

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.

碘化银播撒对云和降水影响的中尺度数值模拟研究

方春刚^{1,2,3} 郭学良^{2,3} 王盘兴¹

1 南京信息工程大学大气科学系, 南京 210044

2 中国科学院大气物理研究所云降水物理与强风暴实验室, 北京 100029

3 中国气象科学研究院, 北京 100081

摘 要 通过在 WRF (Weather Research and Forecasting) 中尺度天气数值模式中引入碘化银与云相互作用过程, 建立了中尺度播撒碘化银数值模式。研究了碘化银播撒对于中尺度对流天气过程中云和降水的影响, 研究了不同播撒部位、播撒时间和播撒剂量情况下碘化银的扩散、传输及其对云中水成物和降水量的影响。研究结果表明, 碘化银在云中的扩散传输过程与播撒的位置有很大关系, 在最大上升气流区播撒的碘化银能随着气流更快地扩散到云体上部过冷水含量丰富的区域, 播撒在云上层入流区和云下层入流区的碘化银扩散到云中过冷水区需要时间更长, 同时有大部分停留在云体边缘。碘化银能与云中过冷水相互作用, 消耗过冷水使云中冰晶数浓度明显增加, 从而使霰粒子转化减少, 过冷水更多地转化为雪粒子, 过冷水凝结释放出潜热使上升气流增强, 促进了对流发展。由于雨水含量的增加, 地面降水也出现增加。碘化银播撒率对地面降水量影响很大, 当播撒率为 0.6 g/s 时, 播撒对降水的影响时间超过 4 小时, 增雨的效果更好。播撒率为 0.1 g/s 时增雨效果不明显, 当播撒率为 1.2 g/s 时, 对总降水可能出现抑止作用。对比碘化银播撒率为 0.6 g/s 时 12 小时地面增雨量, 在云上层入流区播撒碘化银试验中, 地面增雨量比在最大过冷水含量区的催化试验提高了 48.7%, 最大上升气流区播撒试验增雨效果最好, 地面增雨量比在最大过冷水区域播撒提高了 72.1%。

关键词 中尺度播撒数值模式 AgI 播撒 云物理和降水

文章编号 1006-9895 (2009) 03-0621-13

中图分类号 P426

文献标识码 A

The Physical and Precipitation Response to AgI Seeding from a Mesoscale WRF-based Seeding Model

FANG Chungang^{1, 2, 3}, GUO Xueliang^{2, 3}, and WANG Panxing

1 Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

2 Laboratory of Cloud and Precipitation Physics and Severe Storms, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

3 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

Abstract A WRF-based AgI-seeding model has been developed and used to simulate cloud seeding effects on cloud physics and precipitation of a convective cloud system in Beijing. The effects of diffusion and transport of seeding agent under different seeding locations, seeding time and seeding amounts on cloud hydrometeor and precipitation have been discussed. The results show that the diffusion and transport of AgI agent are strongly dependent on the

收稿日期 2007-11-19, 2008-03-28 收修定稿

资助项目 国家科技支撑计划重点项目 2006BAC12B03, 国家自然科学基金资助项目 40333033、40575003

作者简介 方春刚, 男, 1981 年出生, 博士研究生, 主要从事中尺度和云降水物理方向研究。E-mail:fang_chungang@126.com

seeding location. AgI injected into the maximum supercooled cloud water area or the maximum updraft area can be transported to the region of abundant supercooled water. It needs longer time for AgI seeded into the upper and lower inflow areas transporting to the supercooled water area of the cloud, and most of the particles assemble at the edge of the cloud. The seeding induces the rapid depletion of supercooled water and the increase of cloud ice particles. The graupel content translation decreases and the snow formation enhances. The latent heat from the supercooled water freezing enhances the vertical velocity and the rainfall increases because the rain water content increases. The precipitation change is greatly affected by the seeding rate (SR). When the SR is 0.6 g/s, the seeding can influence surface rainfall for more than 4 hours and has a better effect on precipitation enhancement. When the SR is 0.1 g/s, little rainfall can be enhanced. The rainfall can be suppressed when the SR is 1.2 g/s. In the case of SR being 0.6 g/s, the 12-hour surface precipitation with AgI seeded in the upper inflow area is increased by 48.7% compared with that with AgI seeded in the maximum supercooled cloud water area. The effect in the case seeded in the maximum updraft area is the most. The precipitation is enhanced by 72.1% in the case seeded in the maximum updraft area compared with that seeded in the maximum supercooled cloud water area.

Key words mesoscale cloud-seeding model, AgI-seeding, cloud physics and precipitation

1 引言

从 1940 年代末以来,现代人工影响天气在全世界大范围得以快速发展。人工影响天气理论也随着人们对云和降水物理过程认识的提高不断完善。随着数值模式中微物理过程参数化方案的完善,数值模式已经成为人工影响天气理论研究及指导人影作业的重要工具(Orville, 1996; 周毓荃等, 2003; 李宏宇等, 2003; Garstag et al., 2005)。

近几年,国内发展了多种云播撒模式并作了不少催化研究。何观芳等(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,毛玉华等(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。黄燕等(1994)发展了二维 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)发展了三维双参数碘化银播撒模式,并进行催化防雹的机制研究。中国气象科学研究院发展了三维对流云播撒模式(于达维等, 2001),并应用于播撒作业模拟试验。李兴宇等(2005)对三维冰雹云模式进行了改进,把人工冰晶作为单独预报量,研究发现人工冰晶增加使雪、霰和冻滴增加,转化为冰雹的数量也增加,冰雹尺度减少。何宏让等(1998)研究了改变初始云滴浓度和冰核浓度对对流性降水的影响。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。同时,云模式在研究人

工防雹、人工增雨机理、优化播撒方法的建立等方面进行了大量应用(孙海燕等, 2005; 陈宝君等, 2005, 2007; 刘晓莉等, 2006; Guo et al., 2007)。在播撒剂的传输扩散方面, Yu et al. (2000) 利用三维时变烟团轨迹模式,研究了催化剂的扩散传播以及播云产生的有效区域问题。

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 et al. (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 et al. (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,播撒后最大上升和下沉速度增加了 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碘化银对云和降水的影响。

随着计算机技术和计算方法的迅速提高,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 et al. (1981) 利用中尺度模式研究了播撒的动力学效应。Levin et al. (1997) 通过在中尺度模式中加入惰性气体,没有考虑播撒物与云中水凝物相互作用过程,研究了播撒试剂在云中的传播过程。Ćurić et al. (2006, 2007) 利用 The Advanced Regional Prediction (ARPS) 中尺度模式研究了风场对播撒物质的传播的影响,认为播撒的

传播和云外围风场有很大关系, 并研究了播撒的防雹增雨效果。

为了进一步研究播撒剂在中尺度天气系统中的传播扩散及播撒剂对云和降水的影响, 我们在中尺度模式(WRF)中加入碘化银播撒剂与云相互作用过程(黄燕等, 1994; Guo et al., 2006), 模拟研究播撒剂在云中的传输、扩散以及与云的相互作用, 进而研究云对播撒剂的微物理、动力和降水的响应机理, 从而提出优化播撒方法。

2 模式和试验设计

2.1 催化过程

WRF 中尺度模式中的 Thompson 方案包括了云水、雨水、云冰、雪、霰等的比含水量预报量及冰晶数浓度预报量。我们在模式中加入了碘化银预报方程,

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

其中, X_s 表示碘化银粒子的比含量, D_{Xs} 表示 X_s 的次网格尺度混合项。 S_1 表示 X_s 的源项, S_2 表示 X_s 的汇项。汇项如(2)式,

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

其中, S_{bc} 、 S_{ic} 、 S_{br} 和 S_{ir} 分别表示云滴和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。

模式中 X_s 的源项以一矩形空间内均匀分布的碘化银粒子初始浓度 X_{s0} 来表示。主要假设有: 碘化银粒子是单分散谱, 半径为 $0.1 \mu\text{m}$, 忽略下落末速, 平均质量 $m_s = 2.38 \times 10^{-14} \text{g}$; 一个液滴只能捕获一个活化冰核发生接触核化; 忽略冰质粒子与碘化银粒子的碰并及碘化银粒子的光解活化; 所有的碘化银粒子在 $t < -20^\circ\text{C}$ 时全部活化, 人工冰核的活化曲线(Blair et al., 1973) 如

