

高茜,王广河,史月琴. 华北层状云系人工增雨个例数值研究[J]. 气象, 2011, 37(10): 1241-1251.

# 华北层状云系人工增雨个例数值研究<sup>\* 1</sup>

高 茜<sup>1,2</sup> 王广河<sup>1</sup> 史月琴<sup>1</sup>

1 中国气象科学研究院, 北京 100081

2 北京市人工影响天气办公室, 北京 100089

**提 要:** 利用耦合了 CAMS 详尽云方案和非静力中尺度数值模式 MM5V3 的 CAMS 中尺度云分辨模式对 2008 年 3 月 20—21 日环北京地区的一次层状云系降水进行模拟和人工催化数值试验。模拟自然降水分布与实测结果一致, 分析微物理特征并在所得分析的基础上进行催化试验。研究在不同催化剂量、高度进行试验对降水的影响。结果表明: 在过冷水含量高且冰晶含量低的区域引入人工冰晶可使地面降水增加。引入人工冰晶后催化区域水汽明显减少, 云水也有减少, 冰晶粒子和雪粒子增加, 而且水汽减少的量明显大于过冷云水的减少量。同时催化后 550 hPa 附近的下沉气流中心变为上升气流, 动力、热力效应明显。雪碰并冰晶增长、冰晶转化成雪增长是催化高度附近雪晶增加的主要过程, 而催化高度以下, 雪碰并过冷云滴增长是雪晶增加的主要过程; 雪晶碰并过冷雨滴增长是霰粒子增加的主要过程; 雨滴碰并云滴增长是雨滴增长的主要过程。

**关键词:** 层状云系降水, 增雨潜力, CAMS 中尺度云分辨模式, 催化试验

## Numerical Simulation and Seeding Test on the Stratiform Precipitation Around Beijing

GAO Qian<sup>1,2</sup> WANG Guanghe<sup>1</sup> SHI Yueqin<sup>1</sup>

1 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

2 Beijing Weather Modification Office, Beijing 100089

**Abstract:** A stratiform precipitation during 20—21 March 2008 is simulated using the mesoscale model MM5V3 coupled with CAMS explicit cloud microphysics scheme. Simulation of rainfall is very similar to observation. Adding artificial ice particles at different area and time can lead to different results. When seeding is made in areas with high content of supercooled water and low content of ice particles, surface precipitation will be increased. After seeding, supercooled water decreases while ice, snowfall and graupel increases. Above the seeding level, the collection of ice by snow, the conversion of ice to snow are the main source of snow; below the seeding level, the collection of supercooled cloud water to snow is the main source of snow. The collection of snow to supercooled raindrops is the main source of graupel. The main source of raindrops is the collection of raindrops to cloud water.

**Key words:** stratiform precipitation, seeding tests, CAMS explicit cloud microphysics scheme, seeding experiment

## 引 言

我国全境年平均降水量 630 mm 左右, 人均水资源占有量不到世界平均水平的四分之一, 是世界上 13 个贫水国家之一。华北、西北大部分地区降水量偏少, 而且分布很不均匀。同时, 人类活动、温室

效应等因素引起全球气候变暖, 可能使中纬度地区降水减少、干旱频率增加, 旱情加剧。为了更加合理地开发、利用和改善我国的水资源, 我们需要大力开展人工影响天气工作。层状云系是我国北方一种主要的大范围降水系统, 也是冬半年的主要降水源, 是为缓解北方春季干旱而开展的人工增雨的主要作业对象。对层云人工催化进行数值模拟可以帮助我们

\* 国家科技支撑计划(2006BAC12B01)资助

2010 年 7 月 30 日收稿; 2011 年 7 月 6 日收修定稿

第一作者: 高茜, 研究方向为云和降水物理学与人工影响天气, Email: gaoqianbjwm@163.com

了解云中各种粒子的分布以及粒子之间的转化过程,分析动力和热力机制,更合理地选择播撒时机、播撒区和播撒剂量,为外场试验提供参考依据。

Farley 等<sup>[1]</sup>利用三维云模式对引晶催化进行数值模拟, Meyers 等<sup>[2]</sup>用显式云模式对催化和未催化地形云进行数值模拟,模拟结果显示增雨效果明显,该区域人工冰核播撒后成核效应得到优化;胡志晋等<sup>[3-5]</sup>、Hu 等<sup>[6]</sup>、Wand 等<sup>[7]</sup>、You 等<sup>[8]</sup>、王成恕等<sup>[9]</sup>等用中尺度数值模式同云分辨方案相结合的方式对层状云系人工引晶的中尺度影响做了数值模拟,得出结论:催化有明显的动力效应和区域时空整体的增雨量。楼小凤<sup>[10]</sup>将比较完善的云物理过程耦合到中尺度模式 MM5 中,利用准隐式格式,建立一套比较完善全面的混合相双参数微物理雪晶方案,史月琴<sup>[11]</sup>利用该模式对华南一次冷锋云降水过程进行数值模拟,在模拟天气过程与实测一致的基础上通过人工引入冰晶进行催化试验,结果表明在云体发展早期引入冰晶催化效果较好,催化后有下风方效应。孙晶等<sup>[12-13]</sup>利用该模式对祁连山冬季降雪个例进行人工催化试验。胡志晋<sup>[14]</sup>提出催化引入人工冰晶可将过饱和和水汽转化为降水,在发展阶段有深厚上升气流的云体进行播撒,且播撒区域应选择过饱和和水汽值高、冰晶数浓度低的位置。近年来对层状云系增雨潜力特别是环北京地区的模拟还较少,本文在对自然云系降水机制进行模拟的基础上,设计不同催化剂量和高度的催化试验,并对催化后降水的演变、云中各降水粒子的垂直分布、动力热力特征以及源汇项的转化过程进行分析,可以为实际播撒提供作业依据,帮助更好的理解云中的微物理过程。

## 1 模式试验方案和资料

选用耦合了 CAMS 详尽云方案和非静力中尺度数值模式 MM5V3 的 CAMS 中尺度云分辨模式,该方案预报量包括各种水成物的比质量和比数浓度及云滴谱拓宽度,共有 11 个预报量,考虑了 31 个云物理过程,能更合理地模拟各种云降水过程,并具有进行人工引晶催化数值试验的能力。中心点设在(41°N, 114°E),采用双向反馈的三重嵌套模式,三重网格水平格距分别为 45、15 和 5 km;格点数分别为 55×55、91×91、112×124,垂直方向为 23 层,顶层气压为 100 hPa。采用 CAMS 云物理方案, Grell 积云参数化方案, Blackdar 高分辨率 PBL 方案和云辐射方案。模式采用 NCEP 6 小时一次的 1°×1°再

