

何晖, 金华, 李宏宇, 等. 2012. 2008年奥运会开幕式日人工消减雨作业中尺度数值模拟的初步结果 [J]. 气候与环境研究, 17 (1): 46–58, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2011.10043. He Hui, Jin Hua, Li Hongyu, et al. 2012. Preliminary study of the mesoscale numerical simulation of the rain mitigation operation during the opening ceremony of the 2008 Beijing Olympic Games [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17 (1): 46–58.

2008年奥运会开幕式日人工消减雨作业 中尺度数值模拟的初步结果

何晖^{1,2,3} 金华¹ 李宏宇¹ 刘建忠¹

1 北京市人工影响天气办公室, 北京 100089

2 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

3 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 2008年8月8日, 在2008年北京奥运会开幕式举行之际, 北京及周边地区出现了较强对流云团, 给国家体育场内开幕式活动的顺利进行带来了极大威胁。根据云系的发展状况, 北京市人工影响天气办公室有针对性地组织实施了大规模地面火箭人工消减雨作业, 对抑制云、降水的形成和发展起到了一定作用。在中尺度数值模式MM5的Reisner2方案中引入了AgI粒子与云相互作用的过程, 在MM5中实现了催化功能。参照2008年8月8日20:05至20:12进行的消减雨作业情况, 利用加入催化方案的中尺度数值模式对该作业进行了数值模拟试验, 就不同的播撒量对催化效果的影响进行了研究, 并对其中的微物理机制进行了分析。研究结果表明: AgI播撒率对降水量改变影响很明显, 当以 $5\text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$ 的速率持续播撒AgI 7 min, 在播撒作业后2 h, 催化区域内均表现为减雨, 2 h后为增雨。对于减雨的微物理机制主要是由于大量播撒AgI后导致空中云水大量减少, 进一步导致霰减少, 霰的减少导致雨水的减少; 而2 h后的增雨机制则是由于在雨水、云水、霰以及温度之间形成了正反馈, 最终导致地面降水的增加。需要指出的是由于单参数方案的局限性, 模拟的最大减雨率仅为8%~12%, 离消雨的要求尚有差距, 应利用双参数云方案作进一步模拟研究。

关键词 消减雨 中尺度催化数值模式 物理机制 催化效果

文章编号 1006-9585 (2012) 01-0046-13 **中图分类号** P481 **文献标识码** A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2011.10043

Preliminary Study of the Mesoscale Numerical Simulation of the Rain Mitigation Operation during the Opening Ceremony of the 2008 Beijing Olympic Games

HE Hui^{1,2,3}, JIN Hua¹, LI Hongyu¹, and LIU Jianzhong¹

1 *Beijing Weather Modification Office, Beijing* 100089

2 *Institute of the Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100029

3 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049

收稿日期 2010-03-03 收到, 2011-11-12 收到修定稿

资助项目 国家“十一五”科技攻关项目 2006BAC12B04, 国家自然科学基金资助项目 40805055, 北京市委组织部优秀人才项目 20061D0200800059

作者简介 何晖, 男, 1977年出生, 博士, 高级工程师, 主要从事云和降水物理学研究。E-mail: hehui@bjmb.gov.cn

Abstract Strong convective clouds occurred in Beijing and its surrounding areas during the opening ceremony of the 2008 Beijing Olympic Games, which posed a threat to the ongoing ceremony activities at the National Stadium. According to the actual weather condition, rain mitigation by firing lots of special rockets was operated by the Beijing Weather Modification Office. The operation played a certain role in inhibiting the formation and development of cloud and precipitation. Based on the dynamic frame of MM5 and Reisner2 explicit cloud scheme, an AgI-seeding scheme is developed and used to simulate the rain mitigation operation which was carried out during 2005 LST–2012 LST. The seeding effect of the different seeding rate and the microphysical mechanism is analyzed. The results show that different seeding rates have much influence on the surface precipitation. When the seeding operation lasts seven minutes with seeding rate $5 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$, the surface rainfall is suppressed in two hours and enhanced after two hours. The microphysical mechanism of the rainfall decreasing is the depletion of supercooled water after AgI is injected into the cloud, the graupel content decreases and then the rain water decreases. While the microphysical mechanism of the rainfall increased two hours after seeding operation is just because a positive feedback link is formed among the rain water, cloud water, graupel, and the temperature, which finally leads to the increase of surface rainfall. But it should be noted that for the limitation of the single-moment cloud scheme, the maximum rainfall reduction being of only 8%–12%, there is a certain gap between the goal of the rain mitigation and the simulation result. It is necessary to further simulation with the double-moment cloud scheme.

Key words rain mitigation, mesoscale cloud-seeding model, physical mechanism, seeding effect

1 引言

近年来随着社会经济的发展,各城市进行大型露天活动越来越多,迫切需要气象部门通过人工消减雨来保障活动的顺利举行。其主要手段是基于播云静力催化和动力催化综合方法,在影响保护区的降水云系上风方,对其进行大规模、连续催化作业以设法改变其降水分布、使保护区内无雨或出现小雨空隙。作为人工影响天气技术重要内容的人工消雨技术,它是人工增雨和人工防雹技术的扩展与延伸(张纪淮等,2005),目前还处于研究起步阶段,是值得认真探索研究的新领域(叶家东等,1998),随着数值模式中微物理参数化方案的不断完善,数值模式已经成为人工影响天气理论研究及指导人工影响作业的重要工具。

近几年,国内发展了多种云播撒模式并作了不少催化研究。何观芳和胡志晋(1991)采用一维时变模式对积雨云进行了人工播撒冰晶的研究。毛玉华和胡志晋(1993)利用二维双参数雹云模式进行了人工冰晶和小水滴的播撒模拟,证实适当播撒能消雹增雨。黄燕和徐华英(1994)发展了二维碘化银(AgI)云播撒模式,研究了播撒对云微物理结构的影响。洪延超(1998,1999)发展了三维双参数 AgI 播撒模式,并进行催化防雹

的机制研究。Guo et al.(2006)建立了三维冰粒子分档播撒模式,研究了播撒位置、播撒时间、播撒率的不同对云动力、微物理和降水过程的影响,研究了优化播撒问题。

国外利用模式对播撒研究开展得比较早,Vali et al.(1988)利用一维定常模式研究了播撒对降水量的影响,Young(1974)利用二维定常云模式模拟了地形云播撒过程,结果显示在山体上风 40 km 处播撒能增加降雪。Koenig and Murray(1983)通过二维时变模式研究了增加冰晶数浓度对降水的影响。Bruitjes et al.(1995)用三维云模式研究了地形云的播撒过程。Levy and Cotton(1984)利用三维时变云模式研究了增加冰晶数浓度产生的动力效应,播撒后最大上升速度增加了 10%~20%。Farley et al.(1994)利用三维云模式研究了 AgI 和惰性气体在云中的运动及 AgI 对云和降水的影响。

随着计算机技术的迅速提高和计算方法的不断改进,中尺度模式也逐渐被用于人工影响的理论研究。中尺度模式能够更好地利用实际大气资料,模拟出更贴近自然的天气过程。Fritsch and Chappell(1981)利用中尺度模式研究了播撒的动力学效应。方春刚等(2009)实现了在中尺度模式 WRF 中加入 AgI 播撒剂与云相互作用的过程,模拟研究了播撒剂在云中传输、扩散与云相互作

用的过程,并提出了优化播撒方法。史月琴等(2008)利用 CAMS 中尺度云模式,对华南的一次冷锋降水进行了引晶催化的数值试验,研究了局地人工引晶对锋面对流云系降水的影响。孙晶等(2010)利用耦合了中国气象科学研究院双参数微物理方案的中尺度数值模式对长江中游一次梅雨锋暴雨过程进行了人工缓减暴雨的数值试验,并重点分析了减雨的可能方法和微物理机制。

本文通过在中尺度数值模式 MM5 的 Resiner2 方案中引入了 AgI 与云相互作用的过程(黄燕和徐华英,1994;Guo et al., 2006;方春刚等,2009),在中尺度模式 MM5 中实现了催化功能,利用加入催化方案的中尺度数值模式结合 2008 年 8 月 8 日在奥运会开幕式日进行的人工消减雨实际作业情况,分析过量播撒 AgI 抑制降雨的效果,初步探讨消雨的物理机制。