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

$$N_a(\Delta T) = 1.6 \times 10^2, \quad \Delta T \geq 20^\circ\text{C}, \quad (4)$$

其中, $\Delta T = T_0 - T$ 。下面分别给出 X_s 的各转化率公式(黄燕等, 1994; Guo et al., 2006)。

(1) 云滴和雨滴与碘化银粒子的接触冻结核

化:

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

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

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

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

其中, N_c 是云滴浓度, $N_{0r} = 0.08 \text{ cm}^{-4}$, $\lambda_r = (\pi \rho_w N_{0r} / \rho q_r)^{\frac{1}{4}}$ 。在 Thompson 方案中,

$$N_{0r} = \left(\frac{N_{1,r} - N_{2,r}}{2} \right) \tanh \left[\frac{4(q_{r0} - q_r)}{q_{r0}} \right] + \frac{N_{1,r} + N_{2,r}}{2}, \quad (9)$$

$N_{1,r} = 100 \text{ cm}^{-4}$, $N_{2,r} = 0.08 \text{ cm}^{-4}$, $q_{r0} = 1 \times 10^{-4}$; a 和 b 为雨滴下落末速度经验常数 ($a = 2115 \text{ cm}^{1-b}$, $b = 0.8$), R_c 和 V_c 是云滴的半径和下落末速度 ($R_c = 10 \mu\text{m}$, $V_c = 0.1 \text{ cm/s}$), E_{cs} 和 E_{rs} 分别是云和雨滴与碘化银粒子的碰并效率 ($E_{cs} = 10^{-4}$, $E_{rs} = 0.5 \times 10^{-4}$), D_s 是碘化银粒子的扩散系数, $D_s = kTB$, 其中

$$B = \frac{1 + (a'd/R_s)}{6\pi \eta R_s}, \quad (10)$$

$a' = 0.9$, $d = 0.1 \mu\text{m}$, $R_s = 0.1 \mu\text{m}$, $\eta = 1.81 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ 。

(2) 水汽在人工冰核上的凝华核化:

当 $q_v \geq q_{vs}$ (饱和) 时, 当 $5^\circ\text{C} \leq \Delta T \leq 20^\circ\text{C}$,

$$S_{dv} = m_s \frac{dN_{ad}(\Delta T)}{dt} = w \frac{\partial [X_s N_a(\Delta T)]}{\partial Z} \bigg/ N_a(20), \quad (11)$$

当 $\Delta T \geq 20^\circ\text{C}$ 时,

$$S_{dv} = m_s N_{ad}(\Delta T) = X_s N_a(\Delta T) / N_a(20), \quad (12)$$

其中,

$$N_{ad} = X_s \left[\frac{N_a(\Delta T)}{N_a(20)} \right] m_s^{-1} \quad (13)$$

是 ΔT 温度下人工冰核的凝华活化数。

碘化银与云的相互作用包括接触核化和凝华核化过程,模式中过程包括如下:

$$U_{\text{csi}} = q_c \frac{N_{\text{ac}}(\Delta T)}{\Delta t N_c}, \quad (14)$$

$$U_{\text{rss}} = q_r \frac{N_{\text{ar}}(\Delta T)}{\Delta t N_r}, \quad (15)$$

$$U_{\text{vsi}} = m_{i0} S_{\text{dv}} m_s^{-1}, \quad (16)$$

U_{csi} 和 U_{rss} 分别表示通过接触核化云水转化为云冰和雨水转化为雪的速率, U_{vsi} 表示水汽在水面饱和条件下在人工冰核上凝华成冰晶。 N_r 表示雨滴的数浓度。 $N_{\text{ac}}(\Delta T)$ 、 $N_{\text{ar}}(\Delta T)$ 表示 ΔT 温度下云、雨滴收集的活化冰核数,

$$N_{\text{ac}}(\Delta T) = -(S_{\text{bc}} + S_{\text{ic}}) \left[\frac{N_{\text{a}}(\Delta T)}{N_{\text{a}}(20)} \right] \Delta t m_s^{-1}, \quad (17)$$

$$N_{\text{ar}}(\Delta T) = -(S_{\text{br}} + S_{\text{ir}}) \left[\frac{N_{\text{a}}(\Delta T)}{N_{\text{a}}(20)} \right] \Delta t m_s^{-1}. \quad (18)$$

2.2 试验设计

本文利用的 WRF (Weather Research and Forecasting) 模式是由 NCAR、NCEP 和 FSL/NOAA 等联合开发研制的中尺度数值模式。采用双重嵌套网格对这次过程进行模拟研究,模式区域的中心位置是 (38.5°N, 116.5°E), 模式在垂直方向分 31 层,水平格点数分别为 100×100、100×100; 相应的水平格距为 12 km、4 km (图 1)。

采用分辨率为 1°×1°、时间间隔为 6 小时的 NCEP 再分析资料作为模式初始场和侧边界条件。模拟选用欧拉质量坐标和 Runge-Kutta 3rd 时间积分方案,大区域采用 Kain-Fritsch 积云对流参数化

方案,小区域采用显式方案。微物理方案采用催化方案。模式模拟了 2004 年 8 月 12 日 00 时到 12 时 [国际协调时 (下同)] 的一次降水过程,时间步长分别为 24 s 和 8 s。

2.3 模拟结果对比分析

模式模拟的个例是 2004 年 8 月 12 日北京地区的一次降水过程。00 时有一较强的热带气旋维持在南海区域,结合当时的高空天气形势图可以看出,该低压非常深厚,自地面一直维持到 300 hPa 的高空。正是该深厚的低压源源不断地将南海区域的暖湿气流输送到北京地区,从 500 hPa 位势高度场 (图 2c) 可以看出北京地区处于短波槽前,短波槽给北京地区带来了北方的冷空气。从 850 hPa 和 700 hPa 位势高度和风场 (图 2a、b) 可以看出,山西、河北及北京地区存在很强的气流辐合,冷空气的交汇辐合,导致该地区出现了一场较大的降雨过程。从卫星云图上 (图 2d),我们可以看到有一条东北西南走向的云带正处于北京地区。

对比降水实况 (图 3b) 与 12h 模拟结果 (图 3a),不难看出, WRF 比较成功地模拟了降水的落区以及降水的强度,模式模拟出了三个降水中心,与实况比较接近,模拟的雨带是沿着东北-西南分布的,也与实况有较好的一致性。但模拟的降水区域比实况降水略广,模拟的降水落区比实况降水区域偏北。

图 4 显示的是控制试验模拟结果 700 hPa 相对湿度和温度场 (图 4a) 与 NCEP 再分析资料结果 (图 4b),从图中我们可以看出模拟的相对湿度场与资料中的值比较接近,中心都为 90% 以上,都为东北-西南走向。温度场也很好地与再分析资料结果相对应。可以看出,模式很好地模拟了这次过程的云系结构。从降水对比分析及云系结构分析,我们认为本次过程适合作为碘化银播撒试验的个例。

2.4 催化方案

由于碘化银是冷云催化剂,只有在 0°C 层以上低于 -5°C 的负温区才能核化,作为冻结核与云中过冷水和水汽发生作用,气流能够到达过冷水区域的几个位置包括云下层入流区、云上层入流区、上升速度区域,为了了解催化中不同播撒位置和播撒率对云的发展及降水的影响,我们设计了 4 组播撒实验方案 (见表 1)。