分析资料。模拟时间从 2008 年 3 月 20 日 08 时到 2008 年 3 月 21 日 08 时,模式在 360 分钟时重新启动,重新启动后 10 分钟输出一次。

## 2 实测和模拟结果的对比分析

### 2.1 实测和模拟的天气形势分析

模拟所得形势场与 NCEP 再分析数据形势场基本一致,在河西走廊附近,有一低压槽,这个低压槽向东移动,在 20 时移动到河套地区,北京、河北、山西均处于槽前。模式较好地模拟了 500 hPa 河西走廊附近的槽及其向东的移动。

### 2.2 模拟和实测的云场

为了与卫星云图进行比较,我们把 700 hPa 高度以上各格点水成物比质量做垂直相加,得出云带的分布。从 MICAPS 红外云图可以看出,3 月 20 日 08 时,有一云系以银川为中心,另外,在陕西南部,还有一较小的云系分布在西安附近。从 12 时开始,云系不断向东移动,且范围扩大,到 16 时左右,开始产生降水,21 日 08 时,云系消散,范围变小且基本移出北京河北。从图 1 可以看出,模拟的主要云系的分布和走向较好。

### 2.3 模拟和实测的降水场

图 2 给出 3 月 21 日 08 时实测和模拟的 24 小时降水量。从图 2 看出,模拟所得 24 小时降水的位置与实测大致相同,高值区都集中在山西地区。降水量 10 mm 以下的分布区域模拟所得结果大于实测,但 15mm 以上降水的分布范围模拟小于实测,总的来说,模拟所得降水偏弱,但降水系统的分布是大致相同的。

## 3 微物理场和动力场特征

为了进一步分析此次降雨过程的微物理和动力特征,选取降水较强的时刻与位置做剖面,图 3a 是 2008 年 3 月 20 日 16 时的组合反射率图,选取 A1—A2 做剖面,此时处于云系发展阶段,所取剖面位于一个小的回波中心,分析其微物理特征是否适合进行催化试验。

### 3.1 模拟的微物理场特征

图 3 给出了各种降水粒子的垂直分布,云中冰雪

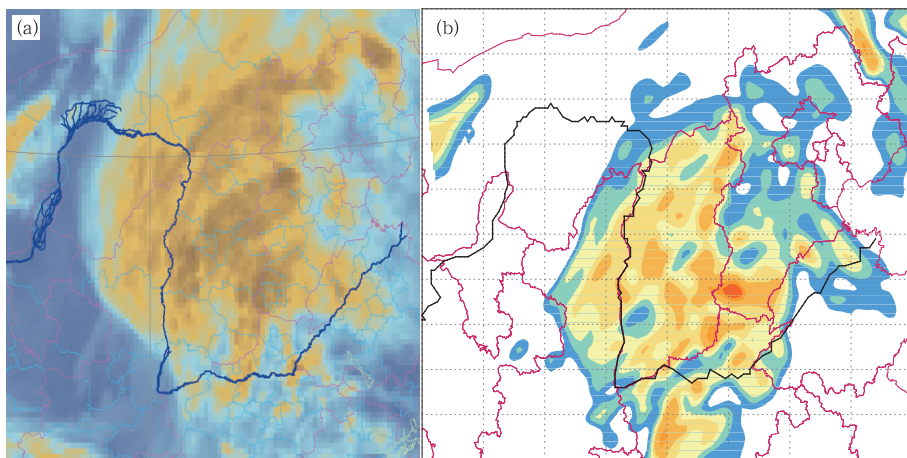


图 1 2008 年 3 月 20 日 22 时实测(a)和模拟(b)云场

Fig.1 MICAPS infrared images: (a) observed at 22 BT 20 March 2008, and (b) simulated

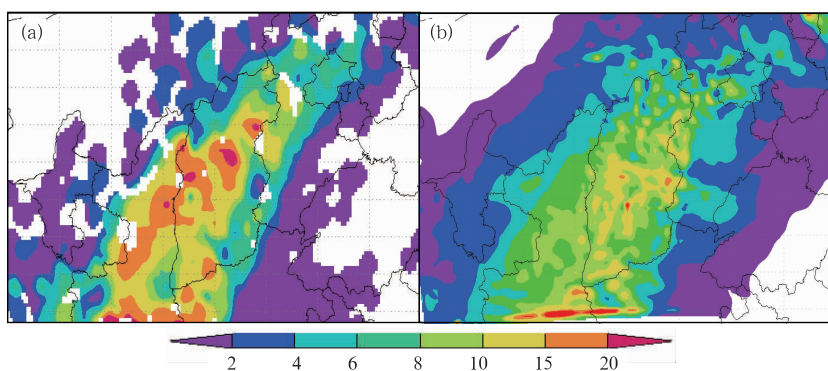


图 2 2008 年 3 月 21 日 08 时实测(a)和模拟(b)的 24 小时降水量(单位:mm)

Fig.2 The 24 hour precipitation (unit: mm) at 08 BT 21 March 2008 for  
(a) observed and (b) simulated results of 15 km grid

晶分布较广,从 750 hPa 一直伸展到 250 hPa (图 3b),从图 3c 可以看出,冰晶在 550 hPa 高度  $-10^{\circ}\text{C}$  附近存在两个高值中心,分别位于  $110.4^{\circ}\text{E}$  到  $110.5^{\circ}\text{E}$  之间和  $110.7^{\circ}\text{E}$  到  $110.8^{\circ}\text{E}$  之间。云水主要分布在 500 hPa 以下,在 650 hPa 位置也就是零度层之上  $110.5^{\circ}\text{E}$  到  $110.75^{\circ}\text{E}$  之间存在一个高值区,最大值  $0.24 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,在零度层以下 750 hPa 高度存在两个高值中心,分别在  $110.4^{\circ}\text{E}$  到  $110.5^{\circ}\text{E}$  之间和  $110.65^{\circ}\text{E}$  到  $110.8^{\circ}\text{E}$  之间,最大值分别为  $0.27 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  和  $0.33 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,云底高度为 850 hPa 左右(图 3e)。冰晶数浓度分布和云水分布对比来看,在  $110.4^{\circ}\text{E} \sim 110.5^{\circ}\text{E}$ 、 $110.7^{\circ}\text{E} \sim 110.8^{\circ}\text{E}$  之间冰晶粒子的分布和云水的分布位置是对应的,而在  $110.5^{\circ}\text{E} \sim 110.75^{\circ}\text{E}$  这个位置冰晶数浓度很小但存在一个云水高值区,适宜进行播撒试验。霰的比质量大值区分布在零度层(图 3d),最大为  $0.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,雨水比质量相对较小,最大为  $0.07 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,高值区

