

赵震, 雷恒池. 2012. 层状云系催化增雨的中尺度模拟研究 [J]. 气候与环境研究, 17 (6): 779–788, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.06.15. Zhao Zhen, Lei Hengchi. 2012. Numerical simulation of precipitation enhancement by stratiform cloud seeding using a mesoscale model [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17 (6): 779–788.

层状云系催化增雨的中尺度模拟研究

赵震 雷恒池

中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

摘要 利用 PSU/NCAR 中尺度模式 MM5 研究层状云碘化银催化后的区域外效应。在 MM5 中双参数显式云物理方案基础上, 采用显式方法加入碘化银粒子的成核机制, 建立碘化银粒子比含水量和数浓度预报方程。通过增加催化过程的程序模块, 建立起一个中尺度人工催化系统。采用三重嵌套到 3.3 km 格距模拟了一次层状云系大范围降水, 此个例 -5°C 到 -10°C 上碘化银催化试验结果表明碘化银在高空风的作用下向下游方输送并影响云内的微物理过程, 碘化银持续作用时间为 3 h。大多数碘化银主要起凝华核作用, 催化后冰晶增加主要靠凝华过程。催化后 3 h 内在下游方区域 80 km 到 240 km 有 10%~30% 的增雨, 出现催化区域外效应。

关键词 层状云 中尺度模式 MM5 碘化银催化 区域外效应

文章编号 1006-9585 (2012) 06-0779-10

中图分类号 P481

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.06.15

Numerical Simulation of Precipitation Enhancement by Stratiform Cloud Seeding Using a Mesoscale Model

ZHAO Zhen and LEI Hengchi

Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract The Fifth-Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5) was used to investigate the extra-area effects of silver iodide (AgI) seeding on stratiform clouds at the supercooled layer. A bulk two-moment microphysical scheme and the new software package for AgI were incorporated into MM5. Extra conservation equations were applied to trace the seeding agent, which was transported along the flow field and interacted with the supercooled cloud fields. In this study, the model was run for widespread precipitation caused by a stratiform cloud system using three nested grids, with a 3.3 km \times 3.3 km horizontal resolution in the finest grid. The model results showed that seeding with AgI at the -5°C to -10°C levels had microphysical effects on the simulated clouds and that the simulation produced a seeding effect that lasted 3 h longer because of transport of the seeding agent by upper-level winds. Most of the AgI particles acted as deposition nuclei, and the deposition nucleation process contributed most to additional cloud ice formation. The results showed that more precipitation results from seeded than unseeded clouds, and the precipitation was redistributed downwind of the target. Augmented precipitation (varying from 10% to 30% downwind) was confined in space to within 240 km of the seeding target and in time to the 3-h period after initial seeding.

Keywords Stratiform cloud, Mesoscale model MM5, Silver iodide seeding, Extra-area effects

收稿日期 2012-08-05 收到, 2012-09-25 收到修定稿

资助项目 国家自然科学基金项目 41175120、40805056, 中国科学院知识创新工程重要方向项目 KZCX2-EW-203

作者简介 赵震, 男, 1977 年出生, 博士, 副研究员, 主要从事云和降水物理、中尺度数值模式研究。E-mail: zhaozhen@mail.iap.ac.cn

1 引言

现代人工影响天气始于发现干冰可将过冷水云转变成冰晶云 (Schaefer, 1946) 以及碘化银 (AgI) 可用来将过冷水滴转变成冰晶 (Vonnegut, 1947)。冷云人工催化使用合适的冰核 (如 AgI) 或制冷剂 (如干冰、液态二氧化碳) 来启动和提高冰晶形成过程, 特别是过冷水向冰晶的转化。通过增加冰晶数量来提高雪和霰的生成量, 加强降水形成过程来达到增加降水的目的。

随着数值模式的发展, 20世纪80年代以来开展了许多冷云催化模拟工作。Hsie et al. (1980) 在Orville and Kopp (1977) 的二维积云模式中增加了一个播撒物质 AgI 粒子的比含水量预报方程, 以便模拟播云作用。Kopp et al. (1983) 在 Orville and Kopp (1977) 的二维云模式中增加了一个播撒物质干冰粒子的比含水量预报方程, 模拟结果证实了播云温度窗, 催化效果紧密依赖于在适当的时间和适当的部位播撒恰当剂量的催化物质。Orville et al. (1984) 用二维时变模式比较了 AgI 和干冰对层状云播撒的动力效应, 发现 AgI 催化后的潜热释放引起较强的动力效应, 激发形成嵌入层状云中的对流泡, 这种现象甚至在过冷水数量很少时也发生, 从而影响地面降水。干冰因为较大的下落速度使其催化作用时间短, 从而催化的动力效应很弱。Kopp (1988) 模拟分析了 AgI 播云和干冰播云的不同特点, 发现 AgI 播云效应的持续时间比干冰长。Meyers et al. (1995) 在 RAMS (Regional Atmospheric Modeling System) 中根据观测结果加入了人工冰核催化过程来模拟地形云的播撒作用, 发现催化通过提高降水效率增雨 0.1~0.7 mm, 和观测接近。Fukuta (1996) 试验了液态 CO₂ 的催化效果, 发现液态 CO₂ 的成核率与温度无关, 是一种高效的播云催化剂。Orville (1996) 回顾了各种云模式在人工影响天气中的应用, 强调了模式有助于对播云效果的理解。Bruintjes (1999) 回顾和总结了开展的成冰剂催化试验和吸湿剂催化试验, 认为人工影响天气需要有建立在包括全部降水形成过程物理假说上的更科学的基础。

国内也开展了人工催化的数值模拟工作。胡志晋等 (1983) 为了研究层状冷云自然降水和人工降水机制建立了一个一维非定常数值模式, 采用人工

增加冰核浓度的方法作了不同条件下的播云试验。认为云中过冷水含量多是人工催化的有利条件, 但过冷水含量少的云也具有一定的增雨潜力。人工冰核除通过贝吉龙过程使过冷水转化为降水外, 还使一部分冰面过饱和水汽转化为降水, 这扩展了人工增雨的水分来源 (胡志晋, 2001)。刘玉宝等 (1988) 通过在已形成的层状云顶处加上冰晶瞬时点源模拟了层状云的飞机播撒, 结果表明播撒能加强降水形成, 播撒后主要增水区约 10 km 宽且有最大剂量限制。除了在模式中直接人工加入一定浓度的冰核外, 还在模式中显式地给出了 AgI 粒子的成核作用。黄燕和徐华英 (1994) 在二维完全弹性冰雹云数值模式中引入冰晶浓度和播撒物质 AgI 粒子的比含水量预报方程, 进行人工防雹的数值试验。洪延超 (1998) 建立了双参数方案的冰雹云模式, 并进行了冰雹 AgI 催化的数值模拟。Guo et al. (2006) 利用三维云模式模拟比较了 AgI 和液态 CO₂ 的播撒效果, 发现在 -15 °C 到 -20 °C 范围内两者具有相同的动力效应, 而在 0 °C 到 -5 °C 的最大过冷水含量区液态 CO₂ 播撒能产生更强的动力效应。