设定每种催化方案选取催化区域是一定的,播

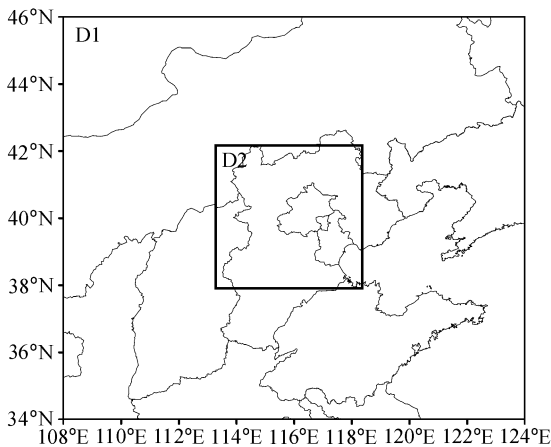


图 1 模式模拟区域。区域中心为 (38.5°N, 116.5°E)

Fig. 1 The model simulation area with the center (38.5°N, 116.5°E)

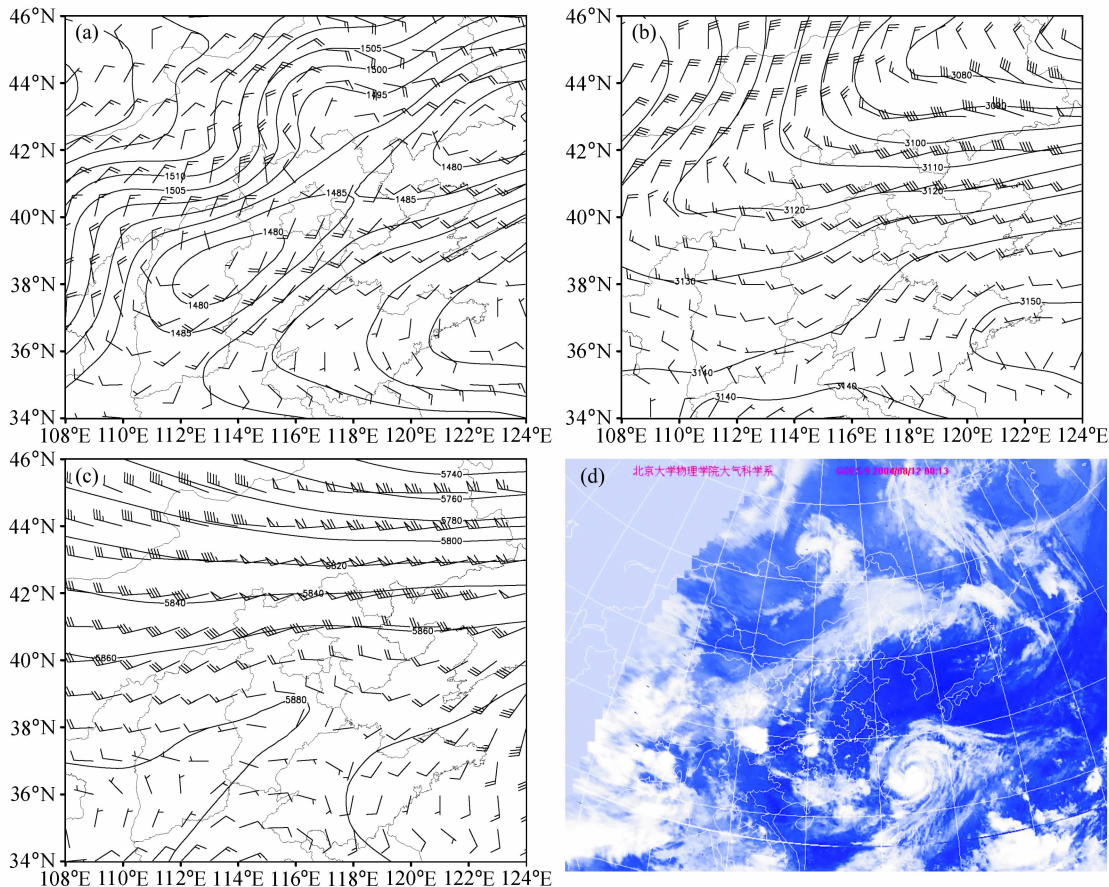


图 2 NCEP 再分析资料 00 时位势高度场及风场: (a) 850 hPa; (b) 700 hPa; (c) 500 hPa; (d) 卫星云图
Fig. 2 The geopotential height (gpm) and the wind vector at (a) 850 hPa, (b) 700 hPa, (c) 500 hPa at 0000 UTC from NCEP reanalysis data, and (d) satellite cloud image at 0013 UTC

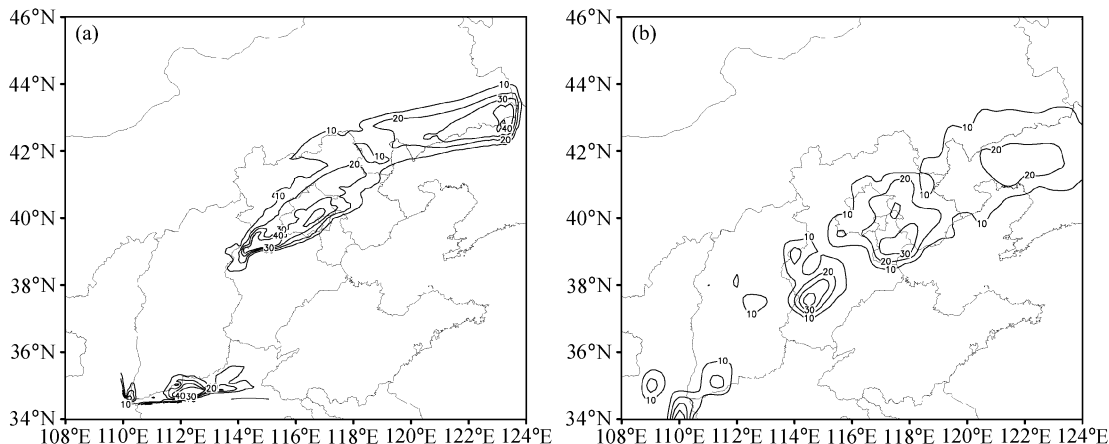


图 3 (a) 模式模拟 12 小时累积地面降水; (b) 20 时观测 12 小时降水量
Fig. 3 The 12 hours accumulated surface precipitation from (a) the model result and (b) the observation

撒率相同对应的播撒剂量也相同。都在模拟进行到 4 小时 30 分时开始播撒, 播撒持续时间都为 10 min。图 5 分别给出了播撒时刻 400 hPa 等压面

液态水含量分布和垂直速度垂直剖面图。从图 5a 可以看出过冷水含量最大为 1.6 g/kg, 在试验 S1 中, 播撒区域为以云中过冷水含量极大值所在格点

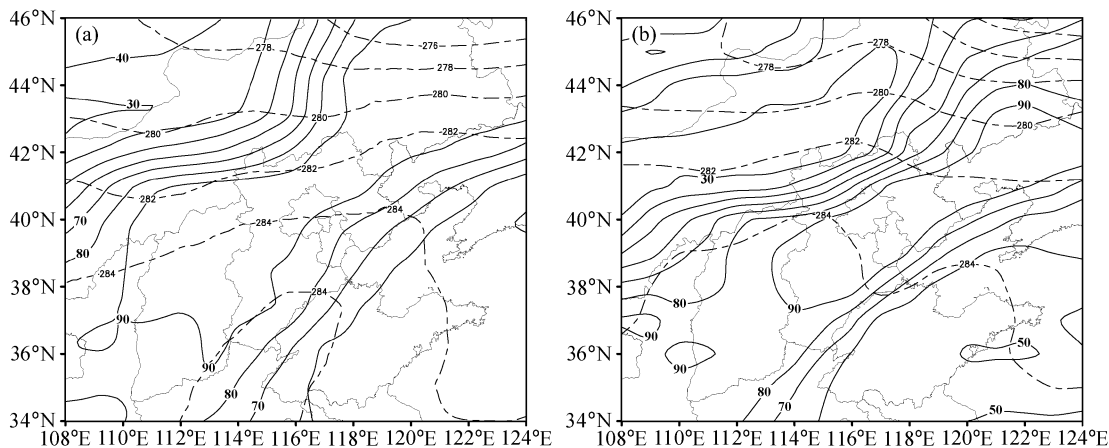


图 4 700 hPa 相对湿度场(%, 实线)和温度场(点划线): (a) 模式模拟; (b) NCEP 再分析资料
Fig. 4 The relative humidity (% , solid line) and temperature (dash-dotted line) at 700 hPa; (a) The model result; (b) the observation