与霰的高值区对应(图 3f)。冰雪晶在下落过程中碰冻过冷云水,形成霰粒子,霰粒子在零度层下融化为雨水,此时处于云系发展阶段,冰相过程将进一步发展。在对流云降水中,云水更丰富,雨水和霰的比质量较高,且垂直运动发展非常旺盛,冰晶粒子分布在较高的位置<sup>[15]</sup>。本次过程为典型的层云降水过程,且层状云系中存在适合作业位置,进行人工增雨催化数值试验,会取得好的效果。

### 3.2 模拟的动力场特征

在  $110.4^{\circ}\text{E} \sim 110.5^{\circ}\text{E}$  之间存在一个上升气流区,气流沿东北方向上升,到达 550 hPa 位置,遇到一个下沉气流中心,并且在下沉气流之下形成一个上升速度高值区,位于  $110.5^{\circ}\text{E} \sim 110.7^{\circ}\text{E}$  之间,对应冰晶数浓度低但云水丰富区。而在  $110.7^{\circ}\text{E} \sim 110.8^{\circ}\text{E}$  之间也存在一个上升气流中心,而且这个区域上升速度最大可以达到  $9 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。上升速度高

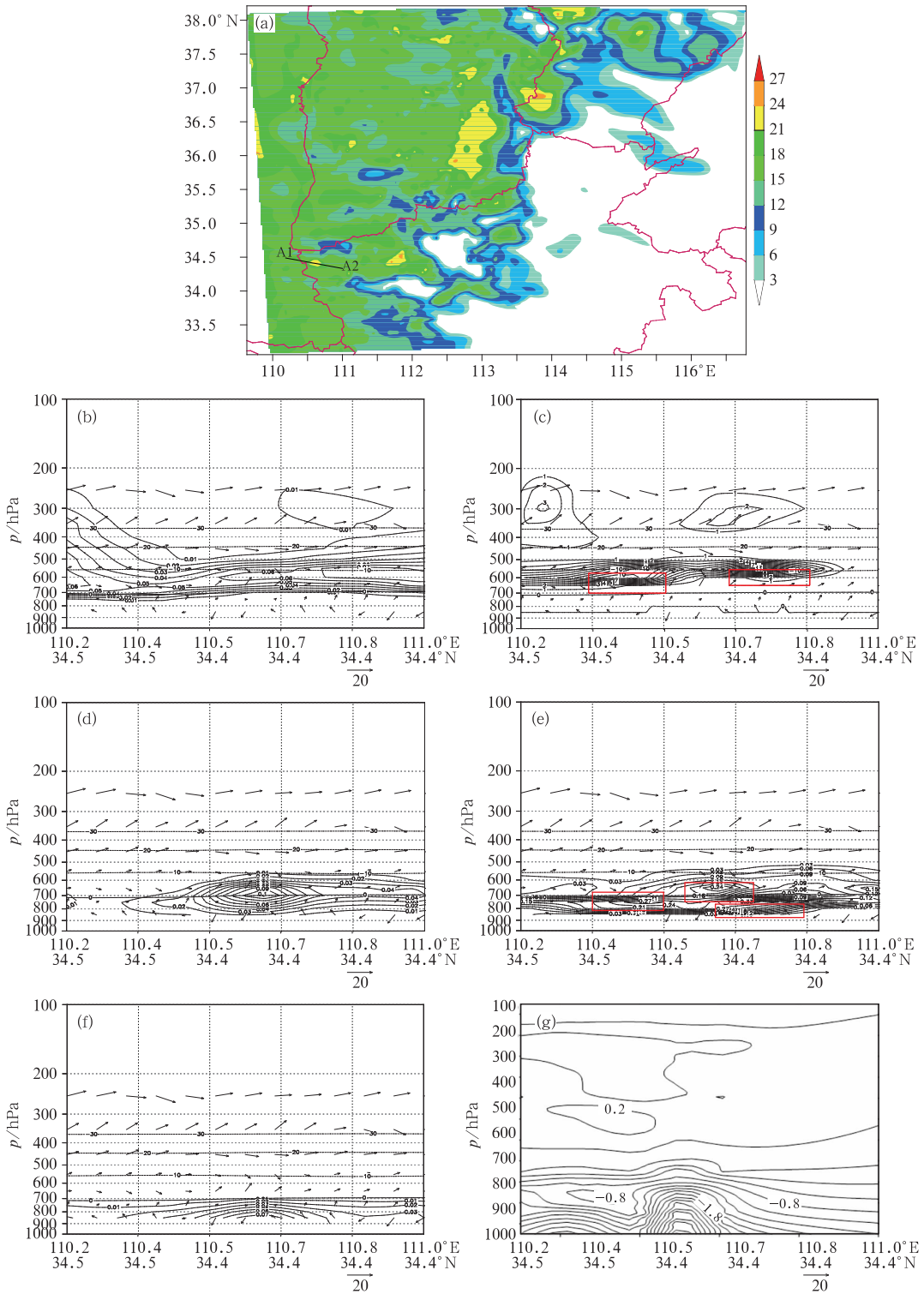


图 3 5 km 网格模拟的 2008 年 3 月 20 日 20 时雷达组合反射率(a, 单位: dBz) 冰雪晶(b), 冰晶数浓度(c), 霰(d), 云水(e), 雨水(f), 过饱和比湿(g)各物理量沿图 (a)中模拟雷达回波上直线 A1—A2 的垂直剖面

实线代表比含水量(单位:  $g \cdot kg^{-1}$ ), 虚线温度(单位:  $^{\circ}C$ ), 箭头为流场

Fig. 3 The simulated composite reflectivity and physical quantity distribution across A1—A2 at 20 BT 20 March 2008 (a) composite reflectivity (unit: dBz), (b) ice and snow, (c) numerical concentration of ice, (d) graupel, (e) cloud water, (f) rain water, (g) saturation specific humidity



催化后降水量较自然云降水的差值。可以看出,催化后 5 min,催化区域的 10 min 增雨量为负值,最大减少雨量 0.018 mm。催化后 15 min 开始出现增雨效果,25 min 时区域内增雨量最大可达 0.18 mm,之后慢慢出现减雨区,但以增雨为主,催化后 95 min 时,消雨效果大于增雨,最大约为 -0.04 mm。

