + \frac{L_s K_d \rho Q_{si}}{K_t T} \left(\frac{L_s}{RT} - 1\right)]^{-1}, \quad (24)$$

霰比数浓度变化

$$H_{Svgn} = \begin{cases} H_{Svgs} & H_{Svgs} < 0 \\ 0 & H_{Svgs} \geq 0 \end{cases}. \quad (25)$$

3.3 受霰密度影响的过程

霰自动转化为冰雹过程 A_{gh} 则只受霰密度的影响。按气象观测定义雹为直径 (D_*) 大于 0.5 cm 的冰球。认为霰粒增长到 D_{*g} 即转化为雹。 D_{*g} 大小的霰与 D_* 大小的雹质量相等, 所以霰的大小与霰的密度有关, 当 $\rho_g=0.124 \text{ g cm}^{-3}$, D_{*g} 为 0.97 cm; 当 $\rho_g=0.4 \text{ g cm}^{-3}$, D_{*g} 为 0.66 cm。其转化率为

$$A_{gh} = A \int_{D_{*g}}^\infty N_{0g} D_g^3 \exp(-\lambda_g D) A_{mg} dD = A \exp(-\lambda_g D_{*g}) Q_g \left[1 + \lambda_g D_{*g} + \frac{1}{2} (\lambda_g D_{*g})^2 + \frac{1}{6} (\lambda_g D_{*g})^3 \right], \quad (26)$$

霰比数浓度变化

$$N_{Agh} = A \int_{D_{*g}}^{\infty} N_{0g} \exp(-\lambda_g D) dD = A \exp(-\lambda_g D_{*g}) N_{0g}, \quad (27)$$

其中 A 为转化速率, 取 $A=0.01 \text{ s}^{-1}$ 。

霰混合比质量和比数浓度的源汇项为

$$\frac{\delta Q_g}{\delta t} = S_{vg} + C_{cg} + C_{ig} - C_{gh} + A_{ig} + M_{rg} - M_{gr} - A_{gh}, \quad (28)$$

当 $T < 273 \text{ K}$, 公式 (28) 还需计算与液水的碰冻过程: $(C_{rg} + C_{ir} + C_{ri})$,

$$\frac{\delta N_g}{\delta t} = N_{Svg} + N_{Aig} - N_{Agh} + N_{Mrg} - N_{Cgh}, \quad (29)$$

当 $T < 273 \text{ K}$, 公式 (29) 还需计算冰晶与雨滴的碰冻过程: N_{Cir} 。

可以看出, 霰的源汇项中大部分微物理过程受其落速和密度参数的影响, 这些微物理过程势必将影响霰在云中的形成、增长、融化和下落, 进而影响地面降水。

4 霰云物理特性对强对流降水的影响

本文的个例为 1998 年华南暴雨试验阶段的一次对流云降水过程。这次对流云降水是在西风槽前的不稳定形势下, 西南风急流南移到广东和福建共同作用的结果。作者曾利用对流云模式对该个例进行了深入分析, 分析了对流云的降水机制和对流长时间维持的原因 (Lou et al., 2003), 并利用 AgI 进行了人工减缓降水的催化模拟研究 (楼小凤等, 2014)。模式中考虑了 AgI 催化过程, 模拟 AgI 催化剂气溶胶在不同环境条件下的凝华、凝华-冻结、接触冻结、浸没冻结的核化速率, 它们都是温度 (T) 和水汽过饱和度的函数。用 N_{aer} 和 N_{aim} 两个变量, 分别模拟计算 AgI 气溶胶及其被包含在云滴中的比数浓度。被包含在云滴中的 AgI 是指 AgI 气溶胶被液态水碰并后进入水滴中的粒子。这些粒子并不是立即核化, 在温度达到零度后, 通过浸没冻结核化形成冰晶粒子。模式采用探空资料作为水平均匀的理想初始场, 对流启动采用热扰扰动方式, 扰动的温度幅度为 1.5°C , 水平方向为 7 个格点, 垂直方向 5 个格点, 从中心向外以余弦函数递减。由于本个例大气层几乎整层接近饱和, 所以没有采用相对湿度的扰动。模式的水平格距为 1200 m, 垂直格距为 700 m, 水平格点 80×80 , 垂直层数取 30 层。模拟的范围水平 9216 km^2 , 垂直 21 km。模式

利用福州市的 1998 年 6 月 9 日 16 时的加密探空资料 (图 1) 进行了数值模拟。当天整层大气水汽接近饱和, 温度和露点的值非常接近。

本次模拟过程持续了 3 个小时, 3 小时后云体移到了右边境, 模拟结束。本个例的地面温度较高, 在初始阶段云体中仅有云水组成。随着云体的发展, 出现了冰晶和霰等粒子。云体的上升气流由右侧绕流进入云体并倾斜上升, 在高层随高空风流出云砧。冷空气由云后方进入云体, 并产生下沉气流。最大降水强度超过 80 mm h^{-1} 。此次过程的升速总体来说不是很强, 一直维持在 12 m s^{-1} 以下。

图 2 给出了福建省长乐市雷达观测的雷达回波和模式模拟回波。模拟计算的 120 分钟时刻回波水平范围达到 40 km。观测图中较强的一个回波单体水平范围约 30 km, 与模拟回波宽度非常接近。观测和模拟的最大回波强度都接近 50 dBZ, 同时模拟和观测的回波顶高度也比较一致, 只是模拟的高度稍高于观测回波。

由于本降水个例是南方的对流性降水过程, 液态水非常丰富, 霰粒子淋附程度很高 (Lou et al., 2003)。根据 Locatelli and Hobbs (1974), 当霰淋附程度高时, 霰密度相对较大, 同时霰落速的系数相应增加。由于霰密度和霰落速对多个微物理过程有影响, 霰落速直接影响到霰在空中的下落过程, 同时质量平均落速比数量平均落速大 3 倍, 所以设计了表 1 中这些参数的敏感性试验, 研究这些参数对模拟结果的影响。表 1 中给出了对照试验和霰参数敏感性试验在整个区域 180 分钟模拟时段内总降水量, Ctrl 为以往模式采用的参数, 即对照试验。敏感性试验分别为霰落速参数 Avg500 或 Avg900, 分别表示 A_{vg} 取值 $500 \text{ cm}^0.2 \text{ s}^{-1}$ 和 $900 \text{ cm}^0.2 \text{ s}^{-1}$ 。霰密度参数 Rg0.14 或 Rg0.4, 则表示霰密度取 0.14 g cm^{-3} 或 0.4 g cm^{-3} 。Avg900、Rg0.4 和 Avg900-Rg0.4 三个试验代表霰比数浓度和比质量落速都采用霰质量平均落速。vgn 和 Avg900-Rg0.4-vgn 试验中霰比数浓度的落速计算采用霰数浓度平均落速, 而霰混合比的下落计算继续采用霰质量平均落速。

可以看出, 敏感性试验中改变 A_{vg} , ρ_g , 平均落速中的任何一个参数, 都会影响到地面降水量, 并且都比对照试验的降水有不同程度的增加。在 Rg0.4 试验中, 共增加了 300 多千吨的总降水量, 而