2 催化过程和试验设计

2.1 催化过程

中尺度模式 MM5 的 Resiner2 方案中包括云水、雨水、云冰、雪、霰等的比含水量预报及冰晶数浓度预报。我们在模式中加入了 AgI 预报方程,

$$\frac{dX_s}{dt} = -D_{xs} + S_1 + S_2, \quad (1)$$

其中, X_s 表示 AgI 粒子的比含量, t 表示时间, D_{xs} 表示 X_s 的次网格尺度混合项, S_1 和 S_2 分别表示 X_s 的源、汇项。汇项

$$S_2 = S_{bc} + S_{ic} + S_{br} + S_{ir} + S_{dv}, \quad (2)$$

其中, S_{bc} 、 S_{ic} 分别表示云滴由于布朗运动和惯性运动而与人工冰核产生碰撞冻结核化的过程, S_{br} 、 S_{ir} 分别表示雨滴由于布朗运动和惯性运动而与人工冰核产生碰撞冻结核化的过程, S_{dv} 表示水汽在人工冰核上的凝华核化。 S_1 以一矩形空间内均匀分布的 AgI 粒子初始浓度 X_{s0} 来表示。主要假设有: AgI 粒子是单分散谱,半径为 $0.1 \mu\text{m}$,忽略下落末速度,平均质量 m_s 为 $2.38 \times 10^{-14} \text{g}$;一个液滴只能捕获一个活化冰核发生接触核化;忽略冰质粒子与 AgI 粒子的碰并及 AgI 粒子的光解活化;所有的 AgI 粒子在 $T < -20^\circ\text{C}$ 时全部活化,人工冰核的活化曲线(Blair et al., 1973)为

$$N_a(\Delta T) = \exp[-0.022(\Delta T)^2 + 0.88\Delta T - 3.8], \quad 5 \leq \Delta T \leq 20 \quad (3)$$

$$N_a(\Delta T) = 1.6 \times 10^2, \quad \Delta T > 20 \quad (4)$$

其中, T 代表温度(单位: $^\circ\text{C}$), $\Delta T = T_0 - T$, $T_0 = 0^\circ\text{C}$, $N_a(\Delta T)$ 代表温度为 T 时的人工冰核的活化率。

(1) 云滴和雨滴与 AgI 粒子的接触冻结核化

$$S_{bc} = \frac{\Delta X_s}{\Delta t} = -4\pi X_s N_c R_c, \quad (5)$$

$$S_{ic} = \frac{\Delta X_s}{\Delta t} = -4R_c^2 X_s V_c E_{cs} N_c, \quad (6)$$

$$S_{br} = \frac{\Delta X_s}{\Delta t} = -4\pi D_s X_s \int_0^\infty \frac{1}{2} D_r N_{0r} \cdot \exp(-\lambda_r D_r) dD_r = -\frac{2\pi D_s X_s N_{0r}}{\lambda_r^2}, \quad (7)$$

$$S_{ir} = \frac{\Delta X_s}{\Delta t} = -\pi \alpha X_s E_{rs} \int_0^\infty \frac{1}{2} D_r^2 D_r^b N_{0r} \cdot \exp(-\lambda_r D_r) dD_r = -\frac{\pi \alpha X_s E_{rs} N_{0r} \Gamma(3+b)}{4\lambda_r^{3+b}}, \quad (8)$$

其中, N_c 是云滴浓度, $N_{0r} = 0.08 \text{ cm}^{-4}$, $\lambda_r = (\pi \rho_w N_{0r} / \rho q_r)^{1/4}$, α 和 b 为雨滴下落末速度经验常数 ($\alpha = 2115$, $b = 0.8$), D_r 代表雨滴的粒径, R_c 和 v_c 分别是云滴的半径和下落末速度 ($R_c = 10 \mu\text{m}$, $v_c = 0.1 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$), E_{cs} 和 E_{rs} 分别是云、雨滴与 AgI 粒子的碰并效率 ($E_{cs} = 10^{-4}$, $E_{rs} = 0.5 \times 10^{-4}$), AgI 粒子的扩散系数

$$D_s = KTB,$$

$$B = \frac{1 + (a'd/R_s)}{6\pi\eta R_s},$$

其中 B 代表迁移率,修正系数 $a' = 0.9$,平均自由程 $d = 0.1 \mu\text{m}$,催化粒子的半径 $R_s = 0.1 \mu\text{m}$,空气的粘滞系数 $\eta = 1.81 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,玻耳兹曼常数 $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$ 。

(2) 水汽在人工冰核上的凝华核化

当 $q_v \geq q_{vx}$ 时,

$$S_{dv} = m_s \frac{dN_{ad}\Delta T}{dt} = w \frac{\partial [X_s N_a(\Delta T)]}{\partial Z N_a(20)}, \quad 5 \leq \Delta T \leq 20, \quad (9)$$

$$S_{dv} = m_s N_{ad}(\Delta T) = X_s N_a(\Delta T) / N_a(20), \quad \Delta T > 20, \quad (10)$$

其中, q_v 代表实际水汽压, q_{vx} 代表饱和水汽压,过冷温度为 ΔT 时的人工冰核的凝华活化数为

$$N_{aD}(\Delta T) = X_s \left[\frac{N_a(\Delta T)}{N_a(20)} \right] m_s^{-1}.$$

2.2 试验设计

本文使用三维非静力平衡中尺度数值模式 MM5V3, 该模式的动力学框架与物理过程都比较完善, 提供了多种参数化方案可供选择, 适合于研究各种不同的天气过程。本文采用了 Grell 对流参数化方案、Blackadar 高分辨率边界层方案、Resiner2 微物理显式方案, 以及 RRTM 辐射计算方案。模式采用了三重嵌套, 格距分别是 27、9、3 km, 垂直方向为 23 层, 模式顶层为 100 hPa, 模式模拟的中心点设在 (40.0°N, 116.5°E)。模式输入的初始场为 NCEP 每 6 小时一次的 1° (纬度) × 1° (经度) 格点资料, 并用实际探空做订正。模拟开始时间为 2008 年 8 月 8 日 02 时 (北京时间, 下同), 共模拟 24 h; 当模拟到 8 日 20:05, 在第 3 个区域启用对 Resiner2 微物理过程的催化方案。

2.3 模拟结果对比分析

对比降水实况与未考虑催化影响的模拟降水结果 (图 1) 不难看出, 模式比较成功地模拟了降水的落区, 模拟出了与实况相近的两个降水中心, 模拟的雨带是沿着西南向东北方向分布的, 这与实况有较好的一致性。但模拟的降水强度比实况降水强, 尤其是在主要进行人工消减雨作业的北京西南部, 实际最大降水量为 10 mm 以上, 而模拟的未考虑催化的自然最大降水量达到了 30 mm 以上。

由图 2 可见, 模拟的回波强度及形状与实际观测的接近, 但模拟的回波位置较实际观测位置

明显偏北。

3 天气概况与实际作业情况

3.1 天气形势分析

2008 年 8 月上旬影响我国的天气系统主要有西风槽、西太平洋副热带高压及此高压南部的台风。北京地区较长时间处于副热带高压外围, 暖湿空气不断向北京地区输送。8 月 8 日副热带高压开始东退、减弱, 午后副热带高压进一步东退、北抬; 傍晚, 天气系统演变为北京地区西北部受冷空气影响, 西南部受 850 hPa 切变线影响, 同时地面倒槽形成, 并进一步加深。受 850 hPa 切变线和地面倒槽的影响, 北京西南不断有系统性对流产生, 并有向北移动之势, 同时北京西北部不断有冷空气分裂东移南压, 南北天气系统有打通之势。但由于北京西北部冷空气势力相对偏北, 北京西北部冷空气只影响到北京昌平以北的地区, 并且冷空气过了昌平中北部后逐渐向东北方向收缩。

20:30 后, 不断有降雨云团从西北、东北和西南影响北京郊区, 并向城区“合围”。北京市城区五棵松一带开始下雨; 21:25 的气象监测显示, 北京西南方向的河北保定地区出现超强对流云团、云高接近 20 km, 向东北方向的北京房山区移动推进。此外, 门头沟、顺义、密云也出现较强局地新生对流云团。