为了模拟大范围降水云系催化过程和效果, 近年来开展了一些利用中尺度模式进行人工影响试验的工作。Ćurić et al. (2007) 在 ARPS 模式中加入了 AgI 催化模块, 研究如何播撒才能取得防雹增雨的最佳效果。陈小敏等 (2007) 在 GRAPES 模式中采用耦合的双参数显式云物理方案对祁连山地区的山区云降水进行的催化试验表明播撒冰晶可以增加降雨, 但增雨的程度和范围随催化试验设计不同而各不相同, 而且播撒冰晶后云的动力结构发生了改变。同时开展了华南冷锋云系人工加入冰晶的催化试验 (史月琴等, 2008) 和人工加入冰晶减缓梅雨锋暴雨的中尺度数值模拟 (孙晶等, 2010)。

大多数报告的播云催化效果来自单体云 (或风暴) 的试验, 这不能说明催化对于区域范围降水的影响。“作业区域外” 影响的问题具有不确定性, 即播云催化效果能否影响到超出作业区时空范围外的天气, 播云所能影响的区域仍是一个未解决的问题。在一些人工影响天气的试验中发现了催化区域外效应的存在 (Brier et al., 1967; Elliott et al., 1971; Brier et al., 1974; Meitín et al., 1984), 外场观测发现 AgI 催化持续时间能达到 90 min 且催化影响下风方 100 km 外区域 (Deshler and Reynolds, 1990)。Bigg and Turton (1986, 1988) 根据澳大利亚 1964~

1970 年播云试验研究了 AgI 催化的持续效应，发现 AgI 催化 13~22 h 后云内产生了大量的次生冰晶，催化效应至少可以持续一个星期且每 10 d 重复发生一次。Bigg (1995) 对澳大利亚 1987~1992 年播云试验分析发现了和前述一致的 AgI 催化持续效应，同时声称播云催化是否具有持续影响还应仔细评估。在事后分析的几个增雨计划中，曾提到在原先设计的目标区之外及播云剂起作用的时间之外，也有出现物理效应的证据。泰国 (Silverman and Sukarnjanaset, 2000; Woodley et al., 2003) 和美国得克萨斯州 (Rosenfeld and Woodley, 1989, 1993) 暖底对流云的播云中，曾报告在播云后 3~12 h 有雨量增加现象，远远超出播云预期的直接影响时间，增雨也出现于目标区之外。Long (2001) 对催化区域外效应进行了总结，发现该效应在下风方 80~300 km 范围内增雨 15%~100%。

有关在一个地区播云催化作业是否会增加抑或减少另一个地区降水量的问题，现有的观测手段还不足以提供回答该问题的观测事实和物理证据，而中尺度催化数值模式是一种检测播云区域效应的有效手段和工具。层状云系是一种主要的大范围降水云系，尤其是层状冷云，是为缓解北方冬春季干旱开展人工增雨的主要作业对象。为此，利用中尺度模式研究层状云系超出播撒云以外的较大尺度效应和播云下风方的降水再分布。

2 催化模式和试验设计

2.1 中尺度催化模式

AgI 粒子的可能成冰机制有：凝华核化、接触冻结核化、吸收核化、浸润冻结核化。利用在 MM5 中建立的双参数显式云物理方案 (赵震等, 2005) 加入 AgI 的催化过程 (Hsie et al., 1980; 黄燕和徐华英, 1994)，该双参数显式云物理方案粒子谱采用 Γ 分布，能够预报云水、冰晶、雪、霰和雨水的比含水量和数浓度。模式中考虑 3 种 AgI 粒子的成核机制：(1) 由于布朗运动和惯性碰撞而发生在人工冰核和云滴之间的接触冻结核化；(2) 由于布朗运动和惯性碰撞而发生在人工冰核和雨滴之间的接触冻结核化；(3) 水汽在人工冰核上的凝华核化。分别以 S_{bc} 、 S_{ic} 、 S_{br} 、 S_{ir} 和 S_{dv} 表示 AgI 的汇项，前一个下标表示成核方式 (下标 b、i、d 分别表示布朗运动、惯性碰撞和凝华核化)，后一个下标表

示与人工冰核作用的水物质 (下标 c、r、v 分别表示云水、雨水和水汽)。同时作如下假设：AgI 粒子是单分散谱，半径为 0.1 μm ，平均质量 $m_x=2.38 \times 10^{-17} \text{ kg}$ ，忽略下落末速；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 粒子的光解去活化；所有的 AgI 粒子在 $T < -20^\circ\text{C}$ 时全部活化，人工冰核的核化率公式为

$$N_a(\Delta T) = \begin{cases} 0, \Delta T < T_1 \\ 10^3 \exp(-0.022\Delta T^2 + 0.88\Delta T - 3.8), T_1 \leq \Delta T < T_2 \\ 1.6 \times 10^5, \Delta T \geq T_2 \end{cases} \quad (1)$$

其中， $N_a(\Delta T)$ 的单位是 m^{-3} ， $\Delta T=T_0-T$ ， $T_0=273.15 \text{ K}$ ， $T_1=5^\circ\text{C}$ ， $T_2=20^\circ\text{C}$ 。

AgI 的汇项计算公式如下：

(1) 云滴与 AgI 的接触冻结核化 (S_{bc} 、 S_{ic})。

$$S_{bc} = \frac{\Delta X_s}{\Delta t} = -2\pi D_s X_s N_c D_c, \quad (2)$$

$$S_{ic} = \frac{\Delta X_s}{\Delta t} = -\frac{\pi}{4} D_c^2 X_s U_c E_{cs} N_c, \quad (3)$$

其中， X_s 是 AgI 比含量， N_c 是云滴数浓度， E_{cs} 是云滴与 AgI 粒子的碰并效率 (1×10^{-4})， D_c 和 U_c 分别是云滴直径和下落末速度。

(2) 雨滴与 AgI 的接触冻结核化 (S_{br} 、 S_{ir})。

雨滴的谱分布为 Γ 分布：

$n_r = N_{0r} D_r^{\alpha_r} \exp(-\lambda_r D_r)$ ， N_{0r} 为谱截距， α_r 为谱形参数， λ_r 为谱斜率， D_r 为雨滴直径。

$$S_{br} = \frac{\Delta X_s}{\Delta t} = -4\pi D_s X_s \int_0^\infty \frac{1}{2} D_r n_r dD_r = -2\pi D_s X_s \frac{N_{0r} \Gamma(2+\alpha_r)}{\lambda_r^{2+\alpha_r}}. \quad (4)$$

雨滴的下落末速 $U_r=a_0+a_1 D_r+a_2 D_r^2+a_3 D_r^3$ ，其中 $a_0=-0.267$ ， $a_1=5.15 \times 10^3$ ， $a_2=-1.0255 \times 10^6$ ， $a_3=7.55 \times 10^7$ 。

$$S_{ir} = \frac{\Delta X_s}{\Delta t} = -X_s E_{rs} \int_0^\infty \frac{\pi}{4} D_r^2 U_r(D_r) n_r dD_r = -\frac{\pi}{4} X_s E_{rs} N_{0r} \cdot \left[\frac{a_0 \Gamma(3+\alpha_r)}{\lambda_r^{3+\alpha_r}} + \frac{a_1 \Gamma(4+\alpha_r)}{\lambda_r^{4+\alpha_r}} + \frac{a_2 \Gamma(5+\alpha_r)}{\lambda_r^{5+\alpha_r}} + \frac{a_3 \Gamma(6+\alpha_r)}{\lambda_r^{6+\alpha_r}} \right], \quad (5)$$