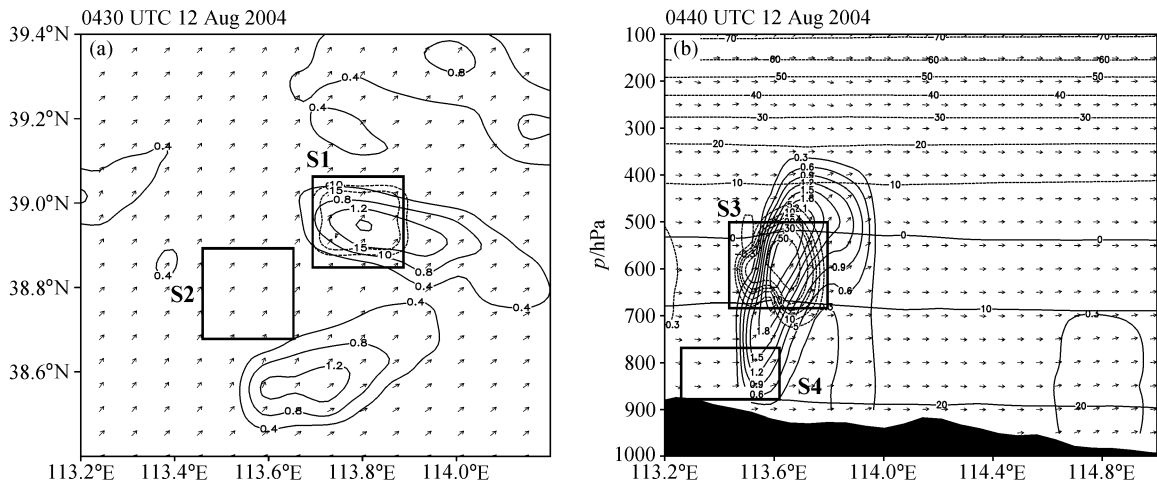


图 5 (a) 400 hPa 等压面上液态水含量的分布(实线, 单位: g/kg)和 S1 试验碘化银数浓度(虚线, 单位: L^{-1}); (b) 沿 38.7°N 的垂直速度(实线, 单位: m/s)和 S3 试验碘化银数浓度(虚线, 单位: L^{-1})的高度-经度剖面(水平等值线表示气温, 实线为正, 虚线为负)。方框区域: 碘化银播撒位置; 箭头: 风向
Fig. 5 (a) The liquid cloud water content (solid contour, units: g/kg) and the number concentration of AgI for case S1 (dotted contour, units: L^{-1}) at 400 hPa; (b) longitude-height cross sections along 38.7°N of vertical velocity (solid contour, units: m/s), the number concentration of AgI for case S3 (dotted contour, units: L^{-1}) and air temperature levels (horizontal contour, units: $^{\circ}C$). Rectangles: seeding locations of the AgI agent; arrows: wind directions

为中心的水平为 8 km×8 km、垂直上下各一个格距的立体区域(最大过冷水区, 图 5a), 如图 6a 碘化银播撒垂直位于-10℃到 0℃层之间。S2 试验播撒位于最大过冷水区相同高度, 水平气流的上游区域(云上层入流区, 图 5a)。从图 5b 可以看到垂直速度极大值位于 5℃层附近, S3 试验播撒于垂直速度极大值所在格点为中心的水平为 8 km×8 km, 垂直上下各一个格距的立体区域(最大上升气流区, 图 5b), 从图 8a 可看出垂直位于 0℃到 10℃层之间。S4 试验播撒于云下层入流区(图 5b), 垂

表 1 播撒试验方案设计
Table 1 Seeding experiments

播撒试验名称	播撒位置	持续时间/min	播撒率/ $g \cdot s^{-1}$
CTL	无	无	无
S1	最大过冷水区	10	0.1, 0.6, 1.2
S2	云上层入流区	10	0.1, 0.6, 1.2
S3	最大上升气流区	10	0.1, 0.6, 1.2
S4	云下层入流区	10	0.1, 0.6, 1.2

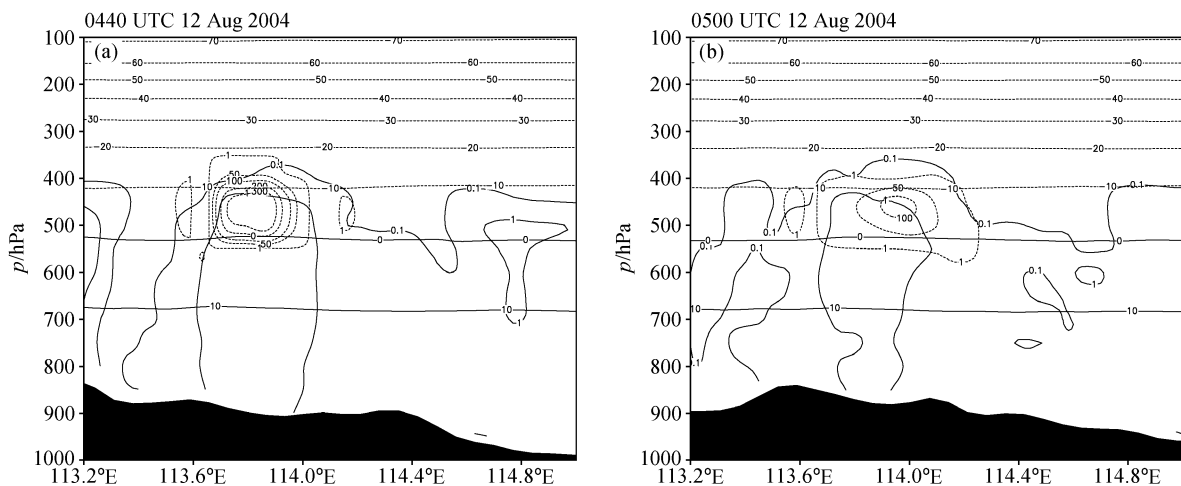


图 6 S1 试验碘化银数浓度 (点线, 单位: L^{-1}) 和云水含量 (实线, 单位: g/kg) 分布高度-经度剖面图: (a) 沿 39°N ; (b) 沿 39.2°N 。水平等值线表示气温, 实线为正, 虚线为负

Fig. 6 Longitude-height cross sections of AgI number concentration (dotted contour, units: L^{-1}) and cloud water content (solid contour, units: g/kg) for case S1 along (a) 39°N and (b) 39.2°N . Horizontal contours: air temperature ($^\circ\text{C}$) levels

直位于 10°C 层以下。

3 结果分析

3.1 碘化银浓度分布

S1 试验播撒于最大过冷水区, 从播撒后碘化银数浓度的剖面图 (图 6a) 可以看出, 播撒开始位于 -10°C 与 0°C 层之间, 由于云体上部水平气流比较强, 催化剂不容易向上输送, 水平范围稍有扩大。同时, 碘化银与云中过冷水发生作用, 最大数浓度从 300 L^{-1} 逐渐减小到 20 分钟后的 100 L^{-1} 。

图 7 显示了 S2 试验碘化银数浓度的垂直分布, 播撒位于云上层入流区, 由于水平气流的作用, 碘化银粒子向下游云体方向移动, 逐渐进入云体并与云中水凝物发生作用, 数浓度不断减少, 对流云随气流向东北方向移动。图 7c 为 39°N 处云水含量及碘化银数浓度垂直剖面图, 此时对流云处于成熟阶段, 云体中上升气流比较强, 碘化银最大浓度区处于云体边缘, 在云体内部碘化银数浓度很小。从 05:30 时刻的碘化银和云水含量垂直分布图 (图 7d) 可以看出, 此时云体已经处于衰亡期, 碘化银随着气流扩散到云体上部, 中心数浓度为 50 L^{-1} 。