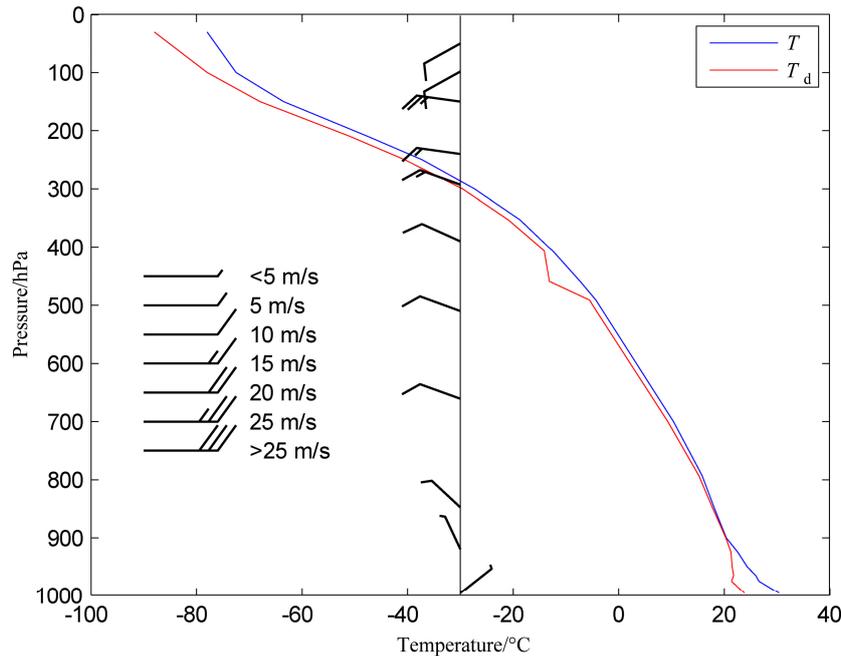


图1 1998年6月9日16时(北京时间,下同)福州市探空的温度(蓝色)、露点温度(红线)和水平风场(风羽)
Fig. 1 Sounding in Fuzhou city at 1600 BT 9 June 1998. Temperature in blue line, dew point in red line, and horizontal wind in barbs

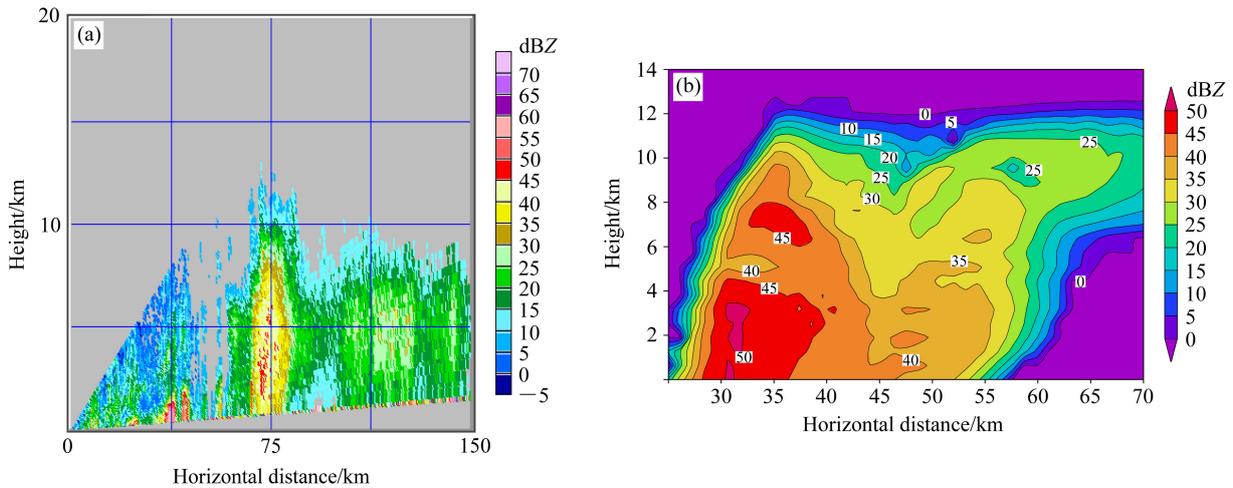


图2 1998年6月9日福建省长乐市(a)观测的雷达回波图和(b)模式运行2小时的模拟回波图
Fig. 2 (a) Observed radar echoes and (b) model simulated echoes after integrating 2 h in Changle city on 9 June 1998

表1 对照试验和霰参数敏感性试验在整个区域180分钟模拟时段总降水量及其变化, $V_g(q)$ 为质量平均落速, $V_g(N)$ 为浓度平均落速, R 和 R_{ctl} 分别为敏感性试验降水量和对照试验降水量

Table 2 Total rainfall and its change in 180 min simulations of control and sensitivity experiments of graupel parameters, $V_g(q)$ and $V_g(n)$ are quantity and number averaged falling speed respectively, R and R_{ctl} are rainfall amount of sensitivity and control simulations respectively

试验	$A_{vg}/cm^{0.2}s^{-1}$	$\rho_g/g\ cm^{-3}$	平均落速 $V/m\ s^{-1}$	总降水量/kt	$R-R_{ctl}/kt$	$(R-R_{ctl})/R_{ctl}$
Ctrl	500	0.14	$V_g(q)$	12675		
vgn	500	0.14	$V_g(n)$	12753	78	0.6%
Avg900	900	0.14	$V_g(q)$	12735	60	0.5%
Rg0.4	500	0.4	$V_g(q)$	13009	334	2.6%
Avg900-Rg0.4	900	0.4	$V_g(q)$	13178	503	4.0%
Avg900-Rg0.4-vgn	900	0.4	$V_g(n)$	13294	619	4.9%

Avg900 和 vgn 两个试验仅增加不到 100 千吨的降水量, 占总降水量的不到 1%。Avg900-Rg0.4 和 Avg900-Rg0.4-vgn 两个试验的总降水量最多, 可以比对照试验多 4% 以上的降水量。总而言之, 敏感性试验会对降水量有影响, 但影响不是非常明显。

图 3 给出了对照试验和五个敏感性试验降水量随时间的分布, 可以看出大部分时间对照试验和五个敏感性试验的降水分布趋势比较一致。在模拟的最后时段, 也是降水量最多的时段, 不同方案间降水量出现比较大的差别, Avg900-Rg0.4 试验贡献了最大 3 分钟累积雨量, 而 Rg0.4 在模拟结束时成为了短时间内降水量最多的试验。

值得指出的是, 由于霰比数浓度的落速采用数浓度平均计算, 与霰混合比质量的落速不一致, 会出现比数浓度和混合比质量不匹配的情况, 所以在模式中增加了比数浓度和混合比质量在合理范围内的调整。具体调整如下: 判断平均霰混合比质量的值 hmq (霰混合比质量/霰比数浓度), 当 hmq 值小于霰粒子最小直径 0.06 cm , 单个霰粒子的质量小于 $4.19 \times 10^{-6} \text{ g}$ 时, 取 $hmq = 4.19 \times 10^{-6} \text{ g}$, 同时利用此值与霰混合比质量计算出此网格点的比数浓度, 从而避免出现平均霰质量过小的情况。

4.1 敏感性试验的霰微物理过程分析

霰参数的选取影响到霰的 7 个微物理过程, 包括霰与其他粒子的碰并过程、霰融化、凝华和自动转化成冰雹的过程。由于本文模拟的是南方夏季的对流性降水过程, 所以下面研究除霰自动转化成冰雹的过程和霰与冰雹的碰并过程外的其他 5 个微物理过程。

霰落速会影响这些微物理过程, 而这些敏感性试验会改变霰的落速与上升气流的关系。图 4 给出了模拟第 120 分钟时强上升区霰落速和上升气流随高度的分布。Rg0.4 试验由于采用了 0.4 g cm^{-3} 的密度, 但没有增加 A_{vg} 参数, 使得霰粒子的落速变小, 而其他试验的落速都强于对照试验。由于本次个例云中的上升气流呈抛物线分布, 上升气流速度在 7 km 附近的平均峰值可以达到 8 m s^{-1} , 强于霰落速, 所以霰粒子在强上升区不容易下落。而在较低的高度层上, 霰粒子可以克服上升气流的托力而下落到暖区融化成雨水, 只是 Rg0.4 试验和对照试验的落速, 在 6 km 附近的融化层高度上比上升气流弱, 会引起霰粒子不容易掉落到暖层融化, Rg0.4 试验则会在冷区聚集更多霰粒子。而采用 Avg900