其中， E_{rs} 是雨滴与 AgI 粒子的碰并效率 (0.5×10^{-4})。AgI 粒子的扩散系数 $D_s=kTB$ ， $B=(1+a'd/R_s)/(6\pi\eta R_s)$ ， $a'=0.9$ ， $d \approx R_s=0.1 \mu\text{m}$ ，玻尔兹曼常数 $k=1.38 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$ ， η 为动力粘滞系数。

(3) 水汽在 AgI 上的凝华核化 (S_{dv})。

当 $q_v \geq q_{vs}$ (水面饱和) 时,

$$S_{dv} = m_x \frac{dN_{ad}(\Delta T)}{dt} = w \frac{\partial [X_s N_a(\Delta T)]}{N_a(T_2) \partial Z} > 0, \\ T_1 \leq \Delta T < T_2, \quad (6)$$

$$S_{dv} = m_x \frac{N_{ad}(\Delta T)}{\Delta t} = X_s \frac{N_a(\Delta T)}{N_a(T_2) \Delta t}, \quad \Delta T \geq T_2, \quad (7)$$

其中, $N_{ad}(\Delta T)$ 是 ΔT 温度下人工冰核的凝华活化数, $N_{ad}(\Delta T) = X_s N_a(\Delta T) / [N_a(T_2) m_x]$ 。

由于 AgI 粒子的成核作用, 使水成物和冰晶、雪浓度发生变化, 相应过程如下:

(1) 云滴冻结成冰晶。

云滴收集的活化冰核数为:

$$N_{ac}(\Delta T) = -(S_{bc} + S_{ic}) \frac{N_a(\Delta T)}{N_a(T_2)} \Delta t m_x^{-1}. \quad (8)$$

云滴冻结成冰率 (P_{isc}) 和冰晶数浓度改变率 (N_{isc}) 为:

$$P_{isc} = q_c \frac{N_{ac}(\Delta T)}{N_c \Delta t} \rho, \quad N_{isc} = \frac{P_{isc} \rho}{m_c}, \quad (9)$$

其中, Δt 是时间步长, 云滴平均质量 $m_c = \rho q_c / N_c$, q_c 是云滴比含水量, ρ 是空气密度。

(2) 雨滴冻结成雪。

雨滴收集的活化冰核数为:

$$N_{ar}(\Delta T) = -(S_{br} + S_{ir}) \frac{N_a(\Delta T)}{N_a(T_2)} \Delta t m_x^{-1}. \quad (10)$$

雨滴冻结成雪率 (P_{ssr}) 和雪数浓度改变率 (N_{ssr}) 为:

$$P_{ssr} = q_r \frac{N_{ar}(\Delta T)}{N_r \Delta t} \rho, \quad N_{ssr} = \frac{P_{ssr} \rho}{m_{s0}}, \quad (11)$$

其中, m_{s0} 为雪的最小质量, q_r 为雨滴比含水量, N_r 为雨滴数浓度。

(3) 水汽凝华成冰晶。

AgI 作为凝华核数为:

$$N_{ad}(\Delta T) = X_s \frac{N_a(\Delta T)}{N_a(T_2) m_x}. \quad (12)$$

催化加速贝吉龙过程, 水汽凝华成冰率 (P_{isv}) 和冰晶数浓度改变率 (N_{isv}) 为:

$$P_{isv} = N_{ad}(\Delta T) a_1 m_x^{a_2}, \quad N_{isv} = \frac{P_{isv} \rho}{m_{i0}}, \quad (13)$$

其中, a_1, a_2 为贝吉龙过程常数, m_{i0} 为冰晶最小质量。

MM5 双参数显式云物理方案中加入的 AgI 比含量和数浓度预报方程如下:

$$\frac{\partial p^* X_s}{\partial t} = -A_{dv}(p^* X_s) + D_{IV}(p^* X_s) + D(X_s) +$$

$$p^* X_{s0} + p^*(S_{bc} + S_{ic} + S_{br} + S_{ir} - S_{dv}), \quad (14)$$

$$\frac{\partial p^* N_x}{\partial t} = -A_{DV}(p^* N_x) + D_{IV}(p^* N_x) + D(N_x) +$$

$$p^* N_{x0} + p^* \left\{ \frac{N_x}{X_s} (S_{bc} + S_{ic} + S_{br} + S_{ir} - S_{dv}) \right\}. \quad (15)$$

A_{DV} 和 D_{IV} 代表三维平流项和辐散项, D 为湍流扩散项, X_{s0} 和 N_{x0} 分别为 AgI 比含量和数浓度源项, $p^* = p_s - p_t$, p_s 为地面气压, p_t 为模式顶气压。

催化造成的潜热释放为 $d\theta/dt = L_s P_{isv} + L_f (P_{isc} + P_{ssr})$, 式中 L_f 为冰的融化潜热, L_s 为冰的升华潜热。考虑 AgI 的催化效应后, MM5 双参数方案中水凝物粒子的预报方程发生相应变化, 这里不逐项列出。

2.2 模拟试验设计和结果

选择 2002 年 9 月 12 日到 13 日发生在西北地区的一次层状云降水个例进行数值模拟和催化试验。本次降水过程是由于副热带高压有一次明显的西伸东退过程, 造成北侧的冷空气随西北气流中的短波槽东移进入河套地区上空, 并与南侧西南暖湿气流交汇, 在我国北部大部分地区形成稳定的降水天气。

模拟使用 PSU/NCAR 的 MM5(V3-7) 模式, 采用非静力、三重嵌套方案, 以延安站 (36.6°N, 109.5°E) 为中心, 模式模拟区域见图 1。垂直分为 32 层, σ 垂直坐标分别为: 1.00、0.99、0.98、0.96、

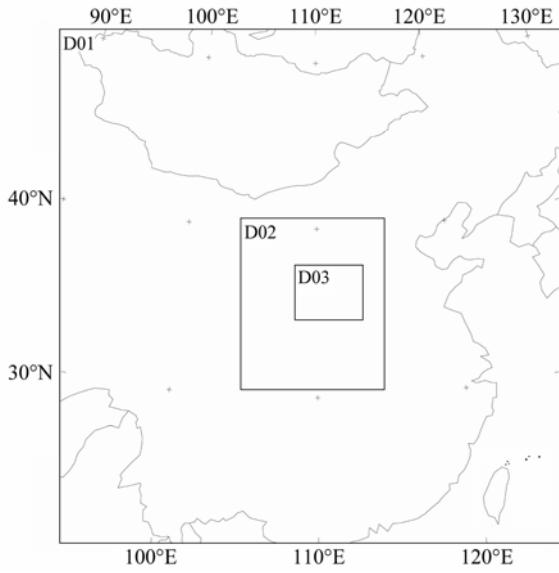


图 1 模式模拟区域

Fig. 1 Model domains for simulation

表 1 模式模拟设计

Table 1 Model simulation setup

模拟起止时间	垂直		网格距 (km)	地形资料	云物理方案	边界层物理方案	大气辐射 方案
	层数	格点数					
区域 1 2002 年 9 月 12 日 12:00 至 13 日 12:00	32	109×112	30	2 min 的 NCAR 全球资料	Mixed-Phase 显式方案 + Grell 对流参数化方案	Blackadar 高分辨率 PBL 方案	Dudhia 云辐射方案
区域 2 2002 年 9 月 12 日 12:00 至 13 日 12:00	32	94×112	10	2 min 的 NCAR 全球资料	Mixed-Phase 显式方案 + Grell 对流参数化方案	Blackadar 高分辨率 PBL 方案	Dudhia 云辐射方案
区域 3 2002 年 9 月 12 日 12:00 至 13 日 12:00	32	133×109	3.3	30 s 的 NCAR 全球资料	双参数显式方案	Blackadar 高分辨率 PBL 方案	Dudhia 云辐射方案