3.2 实际作业情况

根据 2008 年北京奥运会开、闭幕式人工消

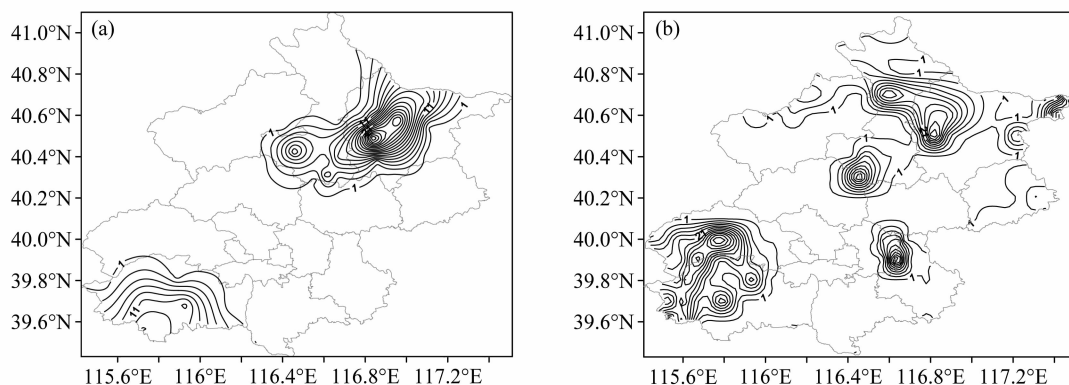


图 1 (a) 实况和 (b) 模拟的 2008 年 8 月 8 日 14 时至 9 日 00 时的降水量 (单位: mm)

Fig. 1 (a) Observed and (b) simulated rainfall (mm) during 1400 LST 8 Aug - 0000 LST 9 Aug 2008

(减)雨作业实施方案,北京市西北、正西、西南、正南、东南、东北 6 个方向分别设立了多道空中与地面作业防线。在西南方向,第一道防线位于河北省保定地区,主要负责对云和降水实施人工增雨提前降水作业;第二道防线则位于北京市房山区境内,主要担负对进入防区内的云和降水实施过量播撒作业。

根据当日的云(系)发生发展情况,8月8日从 16:08 开始,人工影响天气决策指挥人员分别组织了西北、正西和西南 3 个防线的地面火箭作

业点对出现的对流云团实施火箭拦截作业。截至 23:29,共组织实施了多轮地面消(减)雨拦截作业,其中主要的作业区域位于北京西南方向的第二道防线即北京的房山区境内(李宏宇等,2011)。

其中自 20:05 至 20:12,北京西南部的 10 余个火箭点针对不断发展加强的局地降水云团进行了过量播撒作业,作业量为 90 枚专用火箭弹,该火箭弹为 RYI-6300 专用型增雨防雹火箭弹,每枚携带 AgI 催化剂 25 g,且采用了中国气象科学研

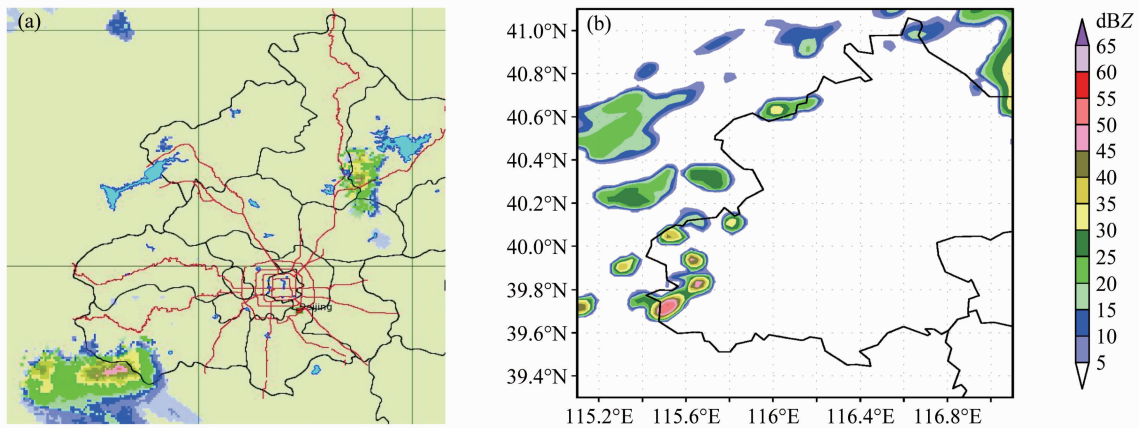


图 2 (a) 实况和 (b) 模拟的 2008 年 8 月 8 日 20 时 6 km 高度雷达回波

Fig. 2 (a) Observed and (b) simulated radar echo at the height of 6 km at 2000 LST on 8 Aug 2008

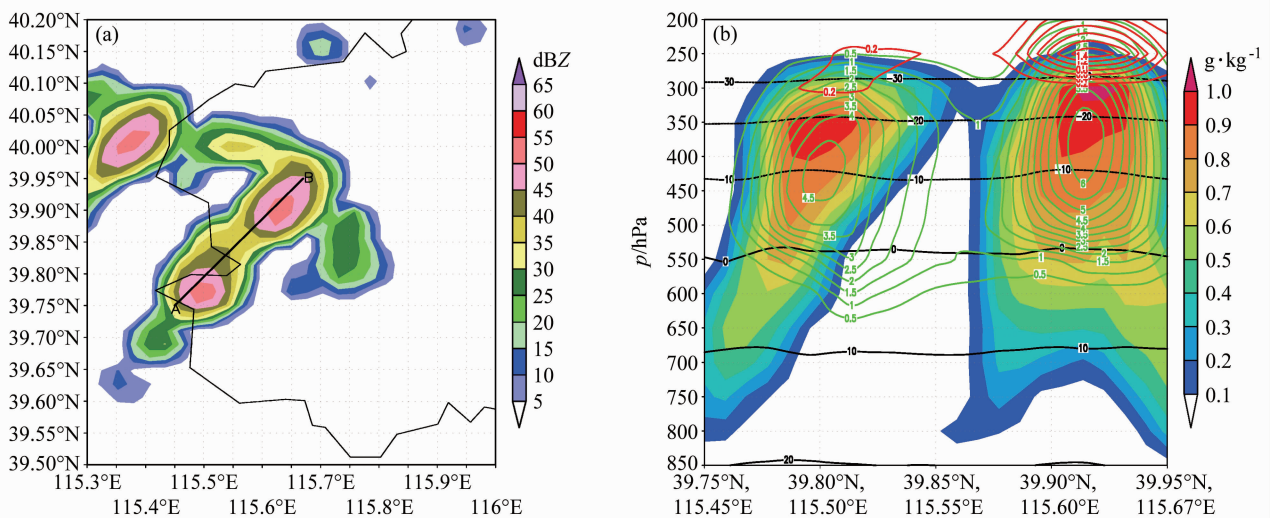


图 3 2008 年 8 月 8 日 20:05 北京西南对流云系 (a) 组合回波反射率 (AB 为其最强中心) 和 (b) 其最强中心的垂直剖面图 [阴影代表云水, 绿线代表霰的含量 (单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), 紫线代表冰晶含量 (单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), 黑线代表温度 (单位: $^{\circ}\text{C}$)]

Fig. 3 The convective cloud in the southwest part of Beijing at 2005 LST on 8 Aug 2008: (a) Composite radar echo (line AB is the strongest center); (b) cross-section along the strongest center [shadow denotes cloud water content, green lines denote graupel content ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), purple line denote ice content ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), and black line denotes temperature ($^{\circ}\text{C}$)]