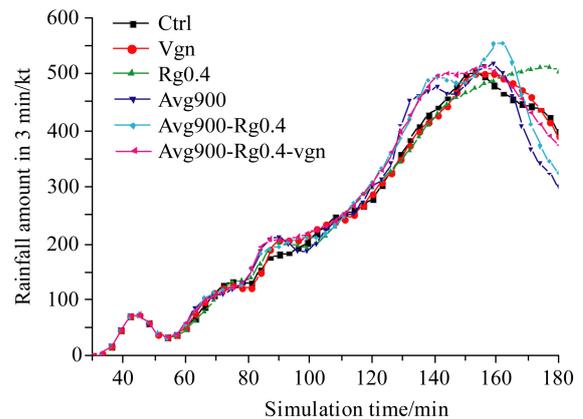


图 3 对照试验和 5 个敏感性试验 3 min 累积区域降雨量随时间分布
Fig. 3 Time series of total rainfall amounts in 3 min in control run and 5 sensitivity experiments

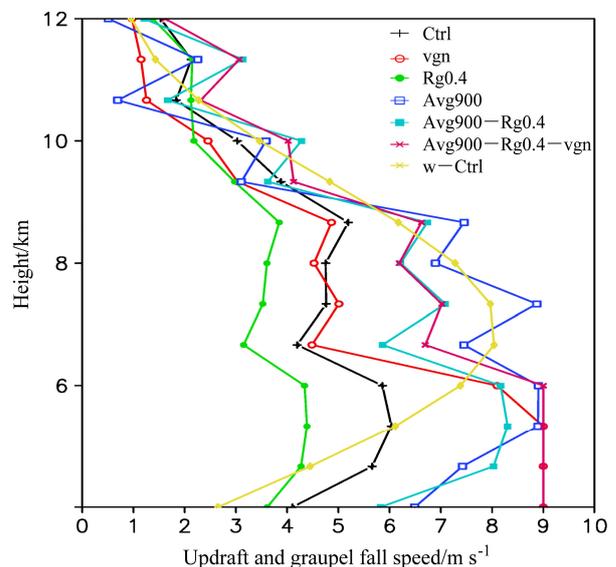


图 4 敏感性参数试验中霰粒子落速和上升气流随高度的分布
Fig. 4 Time series of graupel falling speeds and updrafts in control and sensitivity experiments

或 vgn 的 4 个试验中, 在冷区和暖区的落速都比其他试验强。霰落速的这些分布特点会直接影响霰粒子与其他粒子的碰并过程。

图 5 给出了这 5 个微物理过程随时间的分布, 可以看出这些微物理过程都受敏感性试验影响, 但并没有影响到这些过程发生的时间、出现快速增长和减弱的趋势, 这些微物理过程在敏感性试验和对照试验中呈现了类似的变化趋势。这些微物理过程中, 演变趋势变化比较大的是 M_{gr} 过程, 在 Rg0.4 试验中峰值出现了约 20 分钟的后延, 且峰值较大, 从而导致该试验的降水峰值出现得较晚。

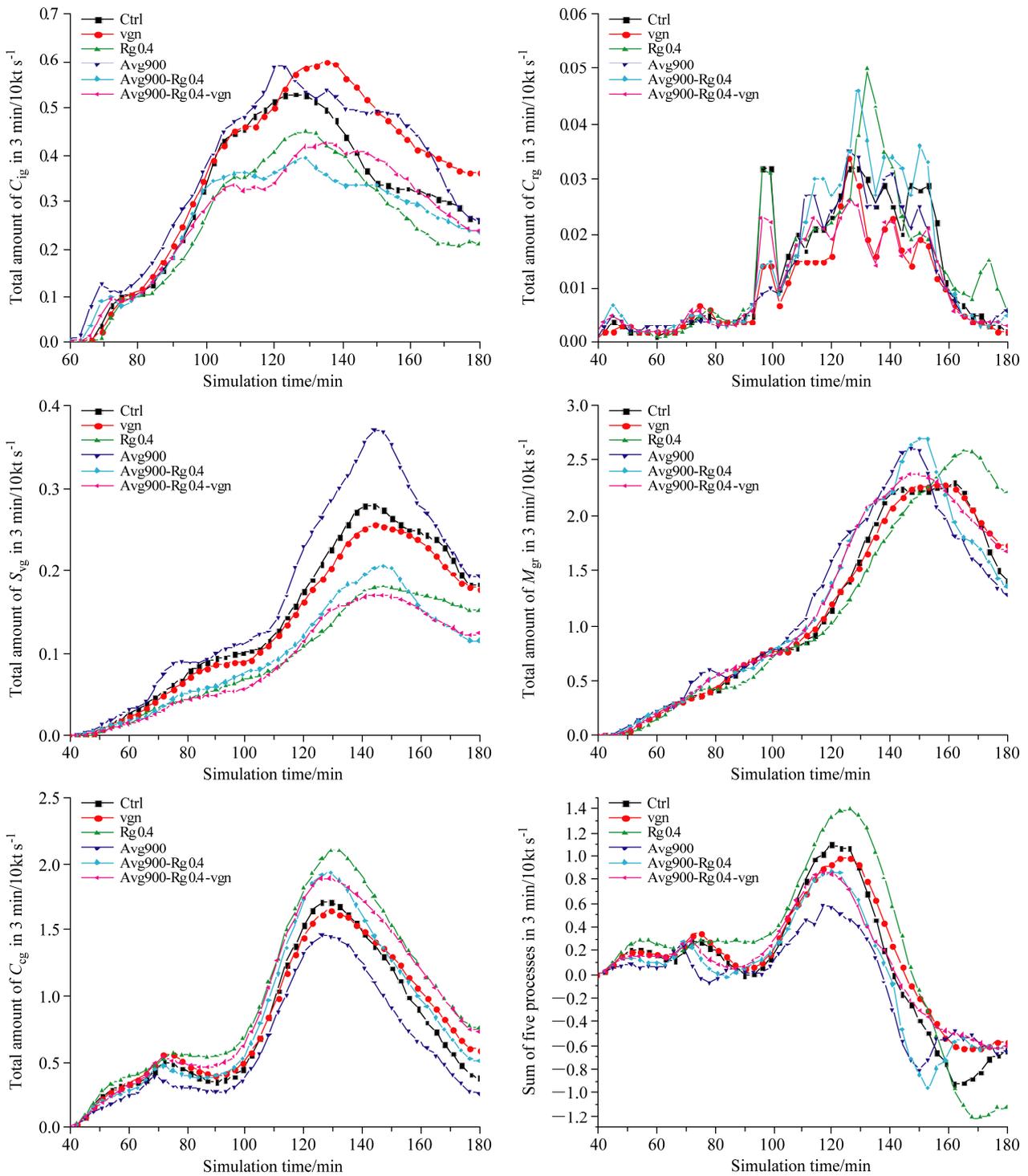


图 5 对照试验和敏感性试验模拟的 5 个受敏感性试验影响的整个模拟范围内微物理过程项 (10 kt s^{-1}) 随时间分布。 C_{ig} 、 C_{rg} 、 S_{vg} 、 M_{gr} 和 C_{cg} 分别代表霰碰并冰晶、霰碰冻雨滴、霰凝华、霰融化和霰碰冻云水过程