### 4.3 催化效应

催化后前 15 min 为第一阶段,减雨为主,催化后 15~65 min 为第二阶段,增雨为主,之后为第三阶段减雨期。

#### 4.3.1 第一阶段减雨区的微物理及热力动力特征

图 5 为沿 34.41°N 的东西向剖面,催化区域水汽明显减少,最大减少  $0.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,位于 550 hPa 附近,过冷云水最大减少  $0.06 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。冰晶比质量增加  $0.035 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,数浓度最多增加  $800 \text{ 个} \cdot \text{L}^{-1}$ ,雪的比质量增加明显,最大增加  $0.12 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,霰比质量变化不大,雨水在 700 hPa 零度层高度略有增加。可以看出,水汽和过冷云水最大共减少  $0.16 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,而冰晶粒子和雪粒子最大增加共  $0.16 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,四者在量上基本平衡。同时注意到,催化区域水汽减少的量明显大于过冷云水减少的量,说明过冷云水对增雨的贡献要小于水汽的贡献,3.2 节模拟动力场特征时注意到 550 hPa 附近为下沉气流中心,但此时下沉气流已变为上升气流,温度开始增加,催化的动力、热力效应明显,这与胡志晋、汪小斌<sup>[3,6-7,14]</sup>等得出的结论一致。

分析减雨中心(34.41°N、110.7°E)各降水粒子源汇项转化过程,如图 6 所示。雪源项中,雪碰并过冷云滴增长(ccs)在催化区域减少,在催化区域下方增加,说明催化后在催化区域过冷云滴减少,而在其下方由于雪的增加雪碰并过冷云滴增长(ccs)增加,雪碰并冰晶增长(cis)明显增加,冰晶转化成雪增长(ais)略有增加。霰源项中,雪碰并雨水增长(crs)增加,霰碰并雨水增长(crg)减少。在催化高度雨滴碰并雪(csr)和雪融化为雨滴(msr)有明显增加,从 700 hPa 高度开始基本为零,而霰的融化增长(mgr)在催化后有大幅度的减少,减少的范围一致从 600~900 hPa,使得地面降水减少。

#### 4.3.2 增雨区的微物理及动力特征

催化后 25 min 地面降水量有很大增加,图 7 给出沿 34.41°N 的东西向剖面,催化后水汽减少的范围变大且向东移动,云水的减少区域也有所东移。冰晶比质量和数浓度增加值与催化后 5 min 相比大

幅减少,雪的比质量增加值也减少至  $0.07 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,霰开始增加,雨水比质量最大增加  $0.014 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,且雨水降落到地面。沿着 34.41°N 剖面雨水存在两个高值中心,110.7°E 西侧雨水最大增加值约为  $0.016 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,此处降水的增加主要是因为高层霰的增加,霰在降落过程中融化使得雨水增加。而 110.7°E 东侧降水的增加主要来自于雪晶的增加,雪晶在零度以下融化使得降水增加。催化区域上升气流加强,最大增加  $3.5 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ,上升气流强于下沉气流。温度最大升高  $0.35 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

图 8 是增雨中心(34.41°N、110.7°E)各降水粒子源汇项转化过程,可以看出,雪源项中雪碰并冰晶增长(cis)与催化后 5 min 相比减少。霰源项中雪碰并雨滴(crs)明显增加,霰碰并雨滴(crg)减少。在 650~730 hPa 之间,雨滴碰并雪(csr)和雪的融化增长(msr)都有增加,而垂直层  $k=10$ (650 hPa)到  $k=6$ (800 hPa)之间,霰融化增长(mgr)减少很大,从 800 hPa 向下,霰融化增长(mgr)差值为正且越来越大,地面降水增加。可以看出,此处降水的增加是由于播撒后雪晶明显增加,使得雪碰并过冷雨滴增加,也就是说霰得到增加,而霰在零度层之下融化成雨水从而使得降水增加。

### 4.4 不同剂量不同高度催化试验

#### 4.4.1 不同剂量

将催化试验区域的累积降水量与自然云模拟相应区域(33.2°~35°N、110°~112.4°E)的累计降水量相减,得到区域累积增雨量。在模拟开始后 470 min 即 2008 年 3 月 20 日 15 时 50 分引入人工冰晶,催化时间为 1 min,催化剂量不同时,累计增雨量发生变化,催化后 20 min 累计增雨量为负值,当催化剂量小于  $10^5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  时,催化效果不明显,当催化剂量为  $10^6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  时,区域增雨量在催化后 40 分钟接近 1500 kt,之后有所减少,当催化剂量增加到  $10^7 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  时,虽然区域增雨量最大值较  $10^6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  大,但是在实际操作中这个剂量很难实现,因此我们选取  $10^6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  作为催化剂量。

#### 4.4.2 不同高度

催化时间不变,催化剂量为  $10^6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,在不同的高度进行催化试验,效果也不同。从表 1 可以看出,垂直层为 11(温度  $t = -5.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,气压  $p = 610 \text{ hPa}$ )时,区域增雨量最小,78.3 kt;垂直层为 12(温度  $t = -7.8 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,气压  $p = 570 \text{ hPa}$ )时,区域增雨量最大为 1432.7 kt;垂直层为 13(温度  $t = -10.9 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,