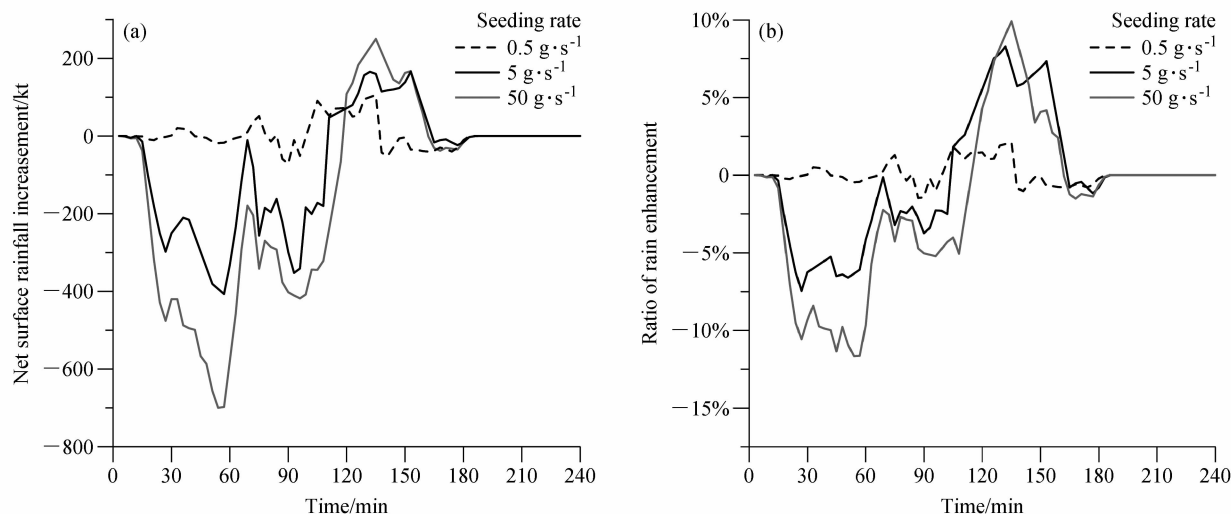


图 4 不同催化试验选择区域内 (a) 地面净增雨量总和及 (b) 增雨率

Fig. 4 (a) Accumulated surface rainfall and (b) the enhanced precipitation ratio within the selected area in different seeding experiments

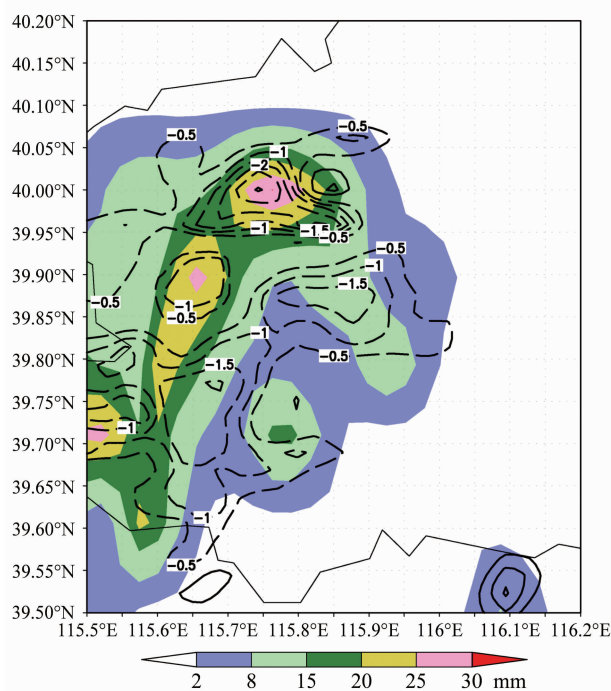


图 5 催化后 120 min 内自然降雨量分布 (阴影) 以及催化试验 ($5 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$ 播撒率) 与未催化试验的雨量差 (实线为正值, 虚线为负值)

Fig. 5 The accumulated 120-min precipitation in the natural test (shaded) and the difference between seeding test ($5 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$ seeding rate) and natural test (solid and dashed lines denote positive and negative values, respectively)

究院人工影响天气研究所研制的 BR-91-Y 型高效 AgI 复合焰剂, AgI 成核率云室检测结果在 -10°C 时为 $1.03 \times 10^{15} \text{ g}^{-1}$ (李宏宇等, 2011), 由于

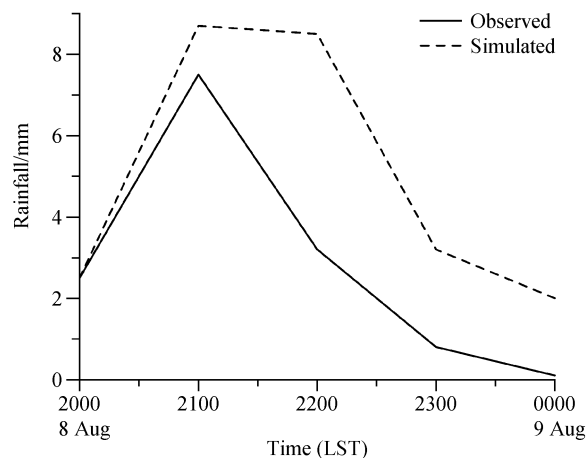


图 6 2008 年 8 月 8 日 20~24 时平均小时降水量

Fig. 6 Average hourly rainfall from 2000 LST to 2400 LST on 8 Aug 2008

播撒持续 7 min, 所以 AgI 的播撒速率接近 $5 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$, 当时火箭作业的仰角为 $60^\circ \sim 65^\circ$, 射高可以达到 6300 m 以上, 作业点主要分布于 ($39.5^\circ\text{N} \sim 39.9^\circ\text{N}$, $115.5^\circ\text{E} \sim 116.0^\circ\text{E}$)。

4 催化试验

由图 3a 和 3b 可以看出, 此时云水顶高已达到 -30°C , 中心值达到 $1.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 位于 -20°C 左右的区域, 并且冰晶向下传播, 和云水混合在一起形成了“播种—供应”的降水机制, 并且霰也发展得非常深厚, 云体发展已接近成熟。为

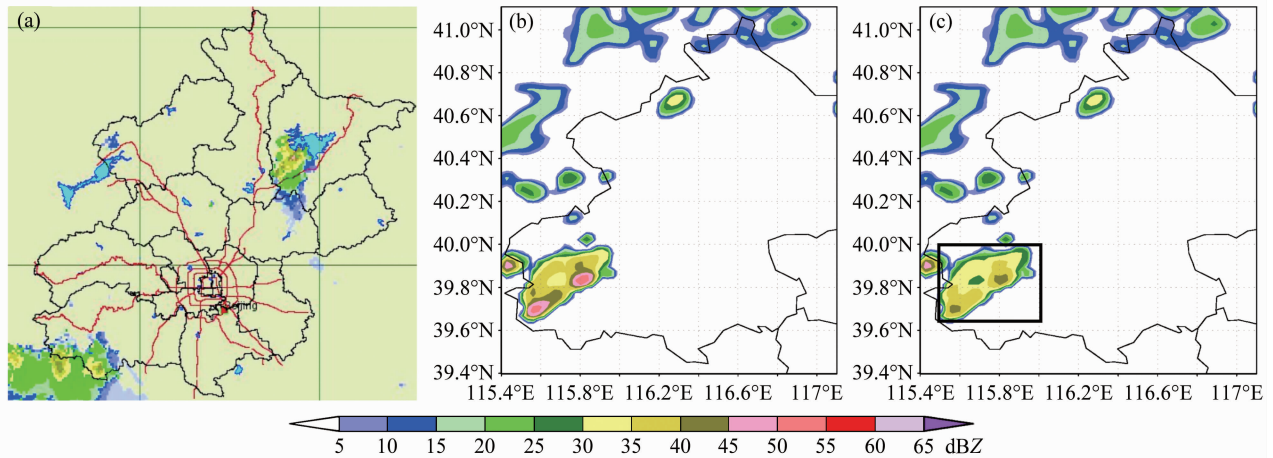


图7 2008年8月8日20:24 6 km高度的雷达回波:(a) 实况;(b) 未催化作业模拟;(c) 播撒作业($5 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$ 播撒率)催化模拟(方框为模拟的播撒作业区域)

Fig. 7 The radar echo at the height of 6 km at 2024 LST on 8 Aug 2008: (a) Observation; (b) natural model result; (c) seeded model result ($5 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$ seeding rate) (the rectangle denotes the seeding area)

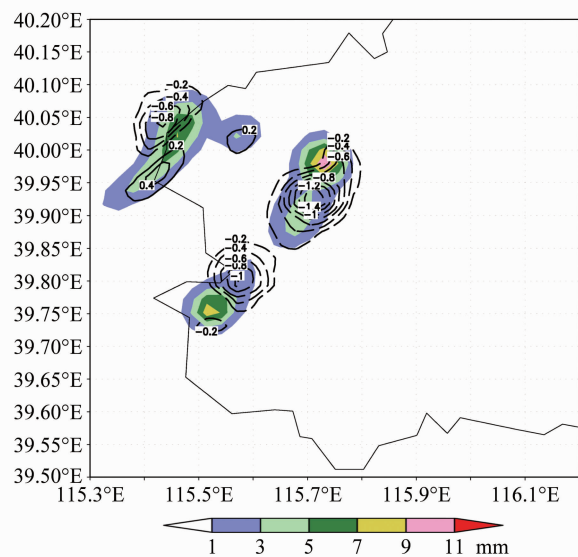


图8 催化后30 min地面净增雨量(阴影:6 min内的自然降水,点线:减雨区)