Fig. 5 Time series of microphysical processes terms in entire domain in control and five sensitivity experiments (10 kt s^{-1}), including collection of ice by graupel C_{ig} , collection of rain by graupel C_{rg} , deposition of graupel S_{vg} , melting of graupel M_{gr} , and collection cloud water by graupel C_{cg}

敏感性试验影响的霰微物理过程, 与其他微物理过程一起决定了霰的增长和霰的消耗, 其中最主要的两个过程是霰的融化 M_{gr} 和霰碰并云水的过程 C_{cg} ; C_{ig} 和 S_{vg} 与这两者相比少两个量级, 对霰的增长的贡献非常有限。 C_{rg} 过程对霰的贡献更是微不足道。

与密度和落速相关的霰碰并云水过程 C_{cg} 在不同参数的模拟过程中的演变趋势非常一致, 都是在模拟 40 分钟后出现并快速增加, 并在 130 分钟后逐渐减少。由于 Rg0.4 试验中霰粒子的落速弱于对照试验, 导致该霰粒子在云中停留的时间最长, 碰并的云水最多。尽管 Avg900-Rg0.4 和 Avg900-Rg0.4-vgn 两个试验虽然其落速比对照试验增大很多, 但霰粒子仍然不能克服上升气流而滞留在云中。可能由于这两个试验中与云水粒子的相对速度较大, 从而碰并比控制过程较多的云水。Avg900 的落速则大于上升气流, 使得粒子能够顺利下落到暖区融化, 导致该试验碰并的云水最少。

与落速直接相关的霰粒子融化成雨滴的过程中, 由于 Rg0.4 试验的霰落速最小, 使得霰粒子下落很慢, 推迟了霰粒子落到正温区融化的时间, 从而延迟了融化过程的发生。该试验的 M_{gr} 在开始出现后就一直小于其他试验。但由于在前期碰并了更多的云水, 霰比质量增长较多, 除了 Avg900 和 Avg900-Rg0.4 试验在较早前达到 30 kt s^{-1} 外, 使得其在 160 分钟后融化峰值远高于其他试验。其他试验出现峰值的时间比较一致, 都在第 140 分钟附近。Rg0.4 试验在 140 分钟前出现的相对于其他试验霰较少的融化量和在 150 分钟出现的大融化量, 导致了该试验相对其他试验在 140 分钟前降水偏少, 150 分钟后降水偏多。其他几个敏感性试验都比对照试验有更大的落速, 导致这些试验在 150 分钟前始终保持比对照试验融化更多雨水的趋势。

霰的凝华过程与通风系数正相关, 也与粒子的大小正相关。在 Avg900 试验中, 落速增加, 粒径较大, 使得该试验比其他试验凝华贡献出更多的霰含量。只有 Avg900 和 vgn 试验中碰并了比对照试验更多的冰晶。该个例中碰并雨水的 C_{rg} 过程由于过冷雨水非常少, 霰粒子能碰冻雨水非常有限, 仅为碰并云水 C_{cg} 的约 2%, 对霰的贡献可以忽略不计。

由于 C_{cg} 作为霰最大的源项, 而 M_{gr} 作为最大的汇项, 这两个过程在霰和雨的分布中起主要作用。这些受参数化影响的物理过程的总量随时间分

布来看, 霰在模拟开始的前期, 霰比质量一直增加, 随后由于大量的霰粒子融化成雨水, 霰总比质量出现了下降。由于后期 M_{gr} 超过 C_{cg} , 霰的微物理过程量持续为负值, 霰总比质量持续缓慢下降。

当采用 0.4 g cm^{-3} 霰密度后, 没有提高相应的 A_{vg} 参数 (Rg0.4 试验), 将导致霰比质量增长大幅增加, 与其他试验相比在峰值区可以高出约 20 kt s^{-1} 的增长率, 高出其他试验约 20%, 同时也在第 150 分钟后贡献更多的融化雨水。

所以在云水量丰富, 霰高度淤附的个例中, 如果仅提高霰密度会很大程度地引起云中霰的增多和云水的减少, 并导致霰融化成雨水的增多, 从而影响云和降水过程。在增加霰密度的同时, 应当增加霰落速参数, 从而更合理地模拟霰的演变过程, 更好地模拟云和降水过程。所以下面选取 Rg0.4, Avg900-Rg0.4 和 Avg900-Rg0.4-vgn 三个敏感性试验与对照试验进行重点分析。

4.2 霰、雨物理量分析

考虑到敏感性试验的降水强度在 120 分钟后出现地面最强降水, 下面分析该时刻 Rg0.4, Avg900-Rg0.4 和 Avg900-Rg0.4-vgn 三个试验和对照试验的霰和雨物理量分布特点。

Rg0.4 试验由于密度增大后, 霰的直径变小, 导致霰落速减少, 不容易下落而碰并更多的云水而引起大量霰在高空累积。120 分钟时该试验的霰混合比 (图 6) 高于其他试验, 同时其在零度层附近霰的分布范围也非常大。对照试验中尽管也存在大于 8 g kg^{-1} 的高值区, 但霰大值区的分布范围明显比 Rg0.4 试验的小。

采用 Avg900 后, 同样是 Rg0.4 的情况下 (Avg900-Rg0.4, Avg900-Rg0.4-vgn), 霰落速的增加, 加快了其下落, 导致了霰混合比的减少。在 Avg900-Rg0.4-vgn 试验中, 霰的融化层变厚, 这是由于该方案中一些大粒子加速下落, 从而使得粒子在下落更多的距离后才完全融化。由于 Rg0.4 方案的 M_{gr} 过程在 120 分钟时比其他方案的偏小, 所以该方案雨水明显比其他方案偏少, 尤其在升速较弱的云体前方。

从模拟 180 分钟模拟时段内平均霰混合比质量和比数浓度分布来看 (图 7), 各个试验的结果仍然存在着明显的差异。Avg900-Rg0.4 试验和 Avg900-Rg0.4-vgn 试验, 由于霰落速较大, 碰并云水量比较少, 导致这两个试验比对照试验有较小的霰含