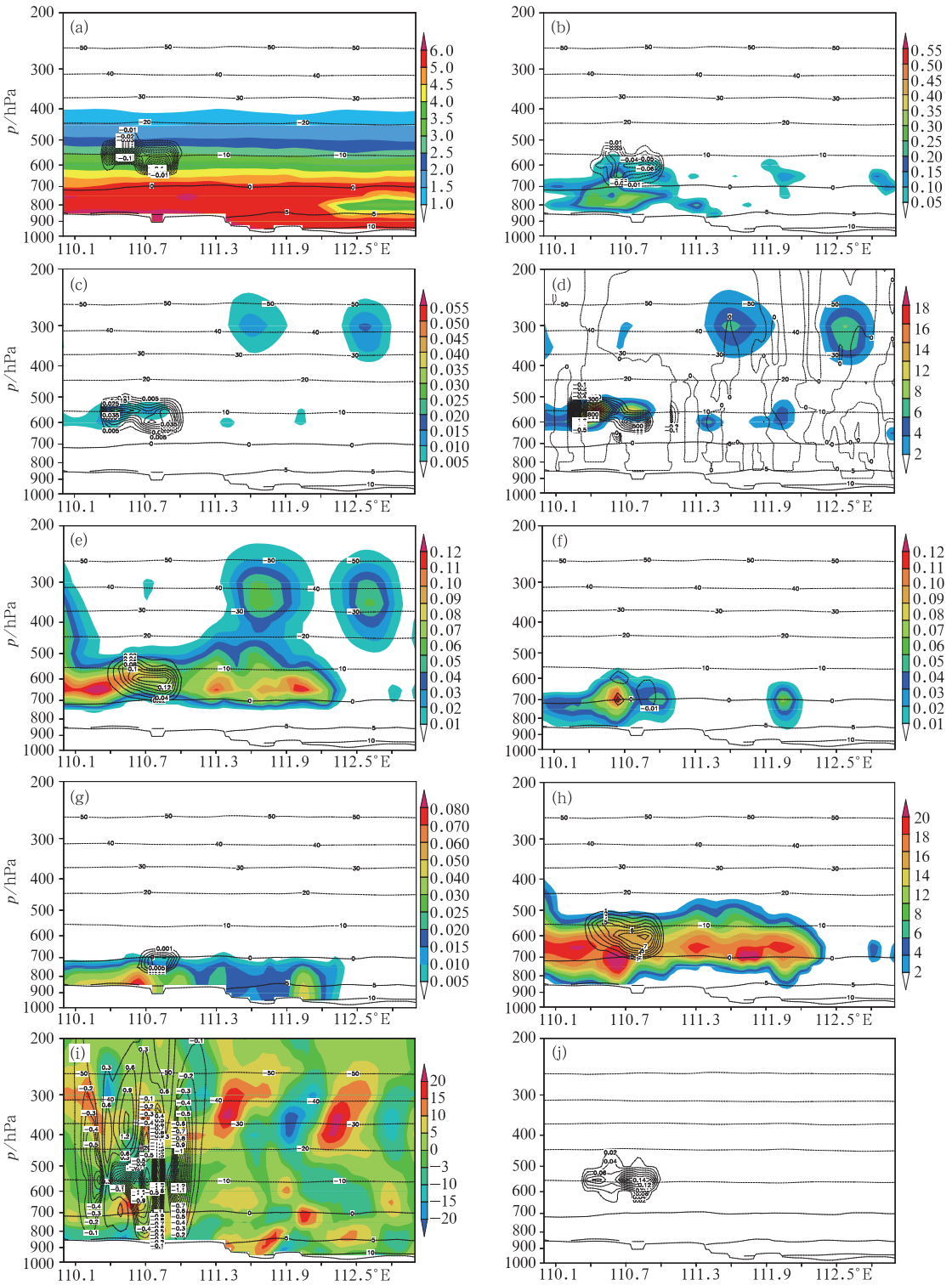


图 5 催化后 5 min 沿 34.41°N 催化云和自然云各物理量的差值(实线为正值,虚线为负值)和自然云各物理量(阴影)垂直分布  
 (a) 水汽比质量 (单位:  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ); (b) 云水比质量 (单位:  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ); (c) 冰晶比质量 (单位:  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ );  
 (d) 冰晶数浓度 (单位:  $\text{个} \cdot \text{m}^{-3}$ ); (e) 雪比质量 (单位:  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ); (f) 霰比质量 (单位:  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ );  
 (g) 雨水比质量 (单位:  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ); (h) 雷达反射率因子 (单位:  $\text{dBz}$ ); (i) 垂直速度 (单位:  $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ); (j) 温度 (单位:  $^{\circ}\text{C}$ )

Fig. 5 Hydrometeors distribution of seeding and nonseeding 5 min after seeding:

(a) mix ratio (unit:  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), (b) cloud water (unit:  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), (c) ice (unit:  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), (d) numerical concentration of ice (unit:  $\text{m}^{-3}$ ), (e) snow (unit:  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), (f) graupel (unit:  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), (g) rain water (unit:  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), (h) reflectivity (unit:  $\text{dBz}$ ), (i) vertical velocity (unit:  $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ), and (j) temperature (unit:  $^{\circ}\text{C}$ )

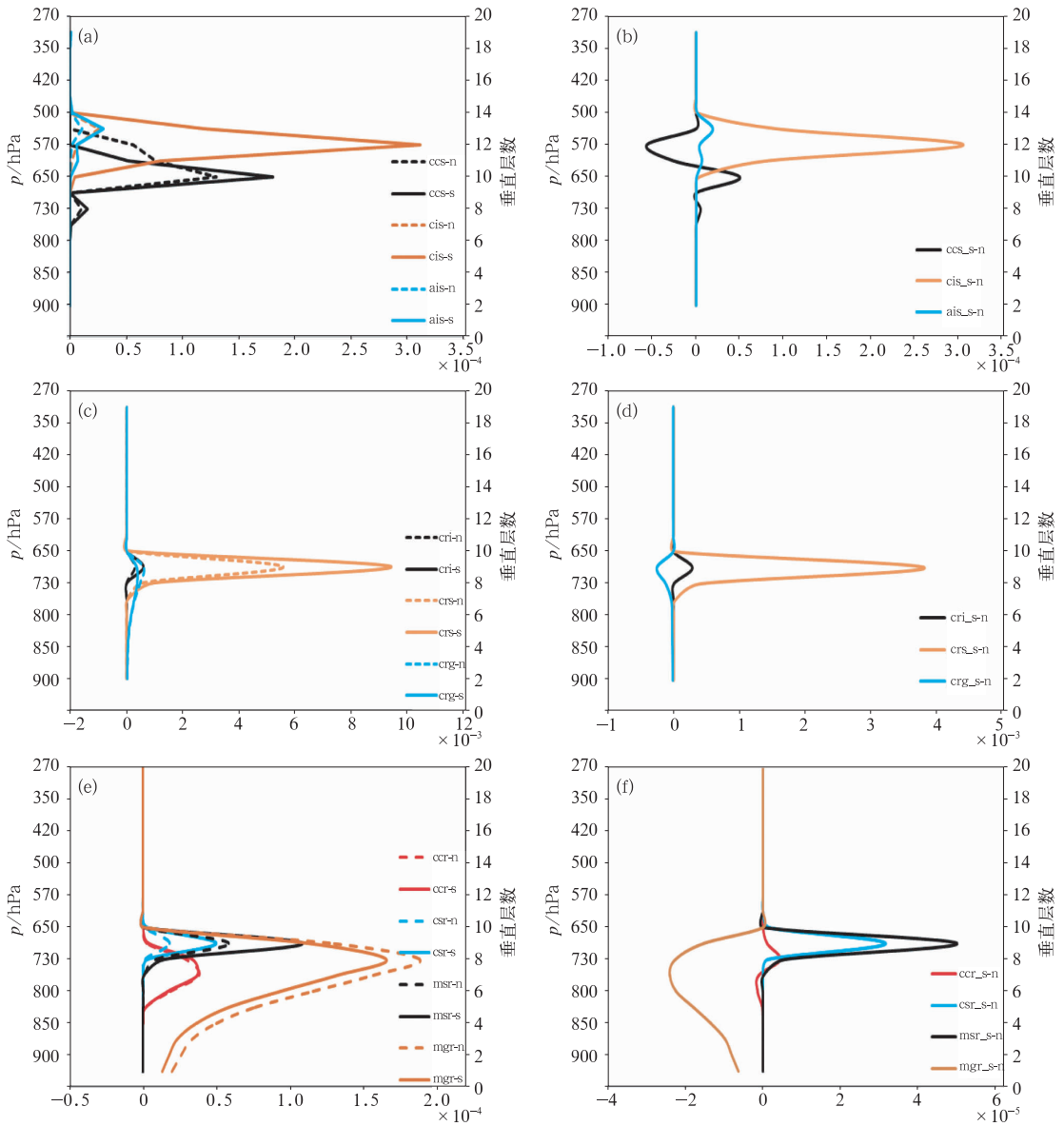


图 6 催化后 5 min 减雨中心(34.41°N、110.7°E)催化试验(实线)和自然模拟(虚线)的各物理量垂直分布 (a) 雪源项; (b) 雪源项差值; (c) 霰源项; (d) 霰源项差值; (e) 雨滴源项; (f) 雨滴源项差值