Fig. 8 Net surface rainfall increment in 30 min after seeding (shading: natural rainfall during 6 min; dotted line: decreasing rainfall)

了对此次消雨作业的效果和机制进行分析,参照实际作业情况,设计了以 $5 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$ 速率持续播撒AgI粒子7 min的播撒试验,AgI粒子的播撒高度为与实际相似的6000~6500 m之间,播撒区域也主要针对位于($39.5^\circ \text{N} \sim 39.9^\circ \text{N}$, $115.5^\circ \text{E} \sim 116.0^\circ \text{E}$)内的云体。为了研究不同的播撒量与作业效果的关系,我们还设计了播撒速率分别为

0.5 、 $50 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$ 的敏感性播撒试验,其它设置与控制试验相同。

5 催化效果

图4是催化后地面净增雨量以及增雨率随时间的演变。净增雨量是指催化作业主要影响的区域($39.5^\circ \text{N} \sim 40.2^\circ \text{N}$, $115.5^\circ \text{E} \sim 116.2^\circ \text{E}$)内催化降雨量与非催化降雨量的差值,而增雨率是指净增雨量与该区域内自然降水量的比值。从图4可以看出,当播撒率为 $0.5 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,在播撒作业后雨量有增有减,总体表现为增雨;当播撒率为 $5 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,在播撒作业后2 h内均表现为减雨,2 h后则体现为增雨,最强的减雨率和增雨率比较接近,为8%左右,消减雨和增雨的总体效果比较接近。当播撒率达到 $50 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,消雨效果更加明显,最强减雨率达到12%左右,并且消减雨的维持时间更长,总体效果体现为消雨。图5是催化后2 h内的累积自然降水和以 $5 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$ 的播撒率进行催化的累积减雨量分布图,可以看出消雨的总体效果偏弱,即使在消雨效果最好的区域,其消雨效果也仅为10%左右。

图6是在区域内对有降雨出现的自动气象站观测的雨量值进行平均后的降水量以及以 $5 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$ 的播撒率进行催化模拟中对有降水出现的格点进行平均处理后的降水量小时变化曲线。从图6可

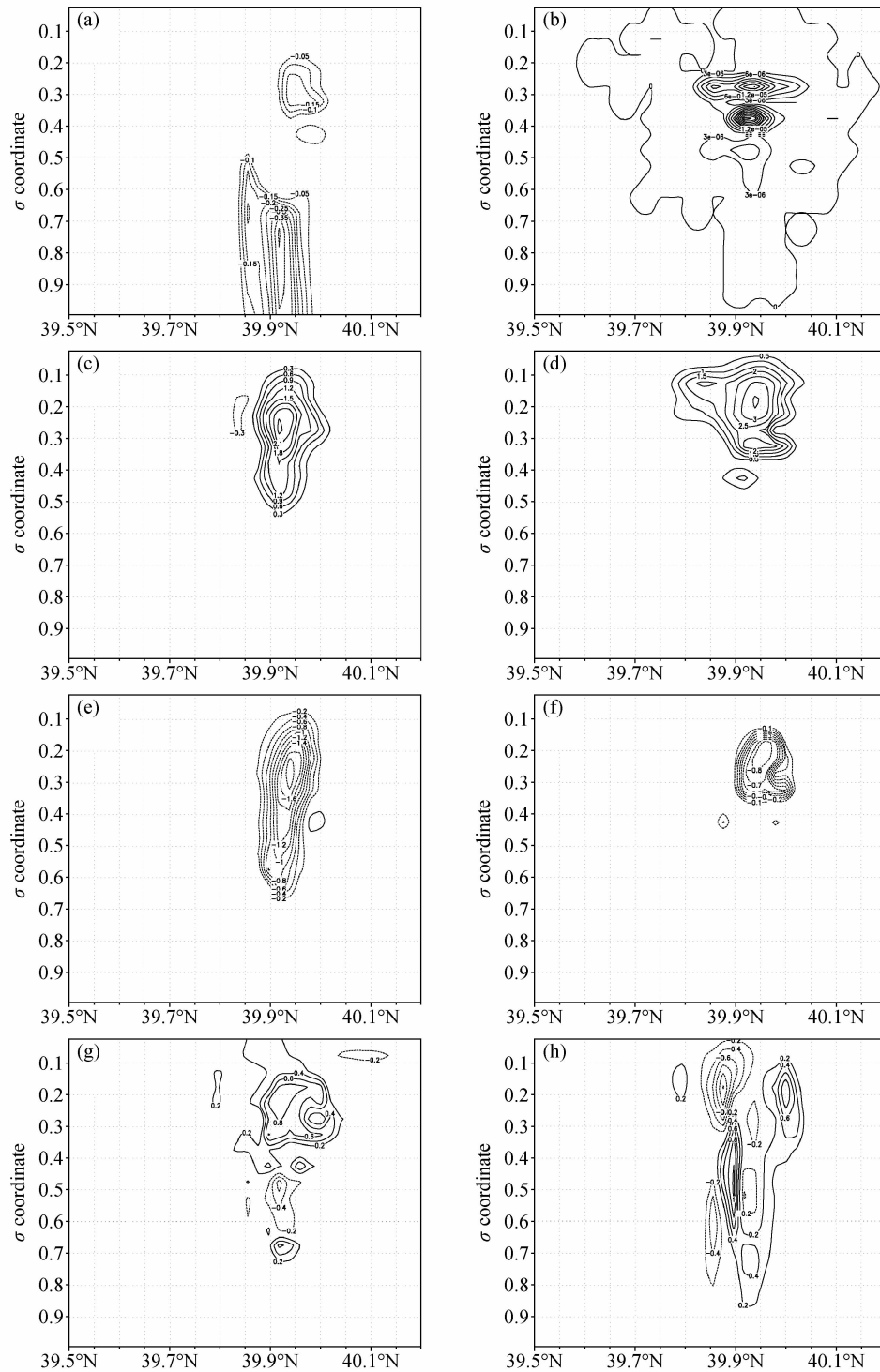


图 9 沿 115.7°E 垂直剖面的催化后 30 min 时物理量差值 (催化后的值减去相应自然云的值): (a) 雨水含量 (单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$); (b) AgI 含量 (单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$); (c) 雪晶含量 (单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$); (d) 冰晶含量 (单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$); (e) 霰含量 (单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$); (f) 云水含量 (单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$); (g) 温度 (单位: $^{\circ}\text{C}$); (h) 垂直运动速度 (单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 9 Differences of (a) rain water content ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), (b) AgI content ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), (c) snow content ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), (d) ice content ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), (e) graupel content ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), (f) cloud water content ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), (g) temperature ($^{\circ}\text{C}$), and (h) vertical velocity ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) in 30 min after seeding along the 39.75°N vertical cross-section (seeding variables minus natural ones)

以看出,观测和催化模拟的小时降水量变化趋势基本一致,即在 21 时降水量达到最大值,21 时以后雨量持续下降。但模拟的降水量较实际观测明显偏大,尤其是在 21 时后,这可能和在 21 时后北京市人工影响天气办公室又继续进行了大量消减雨作业有一定关系。

从图 7 可以看出,在进行催化作业后观测的最强的雷达回波强度为 50~55 dbZ;模拟的未进行催化作业的最强雷达回波强度达到了 55~60 dbZ;而模拟的催化作业后的回波强度为 50~55 dbZ,与实况更为接近。

6 催化机制分析

6.1 催化后的减雨阶段

由图 8 可见,在自然降水中心出现了明显的减雨,减雨区的范围出现在 ($39.7^{\circ}\text{N}\sim 40.0^{\circ}\text{N}$, $115.5^{\circ}\text{E}\sim 115.8^{\circ}\text{E}$)。从图 9 可见,在催化区域内高空冰晶大量增加,高空过冷云水大幅度减少,云水减少量最大达到了 $0.7\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。空中过冷雨水也大量减少,雨水减少最大达到了 $0.35\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,并且由于空中雨水含量的大幅减少,造