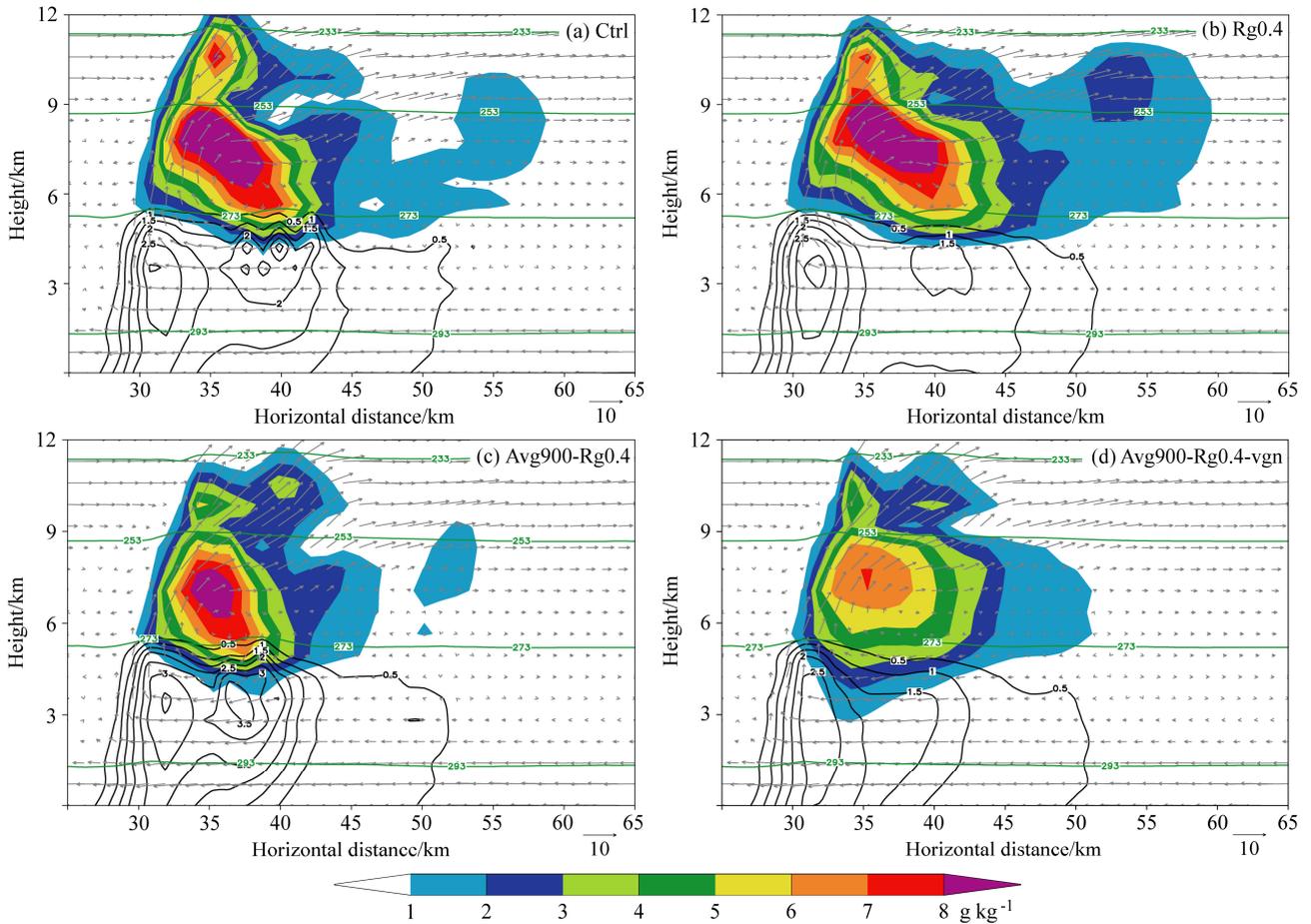


图 6 第 120 分钟对照试验和 Rg0.4, Avg900-Rg0.4, Avg900-Rg0.4-vgn 三个敏感性试验模拟霰和雨水混合比垂直剖面, 横坐标为东西向距离。阴影为霰混合比 (g kg^{-1}), 黑色等值线为雨水混合比 (g kg^{-1}), 绿色等值线为温度 (K)

Fig. 6 Vertical cross sections of graupel and rain water mixing ratios in control run and Rg0.4, Avg900-Rg0.4, Avg900-Rg0.4-vgn sensitivity experiments at 120th min time point. Abscissa is west-east distance (km). Shadings: graupel mixing ratios (g kg^{-1}); black contours: rain water mixing ratios (g kg^{-1}); green contours: temperature (K)

量, 而 Rg0.4 试验中由于碰并了大量的云水, 其霰含量则高出对照试验的含量。从比数浓度的时间平均分布来看, Avg900-Rg0.4-vgn 试验的霰比数浓度在整个霰存在的高度都比对照试验偏大较多, 所以霰比数浓度采用数浓度平均落速, 会导致大粒子的快速下落, 而更多的小粒子则停留在空中。

所以霰粒子的落速和密度参数, 可以影响霰比质量和比数浓度的大小及其高度分布, 进而影响到雨滴的分布并影响到降水。

5 霰粒子物理特性对催化模拟的影响

下面进行对照试验和三个敏感性试验在模拟 120 分钟后的催化试验, 研究这些参数对催化效果的影响。催化方案是在模拟 120 分钟后采用 $1 \times$

10^8 个/kg 的催化剂量, 连续催化 15 次。表 2 给出了 120 分钟至 180 分钟内总降水量和催化后雨量减雨率。对照试验和三个敏感性试验的自然云降水量都维持在 8000 千吨以上, 在催化后所有试验的降水量都大幅减少, 降水的减少量都在 1000 千吨以上。Avg900-Rg0.4 试验和 Avg900-Rg0.4-vgn 试验是四个试验中自然云降水量较多的试验, 其催化后的降水量却比较少, 所以这两个试验的减雨率比较低, 分别仅为 15% 和 16.4%。对照试验和 Rg0.4 试验的降水量在催化云中比非催化云中可以减少 2000 千吨以上, 远远超出其他试验的减雨量, 导致这两个试验的催化效果比较好, 分别可以达到 25.9% 和 29.7%。该催化方案总共使用 18.9 kg 的 AgI。如此大的催化剂量在现实中不容易

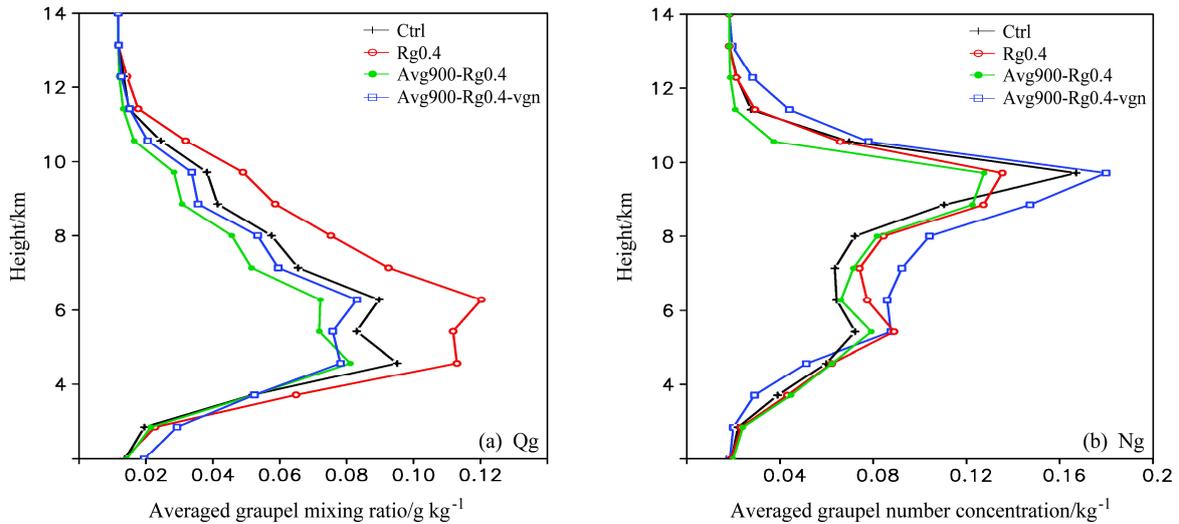


图 7 模拟 120 分钟对照试验和 Rg0.4, Avg900-Rg0.4, Avg900-Rg0.4-vgn 三个敏感性试验模拟结果的时间和水平区域平均霰物理量垂直分布: (a) 霰水平区域平均比质量; (b) 霰水平区域平均比数浓度

Fig. 7 Vertical distributions of horizontal domain averaged graupel mixing ratios and number concentrations in control run and Rg0.4, Avg900-Rg0.4, Avg900-Rg0.4-vgn sensitivity experiments at 120th min time point: (a) Horizontal domain averaged mixing ratios (g kg^{-1}); (b) horizontal domain averaged number concentrations (kg^{-1})

实现, 当采用较小的催化剂量时, 如 1.0×10^7 的催化剂量时, AgI 用量为 1.9 kg, 约需火箭 190 枚, 总降水量可以减少 22.3%, 当采用 0.4 g cm^{-3} 的霰密度和相应的落速, 将只有 13% 的减雨效果, 霰参数对催化效果的影响非常明显。由于大剂量催化的减雨效果更加明显, 为了更好地分析霰密度和落速对减雨催化效果的影响, 下面对大剂量催化的效果进行分析。