从图 8a 可以看出, 过冷水区域主要位于 -10°C 与 0°C 层之间, 而最大上升气流区域位于 0°C 与 10°C 层之间。在最大上升气流区域播撒, 碘化银随着上升气流的作用不断向云体上部扩散。由于云体中心上升气流比较强, 碘化银数浓度呈现出鞍型分

布 (图 8b), 碘化银能够扩散到云体上部的过冷水大值区域。S4 试验播撒位于云下层入流区 (图 9), 从图 9b, 我们发现在云体内部的碘化银可以扩散到云体上部过冷水区域, 云体外部的碘化银向云体内传播很少, 数浓度变化很小。

从不同试验结果可以看出, 在这四个区域播撒碘化银, 最后碘化银都能够到达碘化银起作用的区域。在云上层入流区和云下层入流区播撒的碘化银都会存在大量碘化银在云体边缘扩散, 而且到达云中过冷水区域需要的时间比较长。在最大上升气流区播撒的碘化银能迅速到达过冷水区域, 扩散的区域比较广。

3.2 云中微物理结构的变化

为了了解播撒后云中微物理结构变化, 我们给出了最大过冷水区域播撒试验中水凝物含量与未播撒云中水凝物含量的差值的垂直分布 (图 10), 从图 6a 中, 我们看到碘化银播撒于最大过冷水区位于 -10°C 与 0°C 层之间, 从图 10a、b 可以看出, 播撒后播撒区域云水含量出现大量减小, 最大减少量到达 0.4 g/kg 。图 10e 显示 04:40 冰晶数浓度在 -10°C 层附近出现大量增加, 控制试验中该时刻 -10°C 层附近最大冰晶数浓度约为 10 L^{-1} , 播撒试验中冰晶数浓度最大值达到 400 L^{-1} , 增加达 40 倍。这是由于碘化银在云中充当冰核, 使过冷水转化为冰晶, 从而使冰晶大量增加, 由于上升气流的作用, 冰晶增加的中心比碘化银浓度高值区偏上。

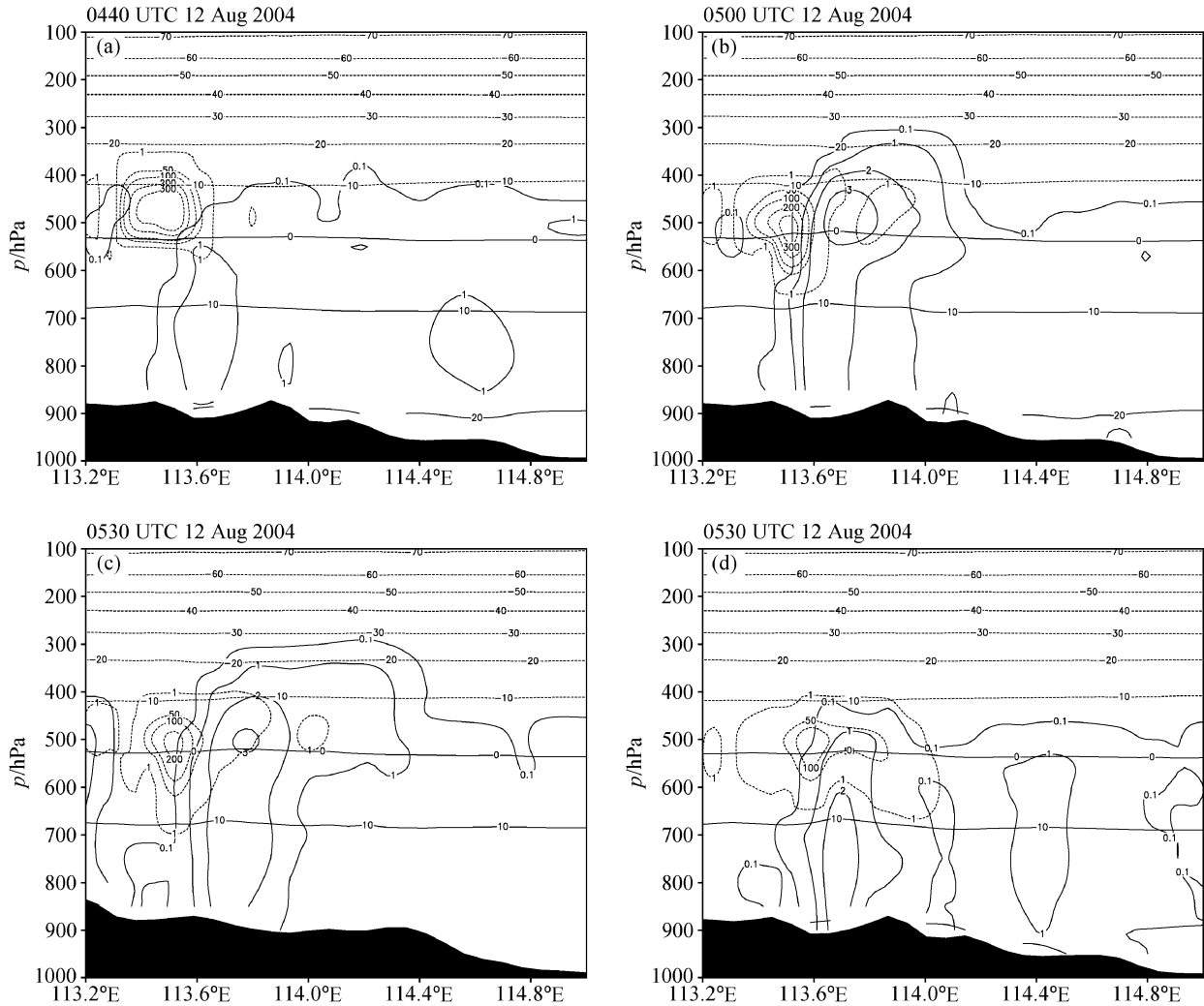


图7 同图6, 但为S2试验(播撒率为0.6 g/s): (a, b, d) 沿 $38.8^{\circ}N$; (c) 沿 $39^{\circ}N$
Fig. 7 Same as Fig. 6, except for case S2 with SR (seeding rate)=0.6 g/s: (a, b, d) Along $38.8^{\circ}N$; (c) along $39^{\circ}N$

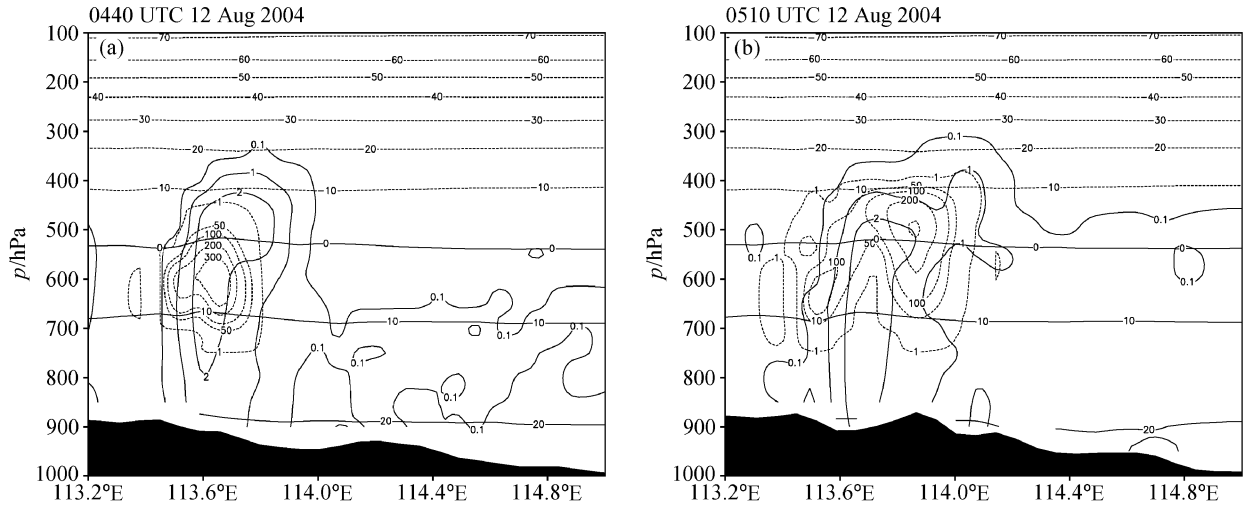


图8 同图6, 但为S3试验(播撒率为0.6 g/s): (a) 沿 $38.6^{\circ}N$; (b) 沿 $38.8^{\circ}N$
Fig. 8 Same as Fig. 6, except for case S3 with SR=0.6 g/s: (a) Along $38.6^{\circ}N$; (b) along $38.8^{\circ}N$