Fig. 6 Hydrometeors distribution at rain reduction center for seeding and nonseeding 5 min after seeding:

(a) snow origin, (b) snow origin difference, (c) graupel origin, (d) graupel origin difference, (e) rain origin, and (f) rain origin difference

气压  $p = 530$  hPa) 时区域增雨量也很大, 为 1417.7 kt; 垂直层为 14 (温度  $t = -14.4$  °C, 气压  $p = 500$  hPa) 时区域增雨量 550.8 kt。对照图 3g 可以看出, 在 570~470 hPa 之间存在一个过饱和比湿值较大的区域, 在  $k = 11$  层之上进行催化会得到较好的效果。垂直层为 13 时, 虽然冰晶数浓度与  $k = 11$  时接近, 但是冰晶比质量要远大于其比质量, 说明在第 13 层催化前冰晶尺度都比较大, 且过饱和比湿值高, 催化后加入小冰晶效果较好。而  $k = 12$  与  $k =$

11 相比, 虽然云水比质量和冰晶数浓度都近似, 除过饱和比湿值的差别外,  $k = 11$  时, 催化区域虽为上升气流, 其周围环绕着较强的下沉气流, 从剖面图可以可出, 催化区域上方有一强的下沉气流区, 冰晶无法随上升气流向上扩散, 因此催化效果不明显。在  $k = 12$  层进行催化, 冰雪晶粒子增加, 霰粒子的增加非常明显, 而在  $k = 13$  层进行催化, 雪粒子的增加占主要方面, 霰粒子增加很少。在  $k = 14$  层进行催化也会取得一定的效果, 因为此处虽然云水含量低, 但



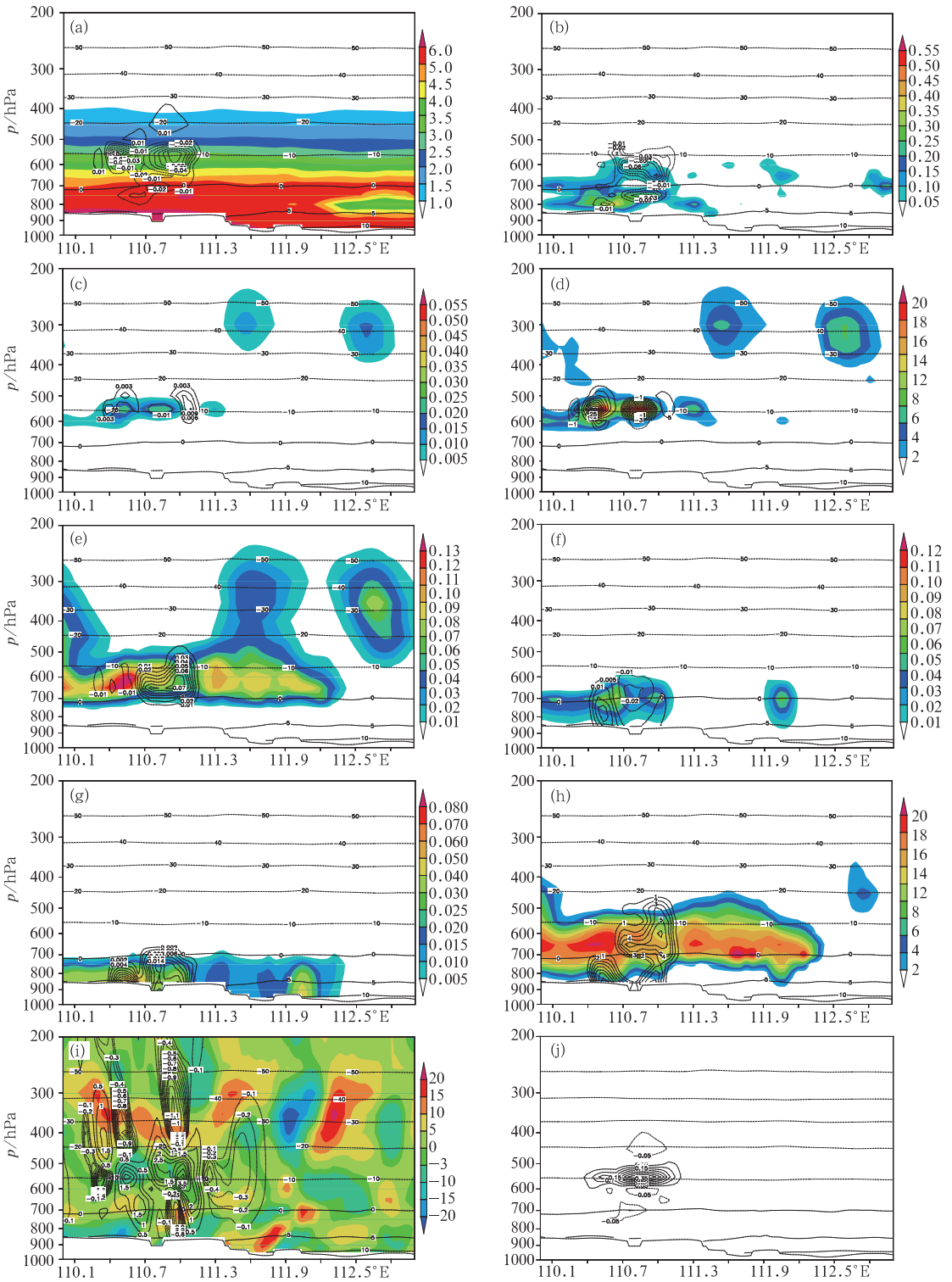


图 7 催化后 25 min 沿 34.41°N 催化云和自然云各物理量的差值

(实线为正值,虚线为负值)和自然云各物理量(阴影)垂直分布

(a) 水汽比质量 (单位:  $g \cdot kg^{-1}$ ); (b) 云水比质量 (单位:  $g \cdot kg^{-1}$ ); (c) 冰晶比质量 (单位:  $g \cdot kg^{-1}$ );