表 2 对照试验和三个霰参数敏感性催化试验的减雨量和减雨率

Table 2 Reduced rainfalls and reduced rainfall rate in control and sensitivity experiments of graupel parameters

试验	$A_{vg}/\text{cm}^{0.2} \text{ s}^{-1}$	$\rho_g/\text{g cm}^{-3}$	平均落速/ m s^{-1}	减雨量/ kt	减雨率
Ctrl-s	500	0.14	$V_g(q)$	2260	25.9%
Rg0.4-s	500	0.4	$V_g(q)$	2658	29.7%
Avg900-Rg0.4-s	900	0.4	$V_g(q)$	1344	15.0%
Avg900-Rg0.4-vgn-s	900	0.4	$V_g(q)$	1478	16.4%

过量催化后, 四个试验的霰落速(如图 8 所示) 远比非催化试验中的落速小(图 4)。催化前霰比质量平均落速在 6 km 以下可以达到 9 m s^{-1} , 强于上升气流, 霰粒子可以下落到暖区融化成雨水, 催化后霰的落速大幅减少, 除了 Avg900-Rg0.4-vgn 试验中可以维持 8 m s^{-1} 外, 其他试验都小于 5 m s^{-1} , 弱

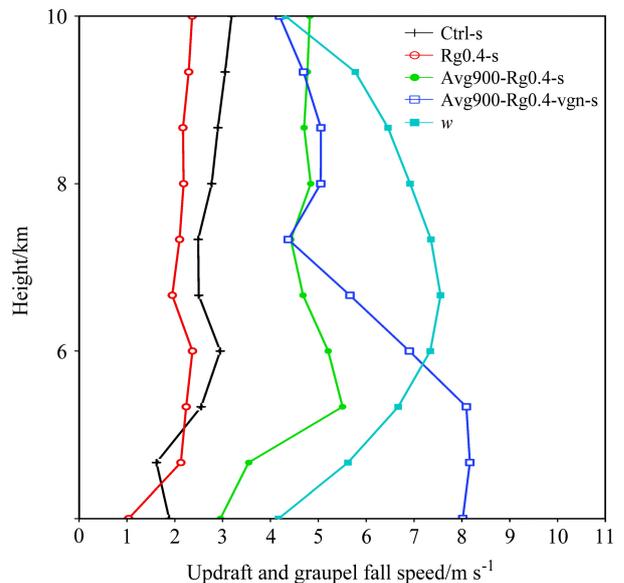


图 8 三种霰敏感性参数试验和对照试验中霰落速和上升气流随高度的分布

Fig. 8 Vertical distributions of graupel falling speeds and updraft in control run and three sensitivity experiments

于上升气流速度, 造成霰粒子不容易下落到融化区, 使得其在云中冷区的时间延长, 从而碰并更多的云中粒子。Rg0.4 试验中落速减弱得最多, 在上升气流较强的 6~10 km 高度上, 其落速维持在 2 m s^{-1} 附近, 而对照试验的落速也小于 3 m s^{-1} 。其他

两个试验的落速则快于对照试验，但仍比上升气流弱。催化后霰落速与上升气流的配置改变，将影响云中微物理过程，从而影响云的发展演变和降水过程。

催化试验中，霰所有受敏感性参数影响的 5 个

微物理过程与催化前有很大变化（图 9），其中变化最大的为 C_{ig} 过程。由于 AgI 大量核化，形成大量冰晶，同时由于霰落速的减少，使得大量霰粒子被抬升，进而增加与冰晶的碰并，造成催化后 C_{ig} 过程大幅增加，从催化前的 6 kt s^{-1} 增加到 18 kt s^{-1} 。

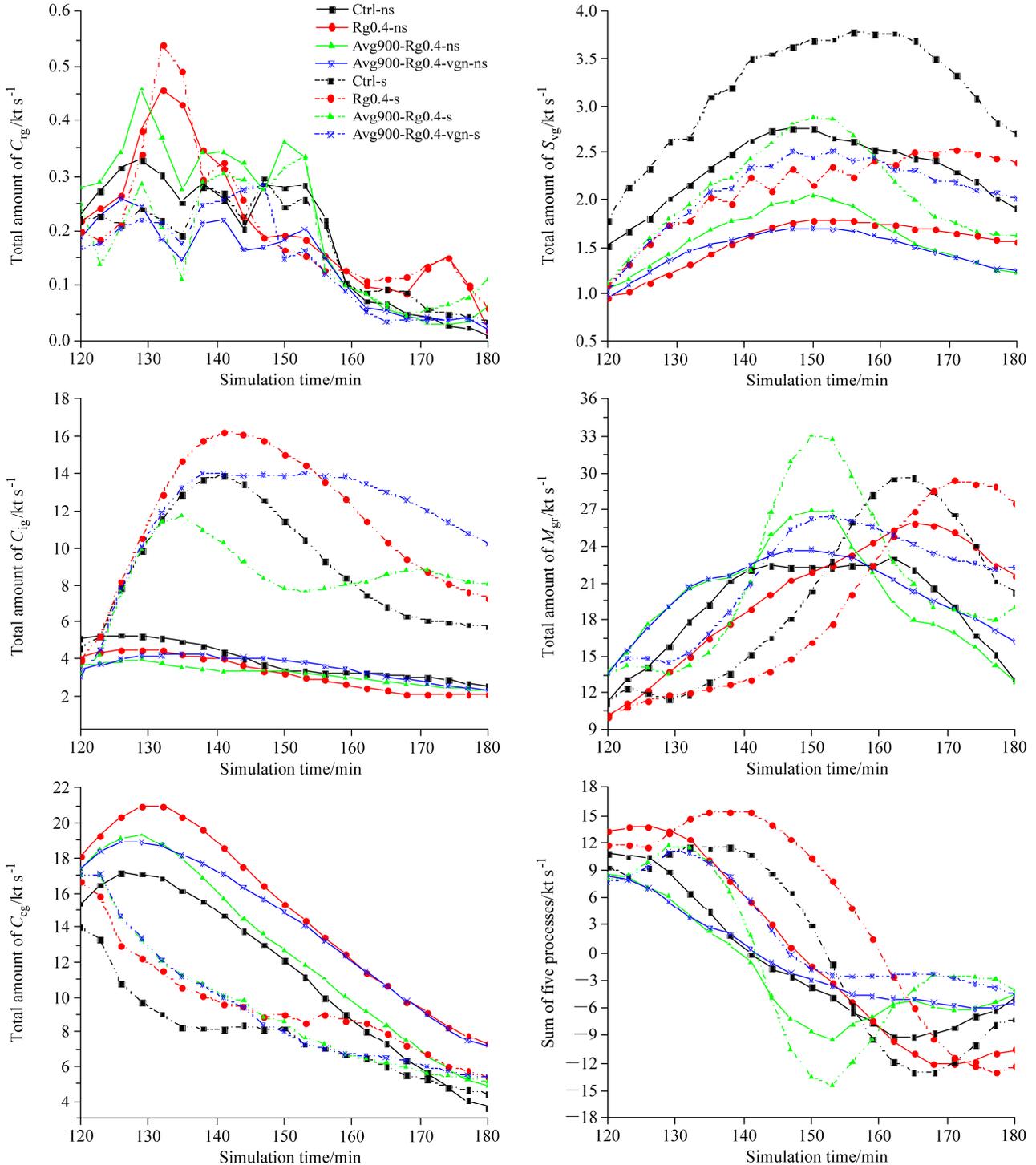


图 9 对照试验和敏感性试验自然云模拟（实线）和催化（虚线）整个模拟范围内微物理过程项 (kt s^{-1}) 随时间分布

Fig. 9 Time series of microphysical processes terms (kt s^{-1}) in control run and three sensitivity experiments of natural simulations (solid lines) and seeding simulations (dotted lines)