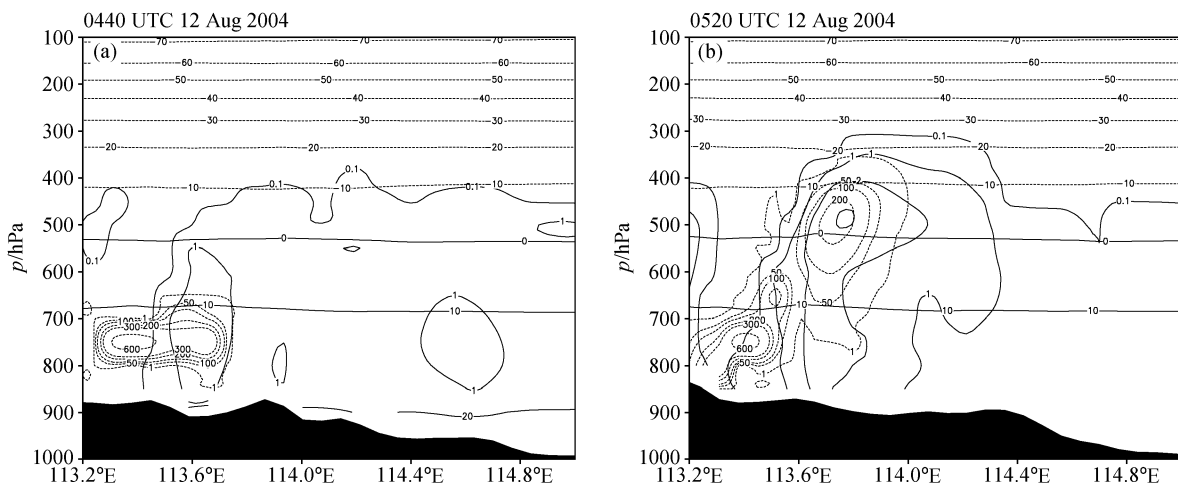


图9 同图6, 但为S4试验(播撒率为0.6 g/s): (a) 沿38.8°N; (b) 沿39°N

Fig. 9 Same as Fig. 6, except for case S2 with SR=0.6 g/s: (a) Along 38.8°N; (b) along 39°N

同时, 播撒后云中雪粒子出现明显增加(图10c), 增加的区域与播撒后冰晶数浓度增加的区域基本一致, 处于碘化银播撒区域及其上层。从霰粒子比含水量的变化高度-经度剖面分布(图10d)中, 我们可以看到播撒后云中霰粒子比含水量出现减少。图10f给出了雨水比含水量的变化, 可以看出雨水含量出现增加。从云中各水凝物在播撒后的变化可以看出, 播撒后, 碘化银与云中过冷水发生作用, 使冰晶数浓度增加, 其后雪粒子的转化增加, 霰粒子的转化减少, 雨水含量出现增加, 从而增加了降水。

3.3 播撒的动力效应

图11是播撒后云中垂直速度的变化, 阴影表示控制试验中垂直速度分布, 从图中我们可以看出播撒过后垂直速度有一定增加, 上升速度增加了0.1 m/s, 同时上游区域上升气流减弱(图11a)。从云中微物理结构的变化中可以看出, 由于碘化银与过冷水作用使过冷水转化为冰晶, 同时凝华于冰晶的水汽量增大, 释放出的潜热使上升气流增加, 促进了对流的发展。由于对流单体的增强, 降水也出现了增强, 同时由于降水的拖曳作用使上游上升速度出现减少。从图11b中可以看出, 由于降水的拖曳作用, 下沉气流增大, 在对流单体附近出现了新的辐合上升, 形成了新的单体。催化使对流单体发展加强, 加大了对流单体的降水, 同时由于地面辐合产生新的单体, 使对流单体位置发生改变, 从而改变了地面降水分布和大小。

3.4 播撒对地面总降水量的影响

图12给出了不同播撒位置和播撒率(简称SR)播撒试验地面累积降水量与控制实验地面累积降水量的差值。如图12a所示, 在最大过冷水区播撒的试验中, 当播撒率为0.1 g/s时, 播撒对降水的增加贡献不明显, 模拟结束地面累积降水量出现减少。增大播撒率后, 增雨的时间延长1小时左右, 播撒率为0.6 g/s时增雨效果比较好, 增雨时间超过4小时, 地面累积降水增加最大, 达到1278 kt, 播撒率增加到1.2 g/s时降水最后出现抑制。在云上层入流区播撒的情况(图12b)与S1试验结果相似, 播撒率为0.6 g/s时增雨效果最好, 播撒率为0.1 g/s和1.2 g/s时增雨效果都不理想。图12c表示S3试验结果, 我们可以看出在最大上升气流区播撒, 不同播撒率试验都有很好的增雨效果, 碘化银影响的时间比较长, 能达到4个小时左右。在云下层入流区播撒的试验中(图12d), 碘化银播撒率达到1.2 g/s时增雨效果才出现, 从上文分析中看出, 碘化银利用效率比较低, 需要在云体内播撒才能起到增雨效果。

当播撒率为0.6 g/s、碘化银播撒量相同时, 从12小时地面增雨量分析, 在最大过冷水区播撒地面增加降水达到1278 kt, 在云上层入流区播撒碘化银试验中, 地面增雨量比S1试验提高了48.7%, 达到1900 kt, 最大上升气流区播撒试验增雨效果最好, 地面增雨量比在最大过冷水区域播撒提高了72.1%, 达到2200 kt。