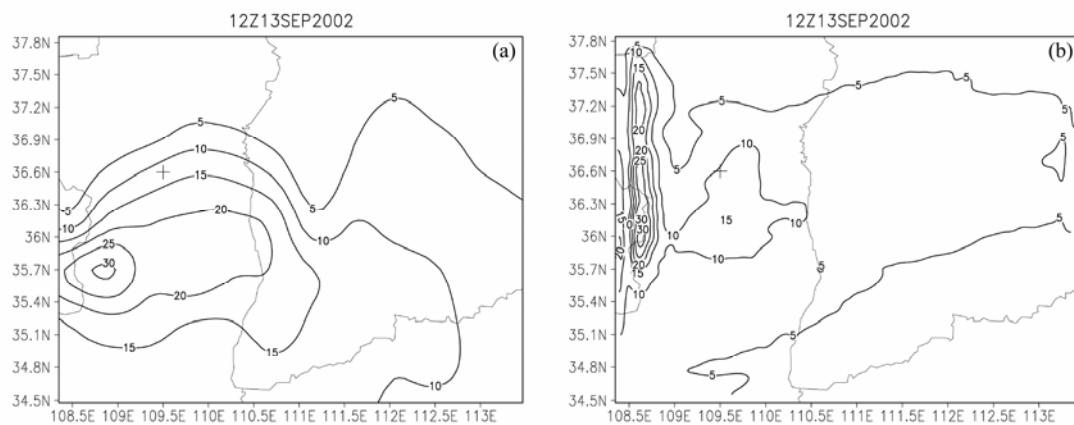


图 2 2002 年 9 月 13 日 00:00 到 12:00 模拟区域 3 的地面降水量 (单位: mm) (+表示延安): (a) 实况; (b) 模拟

Fig. 2 (a) Observed and (b) simulated surface precipitation (mm) on domain 3 from 0000 UTC to 1200 UTC 13 Sep 2002. “+” stands for Yan'an station

0.94、0.92、0.90、0.88、0.85、0.82、0.79、0.76、0.73、0.70、0.68、0.64、0.60、0.58、0.56、0.52、0.50、0.48、0.44、0.40、0.36、0.32、0.30、0.25、0.20、0.15、0.10、0.06、0.00。模式模拟设计见表 1 (以下时间为协调世界时), 使用 NCEP 的 1° (纬度) $\times 1^{\circ}$ (经度) 分析资料作为初始场, 每 15 min 输出一次结果。

分析模拟区域 D03 的实况降水可知, 降水主要集中在本次模拟过程的后 12 h, 图 2 给出了模拟区域 3 的 12 h 降水实况和模拟结果。实况降水主要分布在陕西省, 雨量主要为小到中雨, 局部大雨。MM5 模拟的降水范围接近实况, 最大降水量和实况一致, 但降水强中心的位置和实况有偏差。模拟结果和实况相比虽有一定偏差, 但模式总体上模拟出了本次降水的范围和强度。

2.3 催化方案

人工催化选择在模拟区域 D03 中以延安为中心的水平 8×8 个格点播撒 AgI (图 3), 催化温度在 -5°C 到 -10°C 之间。催化选在模拟 12 h 后即 13

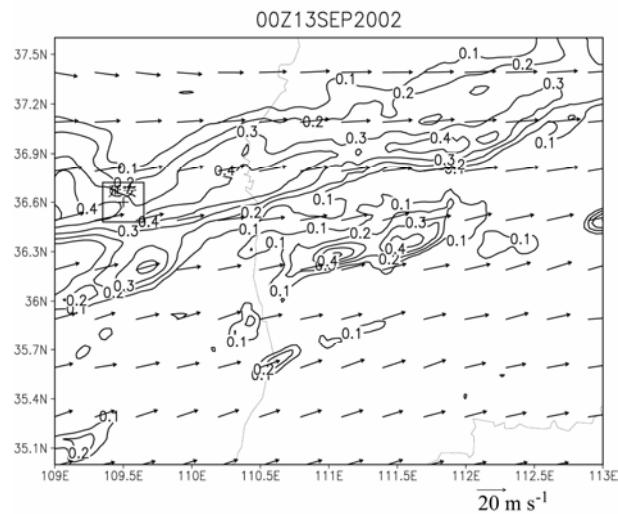


图 3 2002 年 9 月 13 日 00:00 500 hPa 等压面上云水比含水量 (单位: g kg⁻¹) 与风场分布, 方框为 AgI 播撒区域

Fig. 3 The cloud water mixing ratio (g kg^{-1}) and vectors of horizontal winds at 500 hPa at 0000 UTC 13 Sep 2002, the rectangle is AgI seeding region

日 00:00 开始持续播撒 AgI 30 min, 播撒速率是 0.2 g s^{-1} 。播撒开始时 500 hPa (在播撒区域平均温度为 -7.4°C) 等压面上的过冷水分布 (图 3) 显

示, 该播撒区域内存在一定数量过冷水, 平均过冷水含量为 0.3 g kg^{-1} 。播撒区域内冰晶数浓度较小, 低于 10 L^{-1} 。

3 结果分析

3.1 AgI 的空间分布和输送

AgI 粒子播撒入云后, 在平流、湍流扩散作用下随流场运动, 通过布朗运动和惯性碰并与云中水成物(云滴、雨滴)发生接触冻结起冻结核作用, 并在 -5°C 以下, AgI 粒子被活化。温度降低, 活化加强。活化的 AgI 粒子起凝华核作用, 云中水汽在其上形成冰晶。

图 4 和图 5 分别显示了不同时刻的 AgI 比含量和数浓度的 500 hPa 水平和沿 36.6°N 的垂直分布。AgI 比含量和数浓度分布对应的很好, 说

明模拟结果可靠。播撒到 30 min 时, AgI 比含量在播撒中心的最大值达到 $1.2 \times 10^{-7} \text{ g kg}^{-1}$, AgI 数浓度在播撒中心的最大值为 3000 L^{-1} 。由于空中气流的作用, AgI 粒子逐渐向下风方向输送, 核化同时与云中水凝物发生作用, 比含量和数浓度不断减少。

从图 6 可知, 伴随着 AgI 的下风方输送, 播撒区域外的 36.8°N AgI 比含量由低变高, AgI 比含量的高值区逐渐向下游推进, AgI 的持续影响时间为播撒结束后 3 h 左右, 影响距离能达到下风方 240 km。

AgI 粒子成核作用分析表明, 在过冷水区, 大多数的 AgI 粒子起凝华核作用(占 AgI 总汇项比例平均为 94.2%), 接触核化主要是云滴与 AgI 粒子之间的布朗运动碰并收集(占 AgI 总汇项比例小于 5.78%), 云、雨滴的惯性碰并收集均很小(占 AgI