C_{ig} 过程从催化前对霰粒子的增长贡献非常小的物理过程, 演变为催化模拟中霰的最主要增长过程之一。Rg0.4 试验的 C_{ig} 在模拟的前期一直超过其他敏感性试验和对照试验, 但在 150 分钟后 Avg900-Rg0.4-vgn 碰并的冰晶比 Rg0.4 试验多。

催化后的 C_{ig} 与催化前没有太大变化。霰的凝华过程, 在催化云中所有试验都比自然云中凝华过程贡献更多的霰含量。对照试验在自然云和催化云中保持所有试验中最多的凝华量。

催化后 C_{cg} 在四个试验中都大幅减少, 非催化云中的 22 kt s^{-1} 峰值, 在催化云中大幅缩小仅为 14 kt s^{-1} 。催化云中的 C_{cg} 在催化阶段持续减少, 而不是像非催化云中从 120 分钟持续增加到 135 分钟。非催化云中三个敏感性试验在 120~180 分钟最后一个模拟小时内都保持比控制云碰并更多的云水, 催化后敏感性试验也保持了该态势。 C_{cg} 过程的大幅变化, 势必影响到霰和降水过程。

霰的融化过程将直接影响到减雨催化的效果。在 140 分钟前, 所有敏感性试验和对照试验的催化

模拟融化量都比非催化云融化量少, 但在 140 分钟后 Avg900-Rg0.4-vgn 和 Avg900-Rg0.4 两个催化试验的融化量超过了相应的非催化云, 而对照试验和 Rg0.4 试验则稍晚, 对照试验到 150 分钟后才出现超过的现象, Rg0.4 试验则更是推迟到 160 分钟以后。催化云中融化量和时间的分布, 直接导致降水量和降水峰值出现的时间。

由于催化后 C_{ig} 代替 C_{cg} 成为霰的主要增长源项, 而 Rg0.4 和对照试验的 C_{ig} 的峰值出现时间稍晚于 C_{cg} , 导致总微物理过程的峰值也在催化后出现了后延, 从而导致这两个试验的 M_{gr} 的后延。

从水成物在整个模拟范围内平均随时间的分布来看 (图 10), 催化试验中由于有大量的 AgI 核化成冰晶, 使得所有 4 个试验的冰晶含量都比对照试验高出许多, 尤其是控制催化试验, 比控制非催化试验高出近一倍, 而 Avg900-Rg0.4 的催化试验的 Q_i 快速增加, 在模拟的最后半小时高出其他 2 个敏感性试验并最终超过控制催化试验。云水含量随时间的分布则刚好相反, 大量冰晶的存在, 使得贝吉

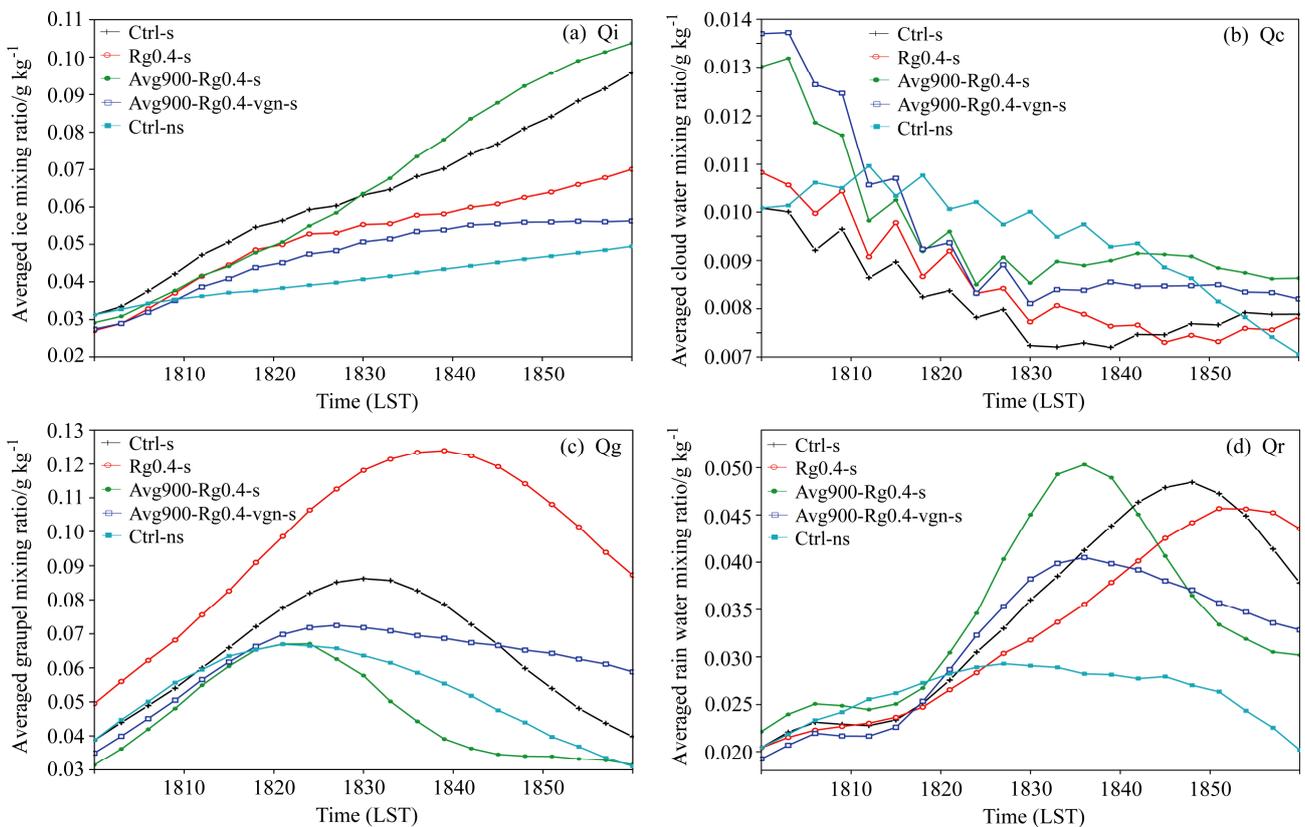


图 10 敏感性试验和对照试验催化模拟的整个模拟区域平均水成物随时间分布。(a) 冰晶; (b) 云水; (c) 霰; (d) 雨水

Fig. 10 Time series of domain-averaged mixing ratios of hydrometeors in control run and three sensitivity experiments. (a) Ice; (b) cloud water; (c) graupel; (d) rain water

龙过程增强, 大量云水被消耗, 使得催化试验的云水含量比非催化试验的云水大幅减少。

催化试验中高冰晶含量和低云水含量, 使得催化试验中的霰主要通过碰并冰晶增长, 而不是通过碰并云水增长。

由于 Rg0.4 催化试验中 C_{ig} 较大, 同时霰落速最小, 导致该试验的霰含量高于其他试验, 并且其增长的时间延长。所有试验的催化雨水含量都非催化云明显增加, 但由于催化云的雨滴比数浓度增加一个量级, 雨滴粒径变小, 造成很多雨水在半空中蒸发, 导致下落到地面的雨水减少, 从而引起降水的减弱。4 个试验的催化模拟中, Avg900-Rg0.4-vgn 和 Avg900-Rg0.4 两个试验雨水峰值出现时间都早于对照试验, 只有 Rg0.4 的催化中雨水峰值出现的时间比对照试验后延。这些都影响到减雨量的分布, 从而影响催化效果。

