

楼小凤,傅瑜,孙晶. 一次浙江对流云催化数值模拟试验. 应用气象学报,2019,30(6):665-676.

DOI: 10.11898/1001-7313.20190603

# 一次浙江对流云催化数值模拟试验

楼小凤<sup>1)2)</sup>\* 傅瑜<sup>3)</sup> 孙晶<sup>1)2)</sup>

<sup>1)</sup>(中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室,北京 100081)

<sup>2)</sup>(中国气象局云雾物理环境重点开放实验室,北京 100081)

<sup>3)</sup>(辽宁省大连市人工影响天气办公室,大连 116001)

## 摘 要

为了研究吸湿性催化剂、碘化银催化剂及两者的联合催化效果,利用双参数三维对流云催化模式,对浙江南部一次对流云降雨过程分别进行盐粉暖云催化、碘化银冷云催化和冷暖混合催化试验,对比研究不同催化方案对对流云降雨的可能影响。结果表明:盐粉催化导致先增雨后减雨,主要通过盐溶滴与云滴碰并增长,及雨滴碰并和霰粒子碰冻过程消耗。在上升气流区和降雨前期进行催化的增雨效果更好,30  $\mu\text{m}$  粒径的盐粉催化剂量为 12.5/L 时,可增加降雨量 17.8%。在降雨过程的不同发展阶段进行 AgI 催化,表现出先减雨后增雨的催化效果。盐粉和碘化银的联合催化,由于两者催化效果的不同步,使得不同吸湿性催化剂和碘化银催化剂量配置会导致不同的催化效果。当 30  $\mu\text{m}$  的盐粉,催化剂量 12.5/L,联合碘化银 100/L 的冷区催化,可取得 19% 的增雨效果。

**关键词:** 对流云模式; 盐粉催化; AgI 催化; 联合催化

## 引 言

人工影响降水催化可分为冷云催化和暖云催化两大类<sup>[1]</sup>。就催化剂类型而言,成冰剂和制冷剂主要用于冷云催化,吸湿性催化剂用于暖云催化,不同催化剂的催化原理和催化技术不同<sup>[2]</sup>。长期以来,针对冷云的人工增雨试验和作业广泛开展,冷云催化技术相对成熟,暖云催化的研究和外场试验较少<sup>[3]</sup>。

数值模式已成为人工影响天气理论研究及指导人工影响天气作业的重要工具。国内外发展了多种冷云催化模式并在人工防雹、增雨等方面开展了大量研究。Koenig 等<sup>[4]</sup>和 Levy 等<sup>[5]</sup>分别利用二维和三维云模式研究了增加冰晶数浓度对降水的影响。Xue 等<sup>[6-7]</sup>在 WRF 模式的 Thompson 方案中实现了碘化银播撒,模拟了地面和空中催化对冬季地形云的影响。在国内,何观芳等<sup>[8]</sup>采用一维时变模式

对积雨云进行了人工播撒冰晶的研究。洪延超<sup>[9-10]</sup>发展了三维双参数碘化银播撒模式,并进行防雹催化的机制研究。刘诗军等<sup>[11]</sup>发展了 4 种核化机制的碘化银核化模块,该模式被用于多用途的人工影响天气催化试验研究<sup>[12-14]</sup>。Guo 等<sup>[15-16]</sup>开展了不同催化剂的对比催化试验研究。近年来,中尺度模式广泛应用,一类通过改变冰晶数浓度的方法进行冷云催化数值试验<sup>[17-18]</sup>,另一类是加入碘化银,如方春刚等<sup>[19]</sup>在 WRF 中尺度模式的 Thompson 方案中加入了碘化银比质量含量预报方程,研究催化剂在云中的传输、扩散以及与云的相互作用。何晖等<sup>[20-21]</sup>将碘化银催化模块与 MM5, WRF 中尺度模式耦合并开展了模拟研究,发现碘化银播撒率对降水量改变影响明显。刘卫国等<sup>[22]</sup>对比分析了在中尺度模式中直接增加冰晶方案和播撒碘化银方案的催化效果。