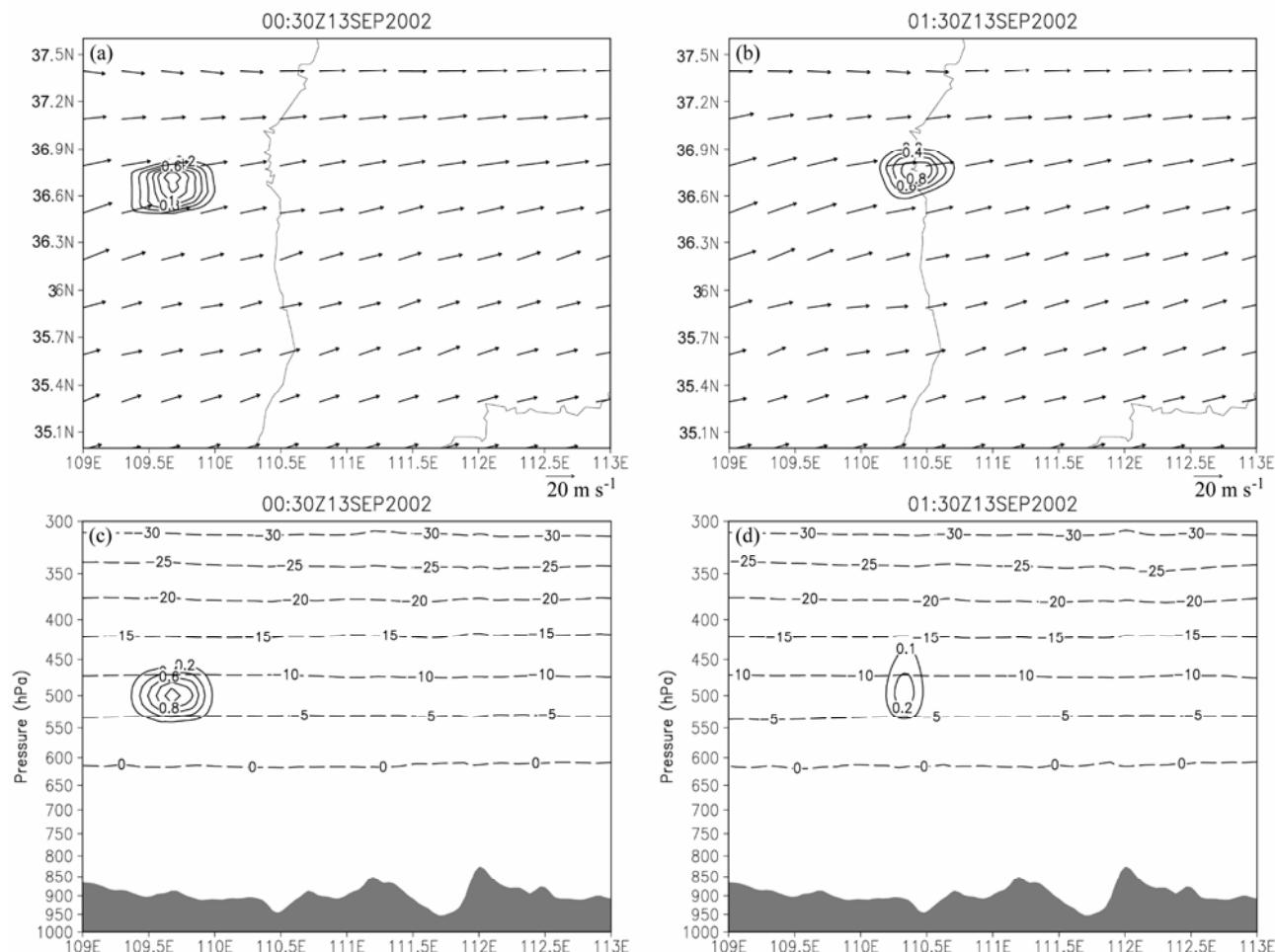


图 4 模拟的 2002 年 9 月 13 日 (a, b) AgI 比含量(单位: $10^{-7} \text{ g kg}^{-1}$)和水平风场在 500 hPa 上的分布和 (c, d) AgI 比含量(实线, 单位: $10^{-7} \text{ g kg}^{-1}$)和温度(虚线, 单位: $^{\circ}\text{C}$)沿 36.6°N 的垂直剖面分布: (a, c) 00:30; (b, d) 01:30

Fig. 4 (a, b) Horizontal cross sections of AgI mixing ratio ($10^{-7} \text{ g kg}^{-1}$) and vectors of horizontal winds at 500 hPa, and (c, d) vertical cross sections of AgI mixing ratio (solid lines, units: $10^{-7} \text{ g kg}^{-1}$) and temperature (dashed lines, units: $^{\circ}\text{C}$) along 36.6°N : (a, c) 0030 UTC 13 Sep 2002; (b, d) 0130 UTC 13 Sep 2002