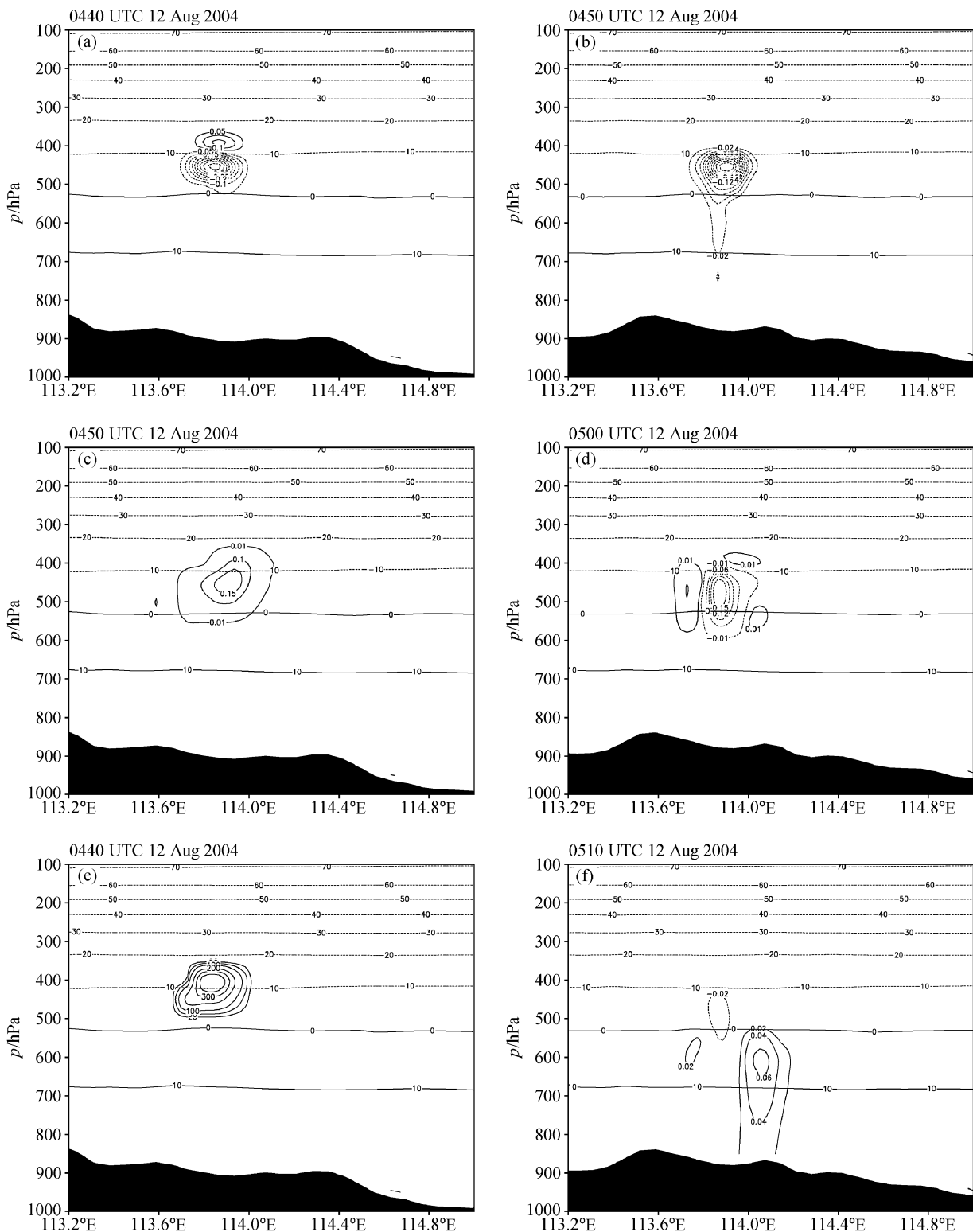


图 10 云中水成物播撒与未播撒差值的垂直分布图 (单位: g/kg): (a) 云水含量 (沿 39°N); (b) 云水含量 (沿 39.2°N); (c) 雪比含水量 (沿 39°N); (d) 霰比含水量 (沿 39.2°N); (e) 冰晶数浓度 (沿 39°N); (f) 雨水比含水量 (沿 39.2°N)

Fig. 10 Longitude-height cross sections of the differences of cloud hydrometeor contents (g/kg) between the seeded and unseeded cloud: (a) Cloud water along 39°N ; (b) cloud water along 39.2°N ; (c) snow content along 39°N ; (d) graupel content along 39.2°N ; (e) cloud ice number concentration along 39°N ; (f) rain water along 39.2°N

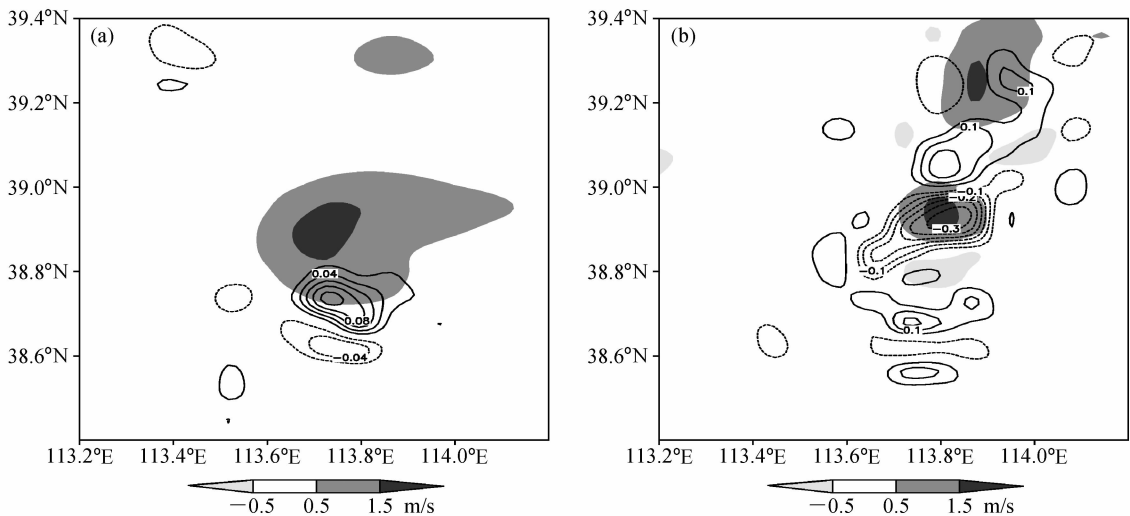


图 11 播撒与未播撒时 500 hPa 垂直速度差值分布图 (等值线, 单位: m/s): (a) 05:10; (b) 06:50。阴影: 控制试验中垂直速度
Fig. 11 Differences of vertical velocity at 500 hPa between the seeded and unseeded cloud (contour, units: m/s) and the vertical velocity in the control experiment (shaded): (a) 0510 UTC; (b) 0650 UTC

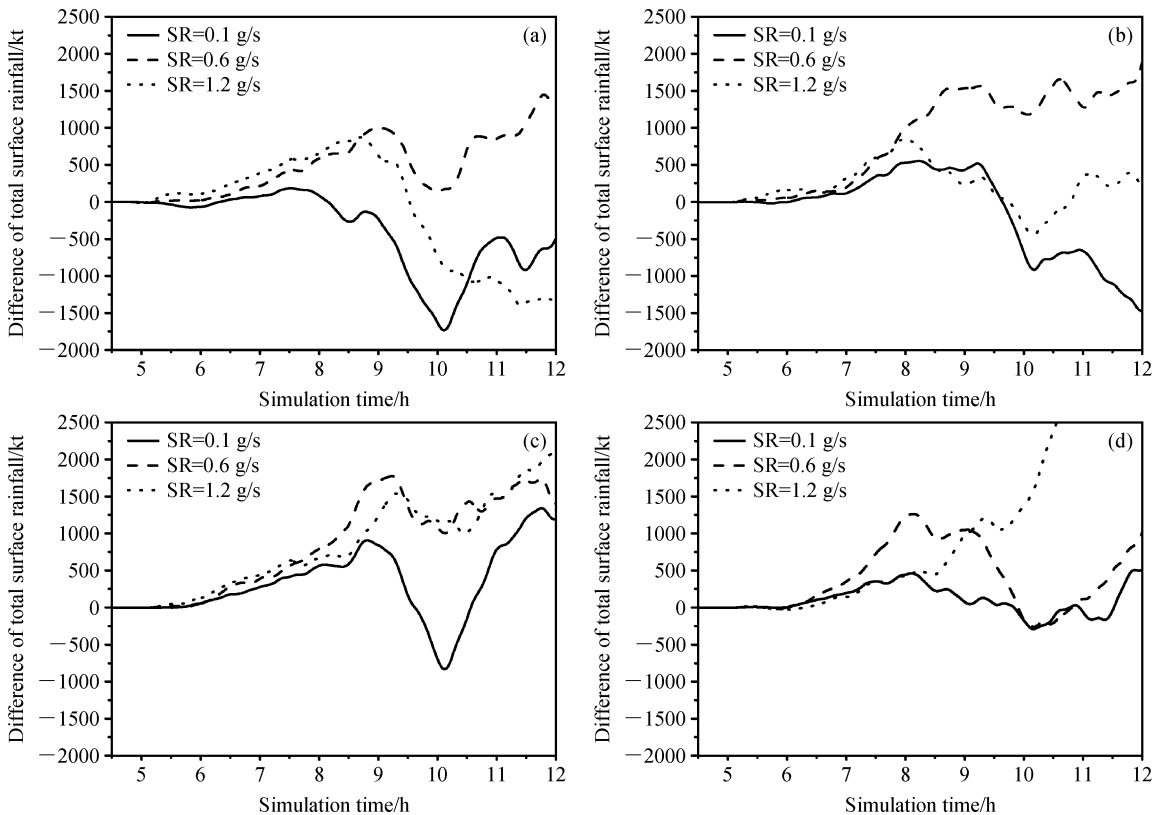


图 12 播撒与未播撒过程地面总降水量的差值 (P_t) 随时间的变化: (a) S1-CTL; (b) S2-CTL; (c) S3-CTL; (d) S4-CTL
Fig. 12 Time variation of the differences of accumulated total surface rainfall between the seeded and unseeded cloud: (a) S1-CTL; (b) S2-CTL; (c) S3-CTL; (d) S4-CTL