(d) 冰晶数浓度 (单位:  $个/m^3$ ); (e) 雪比质量 (单位:  $g \cdot kg^{-1}$ ); (f) 霰比质量 (单位:  $g \cdot kg^{-1}$ );

(g) 雨水比质量 (单位:  $g \cdot kg^{-1}$ ); (h) 雷达反射率因子 (单位: dBz); (i) 垂直速度 (单位:  $cm \cdot s^{-1}$ ); (j) 温度 (单位:  $^{\circ}C$ )

Fig. 7 Hydrometeors distribution of seeding and nonseeding 25 min after seeding;

(a) mix ratio (unit:  $g \cdot kg^{-1}$ ), (b) cloud water (unit:  $g \cdot kg^{-1}$ ), (c) ice (unit:  $g \cdot kg^{-1}$ ), (d) numerical concentration of ice (unit:  $m^{-3}$ ), (e) snow (unit:  $g \cdot kg^{-1}$ ), (f) graupel (unit:  $g \cdot kg^{-1}$ ), (g) rain water (unit:  $g \cdot kg^{-1}$ ),

(h) reflectivity (unit: dBz), (i) vertical velocity (unit:  $cm \cdot s^{-1}$ ), and (j) temperature (unit:  $^{\circ}C$ )

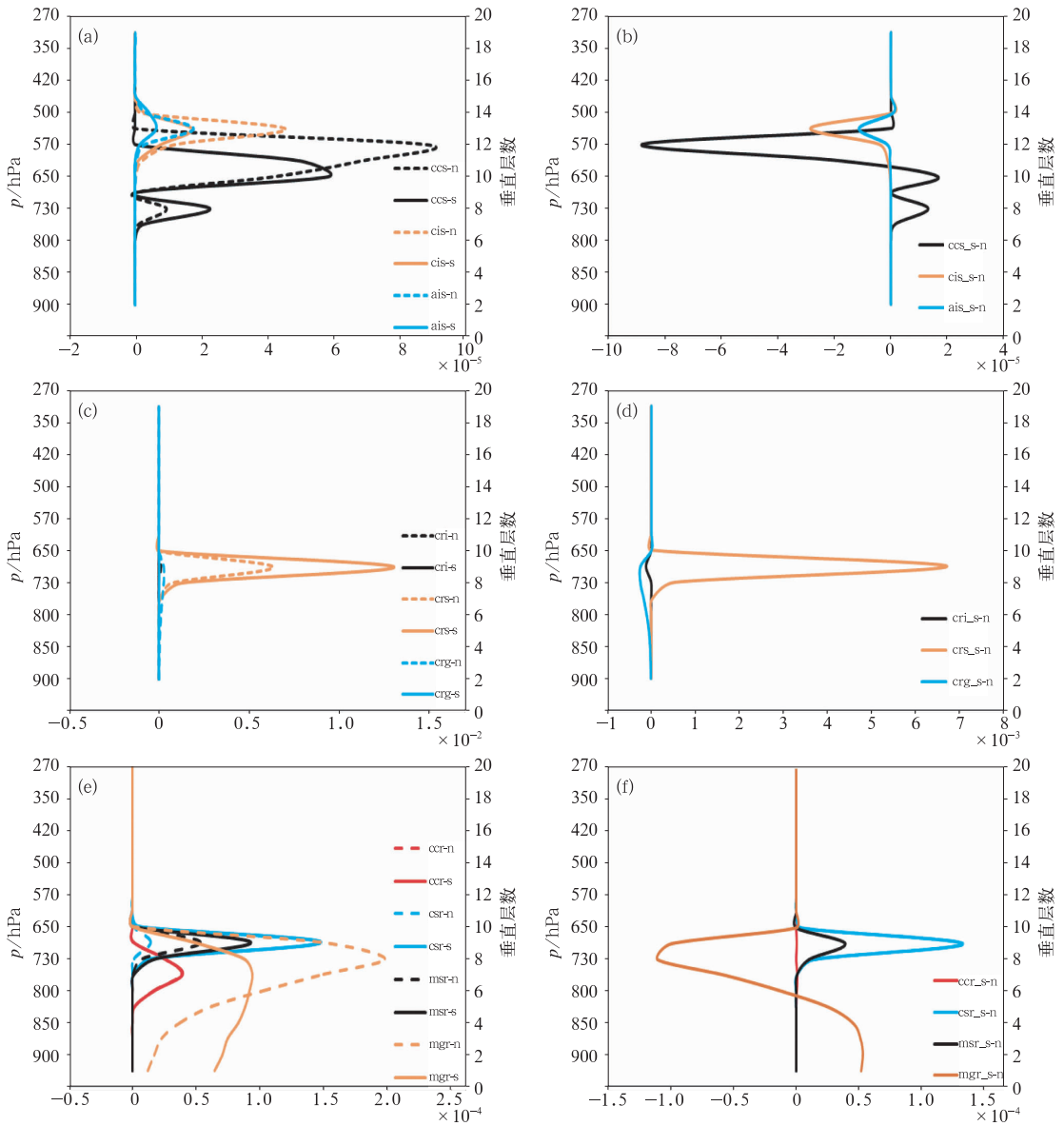


图 8 催化后 25 min 增雨中心(34.41°N,110.7°E)催化试验(实线)和自然模拟(虚线)的各物理量垂直分布 (a) 雪源项; (b) 雪源项差值; (c) 霰源项; (d) 霰源项差值; (e) 雨滴源项; (f) 雨滴源项差值

Fig. 8 Hydrometeors distribution at rain reduction center for seeding and nonseeding 5 min after seeding: (a) snow origin, (b) snow origin difference, (c) graupel origin, (d) graupel origin difference, (e) rain origin, and (f) rain origin difference

表 1 不同催化高度试验的催化前物理量区域平均值和 1 小时区域累积增雨量

Table 1 Regional mean value of different height and 1 h regional accumulated rainfall enhancement

	Test1	Test2	Test3	Test4
垂直层	11( $t=-5.3^{\circ}\text{C}$ , $p=610\text{ hPa}$ )	12( $t=-7.8^{\circ}\text{C}$ , $p=570\text{ hPa}$ )	13( $t=-10.9^{\circ}\text{C}$ , $p=530\text{ hPa}$ )	14( $t=-14.4^{\circ}\text{C}$ , $p=500\text{ hPa}$ )
温度/ $^{\circ}\text{C}$	-5.3	-7.8	-10.9	-14.4
云水/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	0.059144	0.058059	0.01	0
冰晶/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	0.000314	0.000259	0.00038	0.000362
冰晶数浓度/(个/kg)	$0.36\times 10^3$	$0.29\times 10^3$	$0.44\times 10^3$	$0.70\times 10^3$
垂直速度/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	0.028	0.037	0.025	0.006
区域增雨量/kt	78.3	1432.7	1417.7	550.8