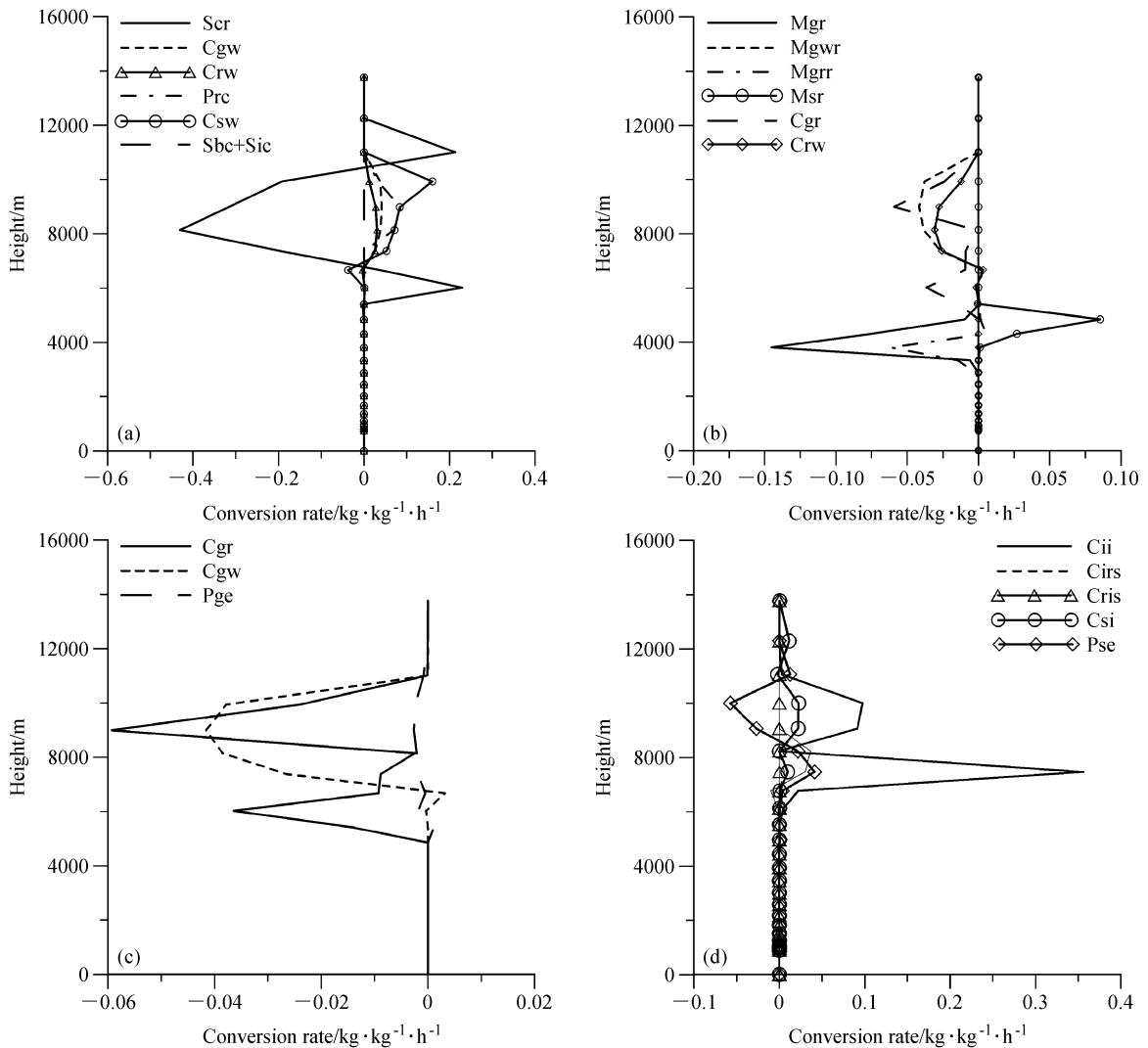


图 10 催化后 30 min 时通过地面减雨中心 (39.95°N , 115.7°E) 的 (a) 云滴源项、(b) 雨滴源项、(c) 霰源项、(d) 雪晶源项的微物理过程转化率 (催化后的值减去相应自然云的值)

Fig. 10 Differences of the microphysical conversion rates of (a) cloud water, (b) rain water, (c) graupel, (d) snow at (39.75°N , 115.7°E) in 30 min after seeding (seeding variables minus natural ones)

成降落地面的雨水也减少。另外, 高空中的霰减少, 雪晶大量增加。云中水凝物相态的转变引起云中温度增加, 增温最大达到 0.8°C , 主要位于冰晶和雪大量增加的区域。与增温区相对应, 云中上升速度也有所增加, 最大达到 $0.8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 由于空气的补偿运动, 在升速增大的区域附近出现了增大的补偿性的下沉运动。

从图 10 可以看出, 引起云水变化的过程主要包括: 水汽凝结 (Scr)、云滴向雨滴的转化 (Prc)、霰、雨滴与雪晶同云滴的碰并 (Cgw、Crw、Csw) 以及云滴在人工冰核上的活化 (Sbc、Sic) 等。导致云水减少的主要原因是水汽凝结成云水过程的大量减少 (Scr), 其原因是由于播撒 AgI 后在云中形成了大量的人工冰晶, 人工冰晶形成后出现的贝吉隆效应致使云水蒸发, 而人工冰晶凝华增长。由于云水的大量减少, 导致霰碰并云水过程减弱 (Cgw), 从而导致霰的减少。同时由于温度的增高, 霰的凝华增加量减少 (Pge), 由于霰的减少导致了霰融化形成雨水 (Mgrr), 霰碰并云水融化成雨水 (Mgwr), 霰碰并雨水融化成雨水 (Mgrr) 等过程的减少, 从而雨水减少。同时云水的减少也导致了雨水碰并云水过程 (Crw) 的减弱, 从而使雨水减少。反之, 雨水的减少导致了霰收集雨水增长过程 (Cgr) 减弱, 也促使了霰的减少, 从而在雨水减少和霰减少之间形成了正反馈。由于催化作业增加了大量的冰晶, 导致了冰晶聚并 (Cii) 过程的增强, 这也是雪晶增多的主要原因。而雪晶的凝华增长 (Pse)、雪晶与冰晶的碰并 (Csi)、冰晶与雨滴碰冻形成雪晶 (Cirs) 以及雨滴与冰晶的碰冻形成雪晶 (Cris) 的过程对雪晶的影响较弱。

6.2 催化后的增雨阶段

从图 11 可以看出, 在自然降水中心出现了明显的增雨, 增雨区的中心出现在 (40.0°N , 116.6°E)。从图 12 可以看出, 这个阶段催化后的雨水增加非常明显, 最大达到 $1.2\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 并最终使地面降水增加。通过 2 个多小时的扩散与反应, 云层里的 AgI 较催化初期已明显减少, 空中冰晶与雪晶较催化初期也明显减少, 同时空中霰和云水明显增多, 在霰和云水增多的区域温度也明显上升; 与增温区相对应, 云中上升速度也有所增加, 最大达到 $3.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

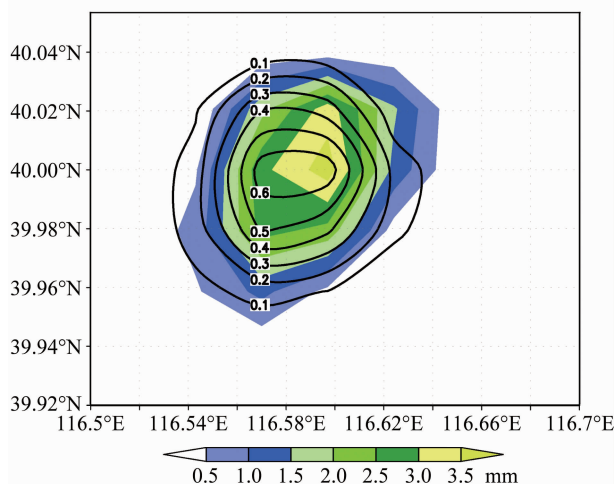


图 11 催化后 130 min 地面净增雨量 (阴影: 6 min 内的自然降水, 实线内为增雨区)

Fig. 11 Net surface rainfall increment in 130 min after seeding (shading: natural rainfall during 6 min; areas with increasing rainfall are within solid lines)