针对吸湿性粒子对云降水的影响及吸湿性粒子的人工增雨催化,已开展大量研究。Rosenfeld

2019-07-15 收到, 2019-10-30 收到再改稿。

资助项目: 国家自然科学基金面上项目(41675137), 国家重点研究发展计划(2018YFC1507901), 中国气象科学研究院基本科研业务费项目(2019Z013, 2018Z009, 2018KJ007)

\* 邮箱: louxf@cma.gov.cn

等<sup>[23]</sup>研究了吸湿性催化剂气溶胶的扩散和稀释,从催化剂对对流云云滴大小分布(DSD)的影响和催化剂如何影响降水过程两方面进行分析,发现吸湿性催化剂的作用主要是加速云雨自动转化。观测表明:我国自然大气中次微米级的核浓度很高,须采用大剂量吸湿性大核粒子才能改变云的微物理结构。20世纪60年代顾震潮等<sup>[24]</sup>曾使用盐粉催化对流云,提出了大颗粒、大剂量的催化方法,随后我国开始吸湿性粒子的观测、吸湿性焰剂的研究和外场催化试验<sup>[25-27]</sup>。对我国南方夏季对流云的观测研究发现,自然对流云中大量直径达 $100\ \mu\text{m}$ 的大云滴,因此,提出对流云的暖云催化宜采用大颗粒盐粒子(直径大于 $30\ \mu\text{m}$ )和大剂量(每千米航线播撒 $5\sim 50\ \text{kg}$ )催化实现人工增雨<sup>[28]</sup>。20世纪80年代我国开始暖云催化的数值模式研究。二维平面对称积云降水模式试验表明:盐粉催化后约 $30\ \text{min}$ 出现增雨,一般采用几十微米至 $100\ \mu\text{m}$ 直径的盐粉为宜<sup>[29]</sup>。胡志晋等<sup>[30-31]</sup>针对我国南方夏季浓积云和积雨云开展了暖雨过程及其盐粉催化的数值研究,讨论了盐粉催化暖云降落的落区、雨强及风场对增雨的影响,楼小凤等<sup>[32]</sup>在此基础上发展了混合云盐粉催化模式。

研究发现,我国南方积层混合云系的飞机人工增雨的播撒剂量要达到 $30/\text{L}$ 的人工冰晶浓度,作为我国南方夏季的主要降水云系,与层状云相比,对流云的自然降水效率普遍不高,有较大的增雨潜力<sup>[33-34]</sup>。利用二维积云模式和二维时变模式分别对福建省和湖南省的对流云进行模拟分析夏季对流云含水量和降水效率,发现两地对流云均存在人工增雨增大降水效率的潜力<sup>[35]</sup>。福建省古田水库地区12年资料的统计分析表明,244次随机试验的增雨效果为 $20\%$ <sup>[36]</sup>。所以,南方的对流云和积层混合云有较好的催化潜力。

人工消云减雨作业大多为了减缓洪涝灾害和重大事件或重大活动保障的需要,有些增雨试验也曾出现反效果的减雨现象<sup>[37]</sup>。叶家东等<sup>[38]</sup>指出人工增雨作业中不适当的催化对象、不适当的催化剂和催化剂量以及不适当的催化部位和催化时机均可能导致无效或减雨。有些学者利用数值模式进行了人工减雨的模拟研究。Orville等<sup>[39]</sup>对暖底积云人工催化模拟试验时,发现播撒大量碘化银后较早形成