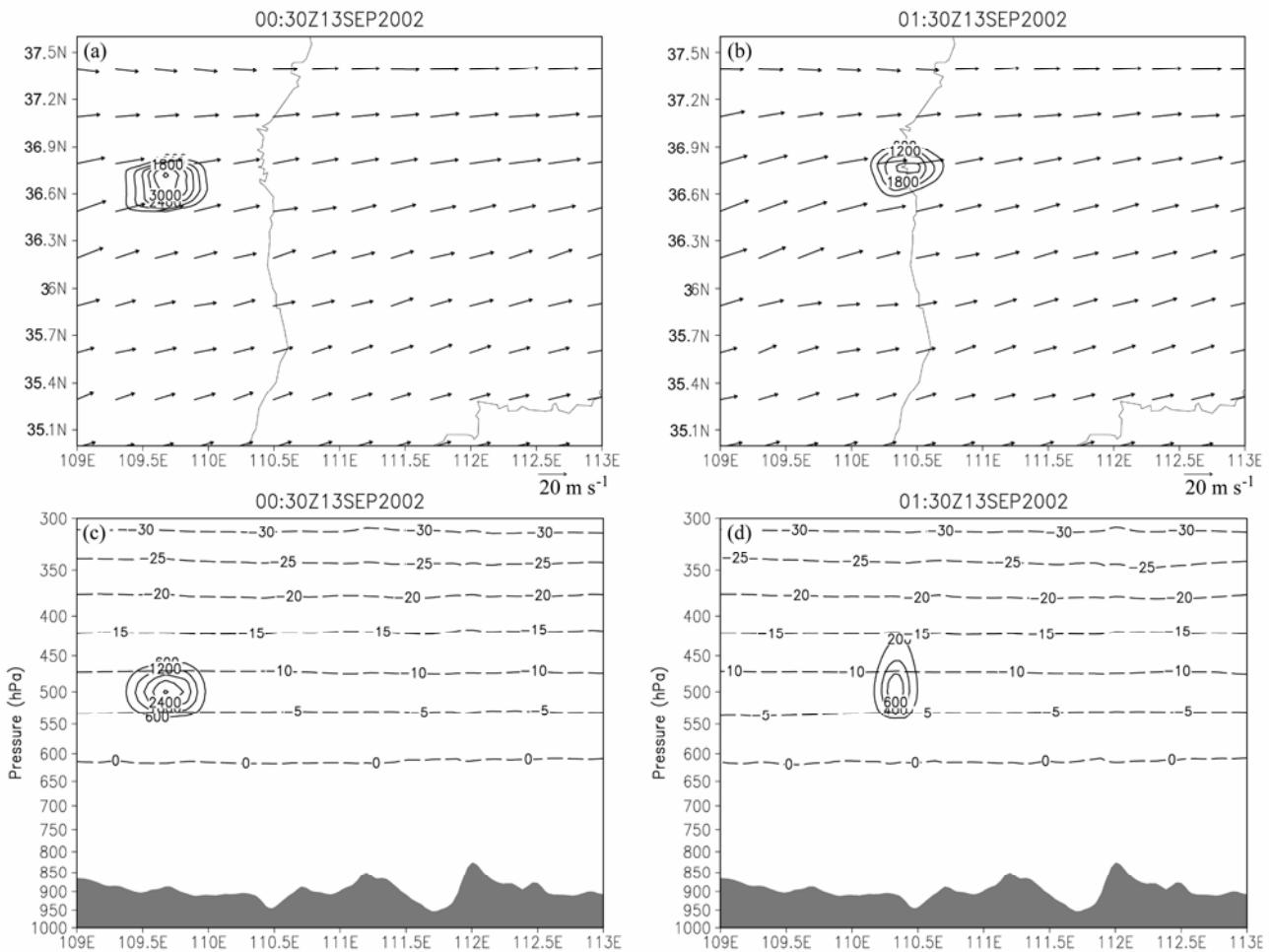


图5 模拟的2002年9月13日(a、b)AgI数浓度(单位: L^{-1})和水平风场在500 hPa上的分布和(c、d)AgI数浓度(实线,单位: L^{-1})和温度(虚线,单位: $^{\circ}C$)沿36.6°N的垂直剖面分布:(a、c)00:30;(b、d)01:30

Fig. 4 (a, b) Horizontal cross sections of AgI number concentration (L^{-1}) and vectors of horizontal winds at 500 hPa, and (c, d) vertical cross sections of AgI number concentration (solid lines, units: L^{-1}) and temperature (dashed lines, units: $^{\circ}C$) along 36.6°N: (a, c) 0030 UTC 13 Sep 2002; (b, d) 0130 UTC 13 Sep 2002

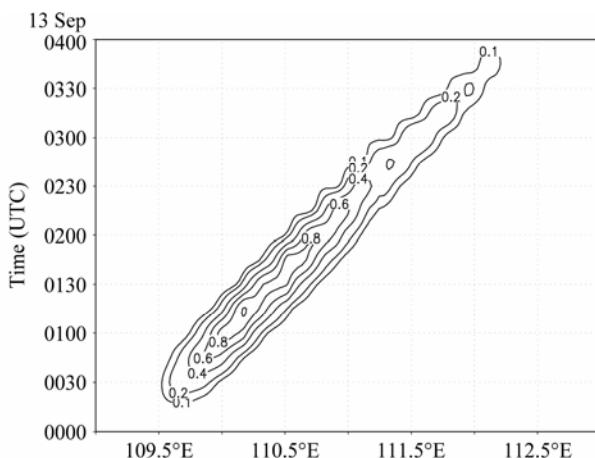


图6 模拟的500 hPa等压面上的AgI比含量(单位: $10^{-7} g kg^{-1}$)随时间的演变

Fig. 6 The time series of simulated 500-hPa AgI mixing ratio ($10^{-7} g kg^{-1}$) along 36.8°N

总汇项比例小于0.01%),而雨滴的布朗运动收集机制几乎不消耗AgI粒子。同时由于上升气流的作用, AgI粒子从播撒区域逐渐向上扩展。

3.2 云中微物理结构的变化

催化后,云中的微物理结构发生了明显改变,图7给出了云中不同水凝物粒子含量的催化和未催化差值的垂直分布。可以看出,在播撒结束后的90 min,云中过冷水含量减少了 $0.3 g kg^{-1}$,形成明显的过冷水消耗区,过冷水的减少区域从播撒层向上扩展。分析表明,播撒结束后60 min云中过冷水减少最迅速,到播撒结束后180 min过冷水消耗趋于停止。在过冷水减少区域出现大量冰晶,冰晶数浓度增加最大值为 $300 L^{-1}$,而该区域未催化时的冰晶数浓度小于 $10 L^{-1}$ 。冰晶数浓度增加的最大区域在 $-10^{\circ}C$ 到 $-15^{\circ}C$,沿催化层向上扩展与过冷水减少

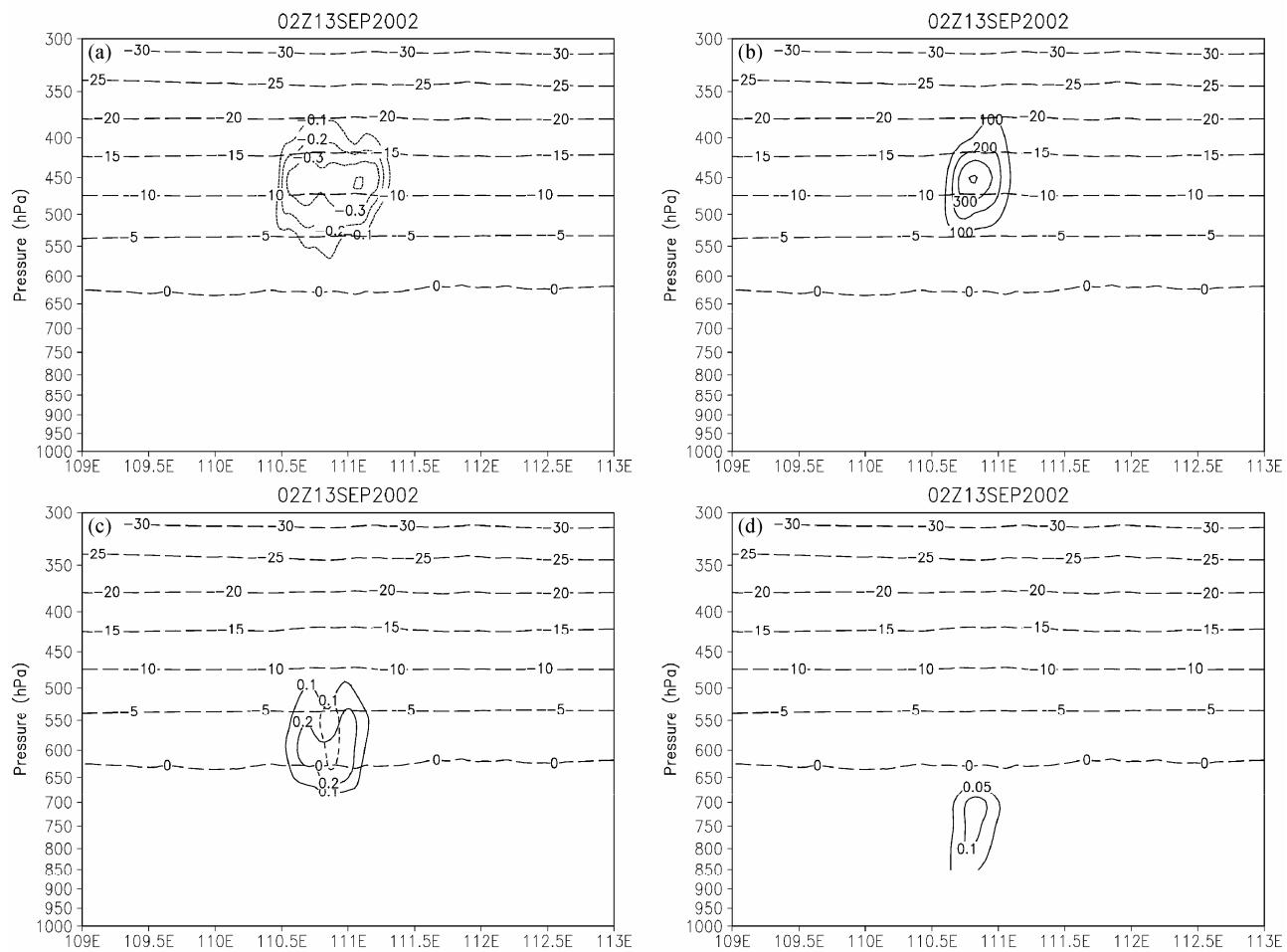


图7 模拟的2002年9月13日02:00沿36.8°N的温度(长虚线, 单位: °C) 及物理量催化和未催化差值的垂直分布: (a) 云水比含水量(单位: g kg⁻¹); (b) 冰晶数浓度(单位: L⁻¹); (c) 雪(实线)和霰(短虚线)的比含水量(单位: g kg⁻¹); (d) 雨水比含水量(单位: g kg⁻¹)