所以在对照试验和 Rg0.4 试验中, 由于霰落速的改变和霰微物理过程的改变, 催化后减雨量远远少于 Avg900-Rg0.4-vgn 和 Avg900-Rg0.4 两个试验, 因此催化效果较好, 可以有超过 25% 的减雨率。而高凝附度的云过程应该采用霰高密度和高下落系数, 则会引起催化减雨量大幅减少, 从而导致催化效果较差, 仅为 15%。

四个试验自然云降水效率 (ef) 在最后一个模拟小时内都一直增加, 但在催化后都出现了大幅降低 (图略)。自然云中 ef 最低的 Rg0.4 试验, 在催化云中仍然保持最低的降水效率。在 140 分钟后, Avg900-Rg0.4 和 Avg900-Rg0.4-vgn 两个催化试验的降水效率高于控制催化试验, 导致这两个试验的减雨效果较差。

霰参数的敏感性试验, 不仅会引起云中冰晶、云水、霰和雨水的空间和时间分布, 从而引起降水的变化, 同时也会引起减雨催化效果的改变。在高凝附度云中增加霰密度的同时也增加 Avg 的情况下, 可以更合理地模拟霰粒子的增长和下落过程, 同时减少催化后的减雨量, 从而减弱减雨催化效果。

6 结论和讨论

本文利用三维对流云 AgI 催化模式, 对南方对流性降水中高凝附度的霰粒子采用较大密度和较大落速参数的敏感性模拟试验研究。在模式中调整了与这些敏感性试验有关的微物理过程, 即霰融化

为雨滴, 霰的凝华, 霰碰并云滴, 与冰晶的碰并和与雨滴的碰并共 5 个微物理过程。文中设计了敏感性试验的自然云和催化云对比模拟试验, 得出如下主要结论:

(1) 改变 A_{vg} , ρ_g , V_g 中的任何一个参数, 都会影响到地面降水量。Avg900-Rg0.4 和 Avg900-Rg0.4-vn 两个试验的总降水量最多, 可以比对照试验多 4% 以上的降水量。

(2) 敏感性试验改变了霰的落速, 从而影响了霰粒子与其他粒子的碰并过程, 并影响到霰粒子落到暖区的融化过程。Avg900-Rg0.4 和 Avg900-Rg0.4-vgn 两个试验中融化更多的雨水, 而 Rg0.4 试验则碰并了更多的云水。Avg900-Rg0.4 试验和 Avg900-Rg0.4-vgn 试验中有较小的霰含量, 而 Rg0.4 试验中霰含量则明显高出对照试验的含量。

(3) 催化后所有敏感性试验和对照试验中的霰落速都有一定程度的减少, 尤其是 Rg0.4 试验的霰落速, 仅有 2 m s^{-1} , 远比 8 m s^{-1} 的上升气流弱。由于霰落速的降低, 使得催化后 C_{ig} 过程大幅增加, C_{cg} 催化后却大幅减少, 催化后 C_{ig} 代替 C_{cg} 成为霰的主要增长源项。霰融化成雨水过程在催化后出现了大幅减少。催化后 Rg0.4 试验中有最多的霰含量。

(4) 在高凝附度云中采用大密度和较大下落系数, 并且利用数浓度平均落速计算霰粒子比数浓度的下落过程, 会使催化效率从 25% 减少到 15%, 极大地改变催化效果。

(5) 当云中的液态水比较丰富, 凝附程度高时, 比如南方夏季的降水过程或降雹过程, 应当采用较大的霰密度, 并将霰落速系数增加到 $900 \text{ cm}^0.2 \text{ s}^{-1}$, 否则会引起云物理量场和降水的变化, 尤其会引起催化效果的大幅改变。

本文利用数值模式对霰参数进行了敏感性试验模拟研究, 今后应选取更多的个例进行模拟研究, 同时研究粒子间的碰并效率, 并利用可以模拟大范围降水过程的中尺度模式, 深入这些参数对降水强度和降水落区的影响, 以得到更合理全面的结果。

参考文献 (References)

- Bain M L, Gayet J F. 1983. Contribution to the modeling of the ice accretion process: ice density variation with the impacted surface angle [R]. *Annals of Glaciology*, vol.4, pp.19–23.
- Cohen C, McCaul E W Jr. 2006. The sensitivity of simulated convective

- storms to variations in prescribed single-moment microphysics parameters that describe particle distributions, sizes, and numbers [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 134 (9): 2547–2565.
- Heymtsfield A J, Pflaum J C. 1985. A quantitative assessment of the accuracy of techniques for calculating graupel growth [J]. *J. Atmos. Sci.*, 42 (21): 2264–2274.
- 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 clouds (I): Microphysical model [J]. *Acta Meteor. 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, 291pp.
- Huang Meiyuan, Xu Huaying. 1999. *Cloud and Precipitation Physics (in Chinese)* [M]. Beijing: Science Publication, 291pp.
- Locatelli J D, Hobbs P V. 1974. Fall speeds and masses of solid precipitation particles [J]. *J. Geophys. Res.*, 79 (15): 2185–2197.
- Lou X F, Hu Z J, Shi Y Q, et al. 2003. Numerical simulations of a heavy rainfall case in South China [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 20 (1): 128–138.
- 楼小凤, 孙晶, 史月琴, 等. 2014. 减弱对流云降水的 AgI 催化原理的数值模拟研究 [J]. *气象学报*, 72 (4): 782–793. Lou Xiaofeng, Sun Jing, Shi Yueqin, et al. 2014. Numerical study of the AgI seeding principle for decreasing the convective cloud rainfall [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 72 (4): 782–793.
- Macklin W C. 1962. The density and structure of ice formed by accretion [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 88 (375): 30–50.
- McCumber M, Tao W K, Simpson J, et al. 1991. Comparison of ice-phase microphysical parameterization schemes using numerical simulations of tropical convection [J]. *J. Appl. Meteor.*, 30 (7): 985–1004.
- Milbrandt J, Morrison H. 2013. Prediction of graupel density in a bulk microphysics scheme [J]. *J. Atmos. Sci.*, 70 (2): 410–429.
- Orville H D, Kopp F J, Farley R D, et al. 1989. The numerical modeling of ice-phase cloud seeding effects in a warm-base cloud: Preliminary results [J]. *J. Wea. Modif.*, 21,4–8.
- Orville H D. 1996. A review of cloud modeling in weather modification [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77 (7): 1535–1555.
- Pflaum J C, Pruppacher H R. 1979. A wind tunnel study on the growth of graupel initiated from frozen drops [J]. *J. Atmos. Sci.*, 36: 680–689.
- Pruppacher H R, Klett J D. 1978. *Microphysics of Clouds and Precipitation* [M] Dordrecht Holland: D. Reidel Publishing Company, 714pp.
- Straka J M, Manshell E R. 2005. A bulk microphysics parameterization with multiple ice precipitation categories [J]. *J. Appl. Meteor.*, 44 (4): 445–466.
- van den Heever S C, Cotton W R. 2004. The impact of hail size on simulated supercell storms [J]. *J. Atmos. Sci.*, 61 (13): 1596–1609.
- 孙晶, 史月琴, 楼小凤, 等. 2010. 人工缓减梅雨锋暴雨的数值试验 [J]. *大气科学*, 34 (2): 337–350. Sun Jing, Shi YueQin, Lou Xiaofeng, et al. 2010. Numerical experiments on artificial seeding of decreasing the Meiyu heavy rainfall [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 34 (2): 337–350.