从图 13 可以看出, 雨水增多主要来源于云水向雨水的自动转化 (Pra)、雨水收集云水 (Crw)、雨滴的凝结 (Pre) 以及霰的融化等 (Mgr) 过程。霰的增多主要得益于在云水和雨水增多的情况下, 霰碰并云水和雨水增长的过程 (Cgr、Cgw) 加大所致, 云水增多的主要原因是由于温度增加, 对应的上升速度增大, 导致水汽凝结增多 (Scr)。而温度增加的原因则主要是由于冻结潜热 (Fus, 对应于 Cgr、Cgw 等过程) 和凝结潜热 (Con, 对应于 Pre 等过程) 释放所致, 而凝华潜热 (Sub) 相对较弱。最终它们之间形成了一个正反馈, 促使地面降雨增加。

7 结论

利用 NCEP 再分析资料和加入催化方案的中尺度 MM5 模式, 对 2008 年 8 月 8 日奥运会开幕式日经人工减雨作业后的降水情况基本正确模拟的基础上, 对 20 时左右的没催化作业进行了对比模拟分析, 得出以下结论:

(1) AgI 播撒率对降水量改变影响明显, 当播撒速率为 $0.5\text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 催化区域内主要表现为增雨; 当播撒速率为 $5\text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 在作业后的 2 h 内则体现为减雨, 2 h 后为增雨, 最强的减雨率和增雨率比较接近, 为 8% 左右, 消减雨和增雨的总

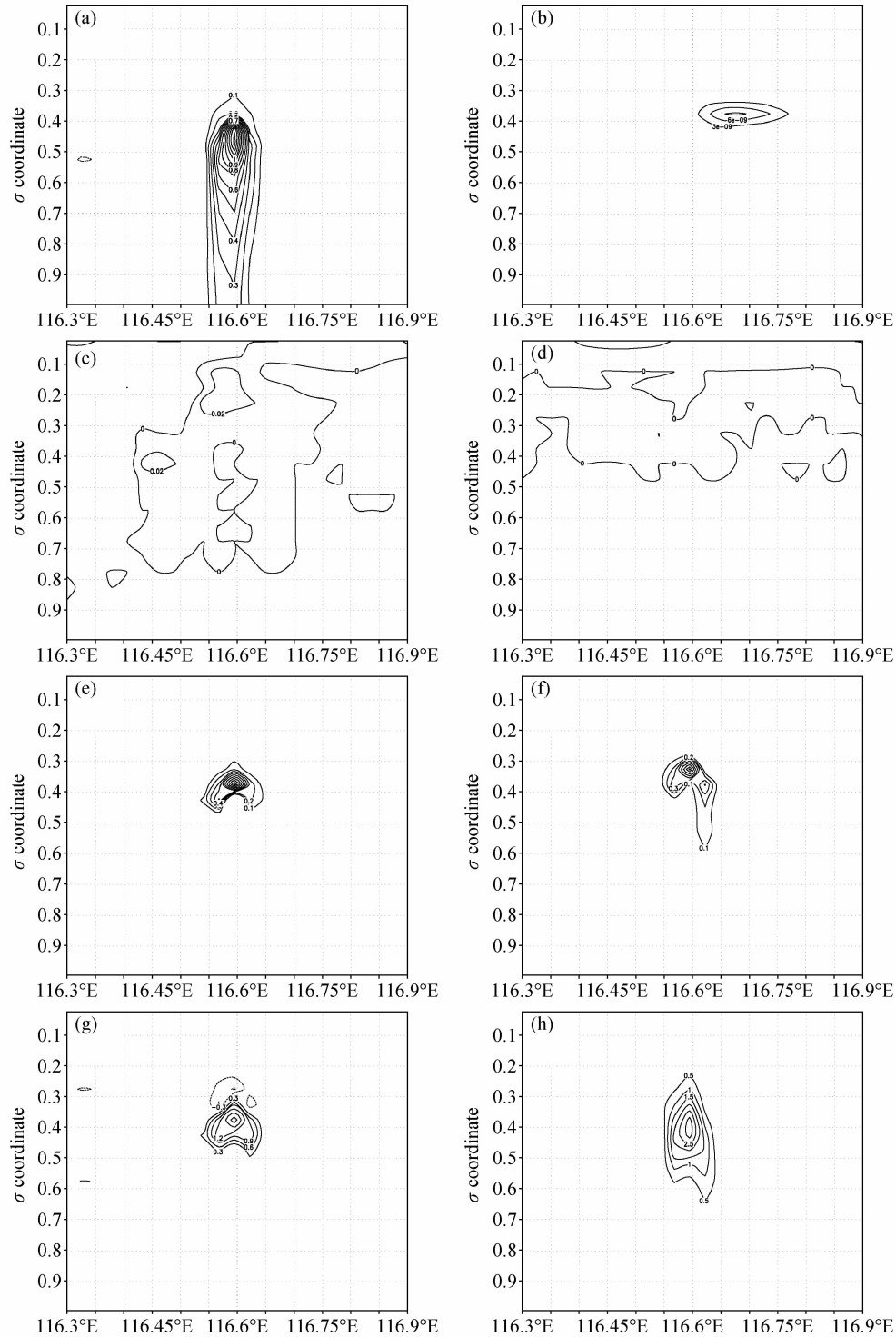


图 12 沿 40.0°N 垂直剖面催化后 130 min 时的物理量差值: (a) 雨水含量 (单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)、(b) AgI 含量 (单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)、(c) 雪晶含量 (单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)、(d) 冰晶含量 (单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)、(e) 霰含量 (单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)、(f) 云水含量 (单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)、(g) 温度 (单位: $^{\circ}\text{C}$)、(h) 垂直运动速度 (单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 12 Differences of (a) rain water content ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), (b) AgI content ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), (c) snow content ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), (d) ice content ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), (e) graupel content ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), (f) cloud water content ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), (g) temperature ($^{\circ}\text{C}$), and (h) vertical velocity ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) in 130 min after seeding along 40.0°N vertical cross-section (seeding variables minus natural ones)