降水开始发生变化的时间与播撒位置有很大的关系, 直接在最大过冷水区域播撒降水半小时后开始发生变化 (图 12a), 在云下层入流区播撒降水出

现变化最慢, 降水 90 分钟后才出现变化 (图 12d)。在最大上升气流区播撒试验中 (图 12c), 40 分钟后播撒对降水的影响开始出现影响, 不同播撒率增加

降水的持续时间都比较长,不同播撒率对降水都有很好的增加效果。

4 结 论

本文通过在中尺度模式 WRF 中加入播撒剂碘化银与云的相互作用过程,对比不同播撒位置、播撒率时碘化银的传输、扩散及其与云的相互作用,对地面降水的影响。我们发现碘化银的分布、扩散与播撒的位置有很大关系,在最大上升气流区播撒的碘化银能更快地随气流扩散传输到过冷水区域,播撒在云上层入流区和云下层入流区的碘化银扩散到云中过冷水区需要的时间更长,同时播撒的碘化银只有少部分进入云体,大部分停留在云体边缘。从地面降水的改变也可以看出,过冷水区域播撒对降水影响最快,播撒 30 分钟后降水开始出现改变,云下层入流区播撒影响比较慢,90 分钟后降水才发生变化。

碘化银与云中过冷水相互作用,消耗过冷水使云中冰晶数大量增加,从而使云中雪粒子转化增加,霰粒子转化出现减少。过冷水凝结释放出的潜热,使上升气流增加,促进了对流的发展。由于雨水含量的增加,地面降水也出现增加。

碘化银播撒率对降水量改变影响很大,当播撒率为 0.6 g/s 时播撒对降水的影响时间最长,超过 4 小时,增雨的效果更好。播撒率为 0.1 g/s 时增雨效果不明显,对降水影响的时间很短,当播撒率为 1.2 g/s 时对总降水可能出现抑制作用。对比碘化银播撒率为 0.6 g/s 时 12 小时地面增雨量,在最大过冷水区播撒地面增加降水达到 1278 kt,在云上层入流区播撒碘化银试验中,地面增雨量比 S1 试验提高了 48.7%,最大上升气流区播撒试验增雨效果最好,地面增雨量比在最大过冷水区域播撒提高了 72.1%。播撒于最大上升气流区试验,碘化银能很快到达过冷水区域,同时对地面降水增长的影响时间比较长,不同播撒率对地面降水都有很好的增加效果,最大上升速度区是有效的增雨播撒位置。

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.
- 陈宝君,周德平,宫福久,等. 2005. 2002 年 7 月沈阳一次降水过程的催化数值模拟研究 [J]. *南京气象学院学报*, 4: 53–61.
- Chen Baojun, Zhou Deping, Gong Fujiu, et al. 2005. AgI-seeding modeling study on the 12 July 2002 cold vortex precipitation in Shenyang [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese)*, 4: 53–61.
- 陈宝君,肖辉. 2007. 过冷水雨低含量条件下冰雹形成和增长机制及其催化效果的数值模拟 [J]. *大气科学*, 31 (2): 273–290.
- Chen Baojun, Xiao Hui. 2007. Numerical simulation of hail formation and growth in a storm with low supercooled rain water content and the effect of AgI seeding on hail suppression [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 31 (2): 273–290.
- Čurić M, Janc D, Vučković V. 2006. Seeding agent dispersion within convective cloud as simulated by a 3-D numerical model [J]. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 92: 205–216.
- Čurić M, Janc D, Vučković V. 2007. Cloud seeding impact on precipitation as revealed by cloud-resolving mesoscale model [J]. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 95: 179–193.
- Farley R D, Nguyen P, Orville H D. 1994. Numerical simulation of cloud seeding using a three-dimensional cloud model. *J. Wea. Mod.*, 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.
- Garstang M, Bruintjes R, Serafin R, et al. 2005. Weather modification: Finding common ground [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 86: 647–655.
- 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.
- Guo X L, Fu D H, Zheng G G. 2007. Modeling study on optimal convective cloud seeding in rain augmentation [J]. *J. Korean Meteor. Society*, 43: 273–284.
- 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 Zhijin. 1991. Numerical study on mechanism of artificial modification of cumulonimbus clouds [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese)*, 2 (1): 32–39.
- 何宏让,魏绍远,黄云贵. 1998. 初始云滴浓度 (CCN) 对对流性降水作用的数值试验 [J]. *气象科学*, 18 (1): 10–19.
- He Hongrang, Wei Shaoyuan, Huang Yungui. 1998. The numerical test of initial cloud droplet concentration (CCN) effect on convective precipitation [J]. *Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 18 (1): 10–19.
- 洪延超. 1998. 三维冰雹云催化数值模式 [J]. *气象学报*, 56 (6): 641–651.
- Hong Yanchao. 1998. A 3-D hail cloud numerical seeding model [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 56 (6): 641–651.

- 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 (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 18 (5): 612 - 622.
- Koenig L R, Murray F W. 1983. Theoretical experiments on cumulus dynamics [J]. J. Appl. Sci., 40: 1241 - 1256.
- Levin Z, Krichak S O, Reisin T. 1997. Numerical simulation of dispersal of inert seeding material in israel using a three-dimensional mesoscale model [J]. J. Appl. Meteor., 36: 474 - 484.
- 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, 胡朝霞, 肖辉, 等. 2003. 人工防雹实用催化方法数值研究 [J]. 大气科学, 27 (2): 212 - 222. Li Hongyu, Hu Zhaoxia, Xiao Hui, et al. 2003. Numerical studies of the practical seeding methods in hail suppression [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 27 (2): 212 - 222.
- 李兴宇, 洪延超. 2005. 三维冰雹云数值催化模式改进与个例模拟研究 [J]. 气象学报, 63: 874 - 888. Li Xingyu, Hong Yanchao. 2005. The improvement of 3D hail cloud model and case simulation [J]. Acta Meteorological Sinica (in Chinese), 63: 874 - 888.
- 刘晓莉, 牛生杰, 陈跃. 2006. 层状云催化后过冷水分布与演变规律的数值模拟 [J]. 大气科学, 30 (4): 561 - 569. Liu Xiaoli, Niu Shengjie, Chen Yue. 2006. Numerical simulation of distribution and evolution of supercooled liquid water in seeding stratiform cloud [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (4): 561 - 569.
- 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 2D numerical study of rain-enhancement and hail-suppression principles on convective clouds [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 51 (2): 184 - 194.
- Orville H D. 1996. A review of cloud modeling in weather modification [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 77: 1535 - 1555.
- 孙海燕, 肖辉, 王振会, 等. 2005. 对流性云火箭增雨试验效果的数值模式评估 [J]. 南京气象学院学报, 28 (2): 29 - 36. Sun Haiyan, Xiao Hui, Wang Zhenhui, et al. 2005. Modeling evaluations on effects for convective cloud seeding with AgI-loading rocket to enhance precipitation [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 28 (2): 29 - 36.
- Vali G, Koenig L R, Yoksas T C. 1988. Estimate of precipitation enhancement potential for the Deuro Basin of Spain [J]. J. Appl. Meteor., 27: 829 - 850.
- 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.
- 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.
- Yu Xing, Dai Jin, Jiang Weimei, et al. 2000. A three-dimensional model of transport and diffusion of seeding agents within stratus [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 17 (4): 617 - 635.
- 周毓荃, 陈宝君, 肖辉, 等. 2003. 播撒碘化银实施雹云催化的数值试验-个例研究 [J]. 大气科学, 27 (1): 8 - 22. Zhou Yuquan, Chen Baojun, Xiao Hui, et al. 2003. A case study of hail suppression by AgI seeding using 3D hailstorm model [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 27 (1): 8 - 22.