还有较高的过饱和比湿值,播撒后可以转化为降水。这符合胡志晋<sup>[14]</sup>所给出的结论。在  $k=12$  高度进行催化,人工引入的冰晶粒子可在催化区域及其上方传播,停留较长时间,且云水丰富、冰晶含量较低,因此选择  $k=12$  作为催化高度。

## 5 结论与讨论

(1) 不同剂量和不同高度催化结果表明, $10^6 \sim 10^8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  催化效果都比较明显,当催化剂量选择  $10^7 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  和  $10^8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  时,虽然在开始阶段累积降水量增加明显,但后期消雨也多,而且在现实操作中难以实现。催化高度  $k=12$  ( $t=-7.8^\circ\text{C}$ ,  $p=570 \text{ hPa}$ ) 和  $k=13$  ( $t=-10.9^\circ\text{C}$ ,  $p=530 \text{ hPa}$ ) 时,催化效果较好,因此应选择过冷云水含量较高、过饱和比湿值高且冰晶粒子较少的层次进行播撒。

(2) 在过冷水含量高且冰晶含量低的区域引入人工冰晶可使地面降水增加。催化后 20 min 出现降水量增加,50 min 后出现减雨中心,但仍以增雨为主,80 min 后催化效果减雨大于增雨,130 min 地面累积增雨量达到最小值。引入人工冰晶后催化区域水汽明显减少,云水也有减少,冰晶粒子和雪粒子增加,四者在量上基本达到平衡,而且水汽减少的量明显大于过冷云水的减少量,水汽对增雨的贡献大于过冷云水的贡献。同时催化后 550 hPa 附近的下沉气流中心变为上升气流,动力、热力效应明显。

(3) 加入人工冰晶催化后过冷云水减少,冰晶和雪增加,霰略有增加。雪碰并冰晶增长、冰晶转化成雪增长是催化高度附近雪增长的主要过程,而催化高度以下,雪碰并过冷云滴增长是雪增长的主要过程;雪晶碰并过冷雨滴增长是霰增长的主要过程;雨滴碰并云滴增长是雨滴增长的主要过程。催化后由于催化区域云水减少而下方雪增加,雪碰并过冷云滴增长(ccs)在催化区域减少,在其下方增加,特别是催化前期现象明显。由于雪粒子的增多,雪碰并过冷雨水增长(crs)在霰源项中所占比例也增加,而霰碰并过冷雨水增长(crg)减少,雪碰并过冷雨滴增长(crs)是霰增长的主要过程。雨滴碰并雪增长(csr)和雪的融化(msr)都是雨滴增长的重要过程,主要发生在 650~730 hPa 之间,霰的融化增长是雨滴增长的主要过程,催化后第一阶段霰的融化增长(mgr)有很大幅度的减少,使得地面降水减少,第二

阶段垂直层在 6~10 层(800~650 hPa)减少很大,6 层以下增大,且越接近地面增长越明显,地面降水增加。

## 参考文献

- [1] Farley R D, Nguyen P, Orville H D. Numerical simulation of cloud seeding using a three-dimensional cloud model[J]. J Wea Modif, 1994, 26(1): 113-124.
- [2] Meryers M P, DeMott P J, Cotton W R. Comparison of seeded and non-seeded orographic cloud simulations with an explicit cloud model[J]. J Appl Meteor, 1995, 34: 834-846.
- [3] 胡志晋, 秦瑜, 王玉彬. 层状冷云数值模式[J]. 气象学报, 1983, 41(2): 194-203.
- [4] 胡志晋, 严采繁. 层状云微物理过程的数值模拟(一)——微物理模式[J]. 气象科学研究院院刊, 1986, 1(1): 37-52.
- [5] 胡志晋, 严采繁. 层状云微物理过程的数值模拟(二)——中纬度气旋云系的微物理过程[J]. 气象科学研究院院刊, 1987, 2(2): 133-142.
- [6] Hu Z, Wang X, You L, et al. Primary results of numerical study on mesoscale effect of ice-seeding in stratiform cloud system[G]. Sixth WMO Sci Conference on Weather Modification, 1994, WMO/TD-596: 483-486.
- [7] Wang X, Hu Z, You L, et al. Physical analysis and its numerical ice seeding simulation of a spring precipitation process in North China[G]. Sixth WMO Sci Conference on Weather Modification, 1994, WMO/TD-596: 549-552.
- [8] You L, Liu Y. Some microphysical characteristics of cloud and precipitation over China[J]. Atmos Res, 1995, 35(2-4): 271-281.
- [9] 王成恕, 胡志晋, 游来光. 华北地区锋面云系和降水个例研究[J]. 气象学报, 1995, 53(增刊): 631-640.
- [10] 楼小凤. MM5 模式的新显示云物理方案的建立和耦合及原微物理方案的对比分析[D]. 北京大学博士学位论文, 2002.
- [11] 史月琴. 华南冷锋云降水微物理过程及其人工催化机理的数值模拟试验研究[D]. 北京大学博士学位论文, 2008.
- [12] 孙晶, 楼小凤, 胡志晋. 祁连山冬季降雪个例模拟分析(I): 降雪过程和地形影响[J]. 高原气象, 2009, 28(3): 485-495.
- [13] 孙晶, 楼小凤, 胡志晋, 等. 祁连山冬季降雪个例模拟分析(II): 人工催化试验[J]. 高原气象, 2009, 28(3): 496-506.
- [14] 胡志晋. 层状云人工增雨机制、条件和方法的探讨[J]. 应用气象学报, 2001, 12(增刊): 10-13.
- [15] 雷雷, 朱伟军, 毕宝贵, 等. 河南一次强降水过程云和降水结构的中尺度数值模拟[J]. 气象, 2007, 33(4): 15-22.
- [16] 廖菲, 洪延超, 郑国光. 影响云和降水的动力-热力与微物理因素的研究概述[J]. 气象, 2006, 32(11): 4-11.
- [17] 党娟, 王广河, 刘卫国. 甘肃省夏季层状云微物理特征个例分析[J]. 气象, 2009, 35(10): 24-36.
- [18] 于丽娟, 姚展予. 一次层状云飞机播云试验的云微物理特征及响应分析[J]. 气象, 2009, 35(10): 8-23.