Fig. 7 Vertical cross sections of the differences of (a) cloud water mixing ratio (g kg^{-1}), (b) ice number concentration (L^{-1}), (c) snow (solid line) and graupel (short dashed line) mixing ratio (g kg^{-1}), and (d) rain water mixing ratio (g kg^{-1}) with and without seeding and temperature (long dashed lines, units: $^{\circ}\text{C}$) along 36.8°N at 0200 UTC 13 Sep 2002

区域一致。由于AgI在云中充当冰核, 通过凝华和冻结过程消耗过冷水形成冰晶, 使冰晶大量增加。其中凝华过程是催化后冰晶增加的最主要过程, 其数量比冻结过程大2个量级。由于上升气流的作用, 冰晶增加的中心扩展到AgI比含量高值区上方。催化后, 雪的比含水量增加最大值为 0.2 g kg^{-1} , 位于 -5°C 层以下。雪通过冰晶的自动转换形成, 催化通过加速冰晶形成来促进雪的形成。霰的比含水量增加最大值为 0.1 g kg^{-1} , 同样位于 -5°C 层以下, 但是霰增加的范围比雪小。增加的冰晶和雪促进了霰碰并冰晶和霰碰并雪过程, 从而使霰增长。雨水的比含水量最大增加了 0.1 g kg^{-1} , 雨水增加区域与雪和霰的增加区域对应, 表明催化增加的雪和霰的融化过程促进了雨水形成, 最终会导致地面降水增

加。

3.3 催化前后地面降水分布

图8中催化前后的地面降水变化显示催化后3 h地面降水发生了明显的再分布, 在播撒区下风方80 km到240 km出现降水增加, 地面降水增加了0.2 mm到0.8 mm, 催化增雨效果为10%~30%。地面增雨区和图6中AgI向下游输送范围对应, 同时与图7中云内微物理量的改变区域一致, 说明催化后AgI向下游输送, AgI在云内改变云和降水形成的微观物理过程, 促进云和降水发展, 提高降水效率。

通过以上分析可知, AgI催化后出现的区域外效应是由于AgI在空中气流的作用下从播撒区域向下游方向输送, 通过影响云内微物理过程从而造成

地面降水再分布。

4 结论

通过在中尺度模式 MM5 中显式加入催化剂 AgI 的核化过程, 建立了 AgI 比含量和数浓度预报方程, 考虑了 AgI 成核后与云的相互作用过程, 从而建立了一个中尺度催化模式。对我国北方一次层状云系大范围降水过程的 AgI 播撒数值试验结果表明, AgI 在气流的作用下向下风方区域输送, 同时其自身核化作用使其含量逐渐减小, AgI 催化持续时间为 3 h 左右。AgI 主要作为凝华核在云中促进冰晶增加, 接触核化作用一般只占 AgI 总汇项比例 6% 以下。AgI 在云中通过消耗过冷水使云中冰晶大量增加, 从而使云中冰晶转化为雪的量增加, 在云中有霰存在的条件下霰通过碰并冰晶和雪促进霰的增长。催化增加的雪和霰的融化作用使雨水含量增加, 最终导致地面降水增加。催化后 3 h 内播撒区下风方 80 km 到 240 km 处出现地面降水增加现象, 催化增雨效果为 10%~30%, 出现了地面降水再分布的图像。

本个例模拟结果再现了催化区域外效应, 这种现象出现的原因是 AgI 通过空中气流向下游输送影响云内微观物理过程继而改变地面降水分布。今后还需进行不同天气系统下系统不同发展阶段、不同部位、不同催化方案的催化试验, 进一步加深对催化区域外效应的认识, 更好地为人工影响天气提供科学指导。

参考文献 (References)

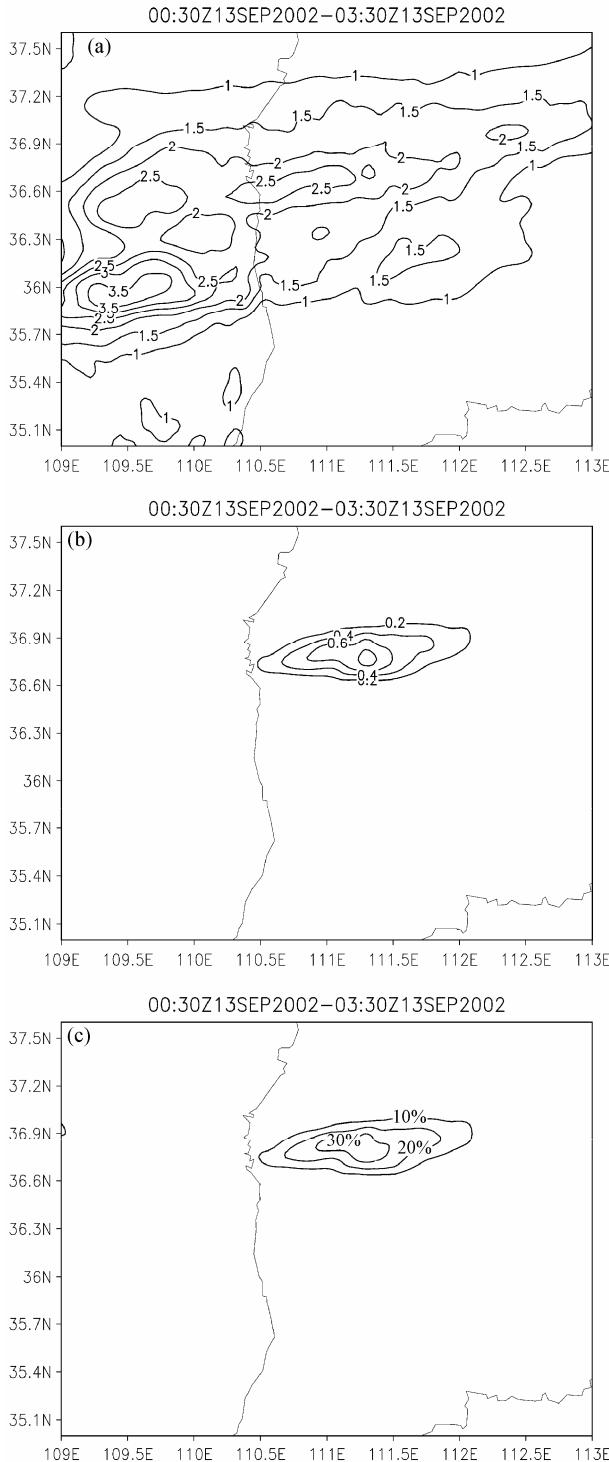


图 8 2002 年 9 月 13 日 00:30 到 03:30 (a) 模拟的未催化时地面降水分布 (单位: mm)、(b) 模拟的催化后增加的地面降水分布 (单位: mm)、(c) 模拟的催化增雨率