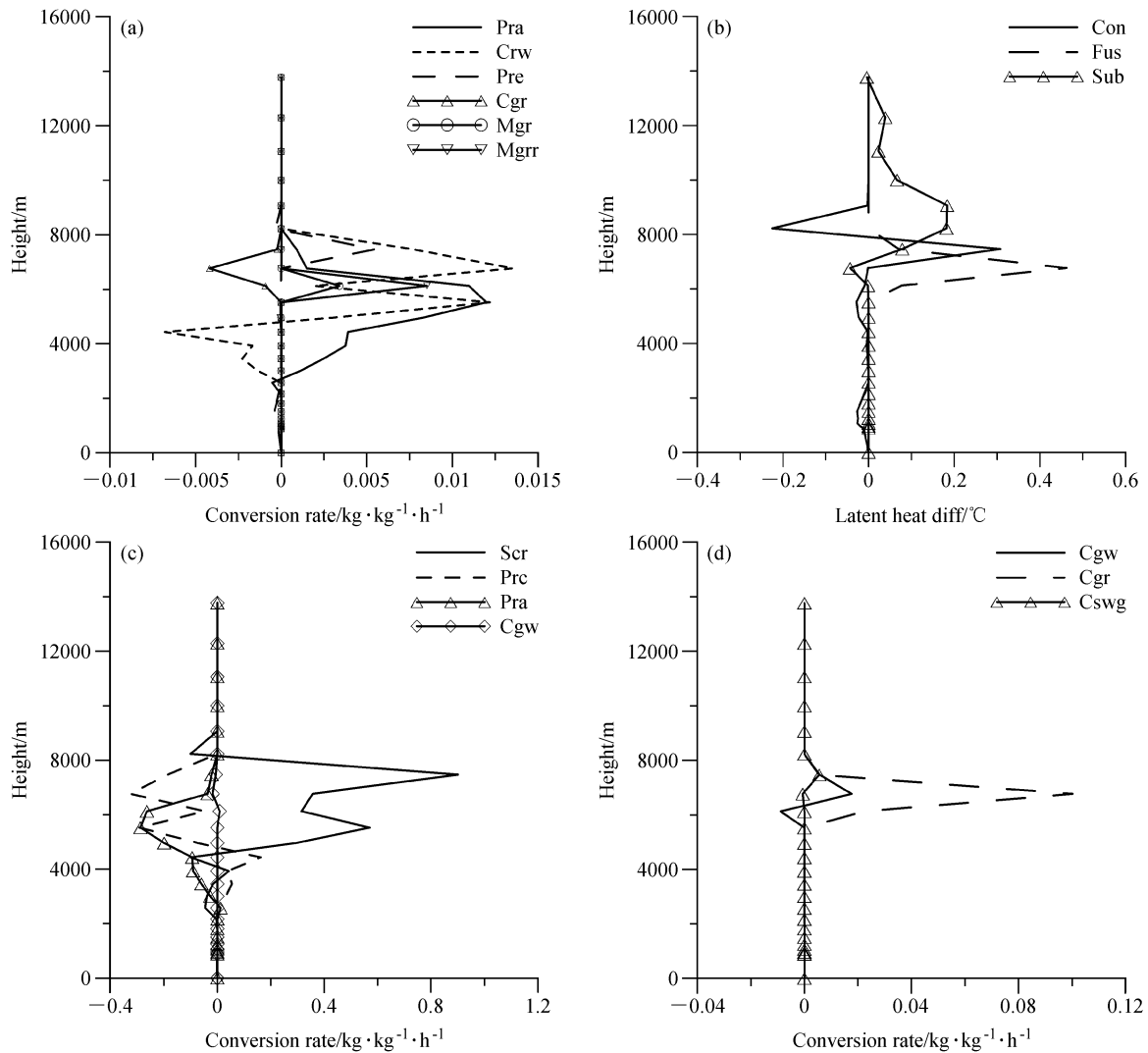


图 13 催化后 130 min 时通过地面减雨中心 (40.0°N, 116.6°E) 的 (a) 雨滴源项的微物理过程转化率、(b) 潜热差值廓线、(c) 云滴源项的微物理过程转化率、(d) 霰源项的微物理过程转化率 (催化后的值减去相应自然云的值)

Fig. 13 Differences of (a) microphysical conversion rate of rain water, (b) latent heat, microphysical conversion rates of (c) cloud water and (d) graupel at (40.0°N, 116.6°E) in 130 min after seeding (seeding variables minus natural ones)

体效果比较接近; 当播撒率达到 $50 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 消雨效果更加明显, 最强减雨率达到 12% 左右, 并且消减雨的维持时间更长, 总体效果体现为消雨。

(2) 对催化作业后雨量改变微物理机制分析可以发现, 减雨主要是由于大量播撒 AgI 后导致空中云水大量减少, 进一步导致霰减少, 霰的减少导致雨水的减少; 而 2 h 后的增雨机制则是由于在雨水、云水、霰以及温度之间形成了正反馈, 最终导致地面降水的增加。

(3) MM5 中的 Reisner2 方案是一种含霰的复杂混合相显式云物理方案, 该方案包含了水汽、

云水、雨水、冰晶、雪和霰的混合比预报方程。但该方案采用的是单参数谱演变方案, 粒子的谱分布采用 M-P 式。方案中雪、霰、雨等水成物的数浓度都没有计算, 无法模拟过量催化后雪、霰等数浓度剧增、个体变小、下落速度锐减、被上升气流托住无法下落成雨的过程, 与实际的催化作业引起云降水变化的物理机制有所差距。正是由于这种单参方案的局限性, 致使模拟的最大减雨率仅为 8%~12%, 离消雨的要求尚有差距。在未来的研究中, 应采用双参数谱演变方案针对大量个例进行催化模拟研究; 分析统计结果, 以得

出更加合理和普遍的结论。

参考文献 (References)

- Blair D N, Davis B L, Dennis A S. 1973. Cloud chamber tests of generators using acetone solutions of AgI - NaI, AgI - KI, and AgI-NH₄I [J]. J. Appl. Meteor., 12: 1012 - 1017.
- Bruintjes R T, Clark T L, Hall W D. 1995. The dispersion of tracer plumes in mountainous regions in central Arizona: Comparisons between observations and modeling results [J]. J. Appl. Meteor., 34: 971 - 988.
- 方春刚, 郭学良, 王盘兴. 2009. 碘化银播撒对云和降水影响的中尺度数值模拟研究 [J]. 大气科学, 33 (3): 621 - 633. Fang Chungang, Guo Xueliang, Wang Panxing. 2009. The physical and precipitation response to AgI seeding from a mesoscale WRF-based seeding model [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (3): 621 - 633.
- Farley R D, Nguyen P, Orville H D. 1994. Numerical simulation of cloud seeding using a three-dimensional cloud model [J]. Journal of Weather Modification, 26: 113 - 124.
- Fritsch J M, Chappell C F. 1981. Preliminary numerical tests of the modification of mesoscale convective systems [J]. J. Appl. Meteor., 20: 910 - 921.
- Guo X L, Zheng G G, Jin D Z. 2006. A numerical comparison study of cloud seeding by silver iodide and liquid carbon dioxide [J]. Atmos. Res., 79: 186 - 226.
- 何观芳, 胡志晋. 1991. 人工影响积雨云机制的数值研究 [J]. 应用气象学报, 2 (1): 32 - 39. He Guanfang, Hu Zhijing. 1991. Numerical study on mechanism of artificial modification of cumulonimbus cloud [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 2 (1): 32 - 39.
- 洪延超. 1998. 三维冰雹云催化数值模式 [J]. 气象学报, 56 (6): 641 - 653. Hong Yanchao. 1998. A 3-D hail cloud numerical seeding model [J]. Acta Meteorological Sinica (in Chinese), 56 (6): 641 - 653.
- 洪延超. 1999. 冰雹形成机制和催化防雹机制研究 [J]. 气象学报, 57 (1): 30 - 44. Hong Yanchao. 1999. Study on mechanism of hail formation and hail suppression with seeding [J]. Acta Meteorological Sinica (in Chinese), 57 (1): 30 - 44.
- 黄燕, 徐华英. 1994. 播撒碘化银粒子进行人工防雹的数值试验 [J]. 大气科学, 18 (5): 612 - 622. Huang Yan, Xu Huaying. 1994. Numerical experiments on hail suppression by AgI seeding [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 18 (5): 612 - 622.
- Koenig L R, Murray F W. 1983. Theoretical experiments on cumulus dynamics [J]. J. Atmos. Sci., 40: 1241 - 1256.
- Levy G, Cotton W R. 1984. A numerical investigation of mechanisms linking glaciation of the ice-phase to the boundary layer [J]. J. Climate Appl. Meteor., 23: 1505 - 1519.
- 李宏宇, 马建立, 马永林, 等. 2011. 北京 2008 年奥运会开幕日云、降水特征及人工影响天气作业分析 [J]. 气候与环境研究, 16 (2): 175 - 187. Li Hongyu, Ma Jianli, Ma Yonglin, et al. 2011. Characteristics of cloud-precipitation and the impact of weather modification activities on the opening day of the Beijing 2008 Olympics [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 16 (2): 175 - 187.
- 毛玉华, 胡志晋. 1993. 强对流云人工增雨和防雹原理的二维数值研究 [J]. 气象学报, 51 (2): 184 - 194. Mao Yuhua, Hu Zhijin. 1993. The 2-D numerical study of rain-enhancement and hail-suppression principles on convective clouds [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 51 (2): 184 - 194.
- 史月琴, 楼小凤, 邓雪娇, 等. 2008. 华南冷锋云系的人工引晶催化数值试验 [J]. 大气科学, 32 (6): 1256 - 1275. Shi Yueqin, Lou Xiaofeng, Deng Xuejiao, et al. Seeding numerical experiments of cold front clouds in South China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32 (6): 1256 - 1275.
- 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.
- Vali G, Koenig L R, Yoksas T C. 1988. Estimate of precipitation enhancement potential for the Duero basin of Spain [J]. J. Appl. Meteor., 27: 829 - 850.
- 叶家东, 范蓓芬, 杜京朝. 1998. 人工增雨试验中的反效果问题 [J]. 应用气象学报, 9 (3): 336 - 344. Ye Jiadong, Fan Beifen, Du Jingchao. 1998. Study of negative effects in artificial precipitation enhancement experiments [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 9 (3): 336 - 344.
- Young K C. 1974. A numerical simulation of wintertime, orographic precipitation; Part II. Comparison of natural and AgI-seeded conditions [J]. J. Atmos. Sci., 31: 1749 - 1767.
- 张纪淮, 王广河, 关立友, 等. 2005. 人工消雨 [C] // 第十四届全国云降水物理和人工影响天气科学会议 (下册). 北京: 气象出版社, 611 - 620. Zhang Jihuai, Wang Guanghe, Guan Liyou, et al. 2005. Rain mitigation [C] // 14th Chinese Scientific Conference on Cloud and Precipitation Physics and Weather Modification (Part II) (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 611 - 620.