Fig. 8 (a) Distribution of simulated precipitation (mm) at the surface for unseeded, (b) the augmented precipitation at the surface for seeding (mm), and (c) precipitation enhancement percentage from 0030 UTC to 0330 UTC 13 Sep 2002

- Bigg E K. 1995. Tests for persistent effects of cloud seeding in a recent Australian experiment [J]. *J. Appl. Meteor.*, 34 (11): 2406–2411.
- Bigg E K, Turton E. 1986. Delayed effects of cloud seeding with silver iodide [J]. *J. Climate Appl. Meteor.*, 25 (10): 1382–1386.
- Bigg E K, Turton E. 1988. Persistent effects of cloud seeding with silver iodide [J]. *J. Appl. Meteor.*, 27 (5): 505–514.
- Brier G W, Carpenter T H, Kline D B. 1967. Some problems in evaluating cloud seeding effects over extensive areas [C]// Proceedings of the Fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability. Berkeley, California: University of California Press.
- Brier G W, Grant L O, Mielke P W. 1974. The evidence for extra-area effects from purposeful weather modification projects [C]// Proceedings of the Fourth Conference on Weather Modification. Fort Lauderdale, Florida: American Meteorological Society.

- Bruintjes R T. 1999. A review of cloud seeding experiments to enhance precipitation and some new prospects [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 80 (5): 805–820.
- 陈小敏, 刘奇俊, 章建成. 2007. 鄂连山云系云微物理结构和人工增雨催化个例模拟研究 [J]. 气象, 33 (7): 33–43. Chen Xiaomin, Liu Qijun, Zhang Jiancheng. 2007. A numerical simulation study on microphysical structure and cloud seeding in cloud system of Qilian Mountain region[J]. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 33 (7): 33–43.
- Ćurić M, Janc D, Vučković V. 2007. Cloud seeding impact on precipitation as revealed by cloud-resolving mesoscale model [J]. *Meteor. Atmos. Phys.*, 95 (3–4): 179–193.
- Deshler T, Reynolds D W. 1990. The persistence of seeding effects in a winter orographic cloud seeded with silver iodide burned in Acetone [J]. *J. Appl. Meteor.*, 29 (6): 477–488.
- Elliott R D, St. Amand P, Thompson J R. 1971. Santa Barbara pyrotechnic cloud seeding test results 1967–70 [J]. *J. Appl. Meteor.*, 10 (4): 785–795.
- Fukuta N. 1996. Project mountain valley sunshine—Progress in science and technology [J]. *J. Appl. Meteor.*, 35 (9): 1483–1493.
- 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]. *Atmospheric Research*, 79 (3–4): 183–226.
- 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 3D hail cloud numerical seeding model [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 56 (6): 641–653.
- Hsie E Y, Farley R D, Orville H D. 1980. Numerical simulation of ice-phase convective cloud seeding [J]. *J. Appl. Meteor.*, 19 (8): 950–977.
- 胡志晋. 2001. 层状云人工增雨机制、条件和方法的探讨 [J]. 应用气象学报, 12 (增刊): 10–13. Hu Zhijn. 2001. Discussion on mechanisms, conditions and methods of precipitation enhancement in stratiform clouds[J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 12 (Suppl.): 10–13.
- 胡志晋, 秦瑜, 王玉彬. 1983. 层状冷云数值模式 [J]. 气象学报, 41 (2): 194–203. Hu Zhjin, Qin Yu, Wang Yubin. 1983. An numerical model of the cold stratified clouds [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 41 (2): 194–203.
- 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]. *Scientia Atmospherica Sinica* (in Chinese), 18 (5): 612–622.
- Kopp F J. 1988. A simulation of Alberta cumulus [J]. *J. Appl. Meteor.*, 27 (5): 626–641.
- Kopp F J, Orville H D, Farley R D, et al. 1983. Numerical simulation of dry ice cloud seeding experiments [J]. *J. Climate Appl. Meteor.*, 22 (9): 1542–1556.
- 刘玉宝, 胡志晋, 游来光. 1988. 新疆准噶尔盆地冬季系统性降水研究——II. 理论探讨 [J]. 气象科学研究院院刊, 3 (2): 159–168. Liu Yubao, Hu Zhjin, You Laiguang. 1988. A study of the frontal snowfall in Zhungeer basin of Xinjiang in winter. Part II: Theoretical discussion [J]. *Journal of Academy of Meteorological Science* (in Chinese), 3 (2): 159–168.
- Long A B. 2001. Review of downwind extra area effects of precipitation enhancement [J]. *Journal of Weather Modification*, 33 (1): 24–45.
- Meitin J G, Woodley W L, Flueck J A. 1984. Exploration of extended-area treatment effects in FACE-2 using satellite imagery [J]. *J. Climate Appl. Meteor.*, 23 (1): 63–83.
- Meyers M P, Demott P J, Cotton W R. 1995. A comparison of seeded and nonseeded orographic cloud simulations with an explicit cloud model [J]. *J. Appl. Meteor.*, 34 (4): 834–846.
- Orville H D. 1996. A review of cloud modeling in weather modification[J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77 (7): 1535–1555.
- Orville H D, Kopp F J. 1977. Numerical simulation of the life history of a hailstorm [J]. *J. Atmos. Sci.*, 34 (10): 1596–1618.
- Orville H D, Farley R D, Hirsch J H. 1984. Some surprising results from simulated seeding of stratiform-type clouds [J]. *J. Climate Appl. Meteor.*, 23 (12): 1585–1600.
- Rosenfeld D, Woodley W L. 1989. Effects of cloud seeding in west Texas [J]. *J. Appl. Meteor.*, 28 (10): 1050–1080.
- Rosenfeld D, Woodley W L. 1993. Effects of cloud seeding in west Texas: Additional results and new insights [J]. *J. Appl. Meteor.*, 32 (12): 1848–1866.
- Schaefer V J. 1946. The production of ice crystals in a cloud of supercooled water droplets [J]. *Science*, 104 (2707): 457–459.
- 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. 2008. Seeding numerical experiments of cold front clouds in South China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 32 (6): 1256–1275.
- Silverman B A, Sukarnjanaset W. 2000. Results of the Thailand warm-cloud hygroscopic particle seeding experiment [J]. *J. Appl. Meteor.*, 39 (7): 1160–1175.
- 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.
- Vonnegut B. 1947. The nucleation of ice formation by silver iodide [J]. *J. Appl. Phys.*, 18 (7): 593–595.
- Woodley W L, Rosenfeld D, Silverman B A. 2003. Results of on-top glaciogenic cloud seeding in Thailand. Part II: Exploratory analyses [J]. *J. Appl. Meteor.*, 42 (7): 939–951.
- 赵震, 雷恒池, 吴玉霞. 2005. MM5 中新显式云物理方案的建立和数值模拟 [J]. 大气科学, 29 (4): 609–619. Zhao Zhen, Lei Hengchi, Wu Yuxia. 2005. A new explicit microphysical scheme in MM5 and numerical simulation [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 29 (4): 609–619.