的雪和霰大多被上升气流输送进云砧,不能形成有效降水。对暖雨过程进行二维数值模拟试验结果<sup>[40]</sup>表明,改变云凝结核(CCN)浓度能影响暖雨过程和最终的降雨量及其分布。何晖等<sup>[20]</sup>将碘化银催化模块与MM5耦合并对2018年奥运会开幕式人工消减雨开展了模拟研究,发现碘化银播撒率对降水量改变影响明显。楼小凤等<sup>[13]</sup>对华南对流云强降水进行了碘化银催化模拟,探索减缓对流云降水的可能性。

综上所述,以往模式研究大多是单一冷云或暖云催化,同时采用冷暖云催化并与单一催化进行对比的研究报道较少。本文利用双参数云降水方案的三维对流云催化模式,分别进行吸湿性暖云催化、碘化银冷云催化和冷暖混合催化,对比研究催化时机、催化部位和催化剂量对对流云降水的可能影响。

## 1 模式、个例和方案

本文所用的三维对流云模式是在胡志晋等<sup>[41]</sup>的对流云微物理模式和邹光源<sup>[42]</sup>的动力学模式基础上发展的<sup>[12]</sup>。该模式包含水汽、云滴、雨滴、冰晶、霰和雹6种水成物的27种云物理过程,如凝结蒸发、碰并、自动转化、核化繁生和融化冻结等。模式中的微物理特征参数包括各水成物的比质量 $Q_x$ 和冰晶、雪、霰、雨滴的比数浓度 $N_x$ ,其中 $x$ 代表不同水成物。根据DeMott的实验结果<sup>[43]</sup>,碘化银催化模式是在三维对流云模式中基于增加了碘化银催化过程,考虑了碘化银催化剂气溶胶在不同环境条件下的凝华( $F_{\text{dep}}$ )、凝结冻结( $F_{\text{cdf}}$ )、接触冻结( $F_{\text{ctf}}$ )和浸没冻结( $F_{\text{imf}}$ )4种核化机制,增加了碘化银气溶胶粒子( $N_{\text{aer}}$ )和包含在云水中的碘化银粒子( $N_{\text{aim}}$ )2个预报量,并考虑了碘化银气溶胶粒子的核化过程对水汽( $Q_v$ )、云水( $Q_c$ )、冰晶量和数浓度( $Q_i, N_i$ )的作用<sup>[11]</sup>。模式具备碘化银类催化剂的模拟能力,能用于研究碘化银类催化剂对降水过程的影响。

类似的,盐粉催化模式在三维对流云模式中,增加盐溶滴的比质量 $Q_n$ 和比数浓度 $N_n$ 两个变量<sup>[32]</sup>,考虑了盐溶滴和云中水成物的相互作用,包括盐溶滴与云滴、冰晶、霰、雨滴、冰雹的碰并,在过饱和和云中的凝结增长,在云外蒸发,在低温区冻结成霰8种微物理过程,可模拟暖云催化过程。盐粉单粒的凝结增长方程为

$$r \frac{dr}{dt} = \frac{\left( \frac{3iM_{\text{salt}}}{4\pi\rho_L r^3} \frac{M}{M_s} \right) D\rho q_s \frac{1}{\rho_L}}{\left[ 1 + \frac{D\rho q_s L F_1}{K_1 T F_2} \left( \frac{L}{RT} - 1 \right) \right]} \times F_1 + \frac{s D\rho q_s \frac{1}{\rho_L}}{1 + \frac{D\rho q_s L F_1}{K_1 T F_2} \left( \frac{L}{RT} - 1 \right)} \times F_1. \quad (1)$$

式(1)中,  $r$  为盐溶滴半径,  $R$  为气体常数,  $L$  为凝结潜热,  $s$  为云中过饱和度;  $i$  为范霍夫数, 对盐粉取  $i=2.5$ ,  $M_{\text{salt}}$  为单粒干盐的质量,  $M$  和  $M_s$  为水和盐的分子量, 分别是 18 和 58.5,  $q_s$  为饱和比湿;  $D$  为水汽扩散系数;  $K_1$  为空气热导系数;  $F_1, F_2$  为吹风系数, 它们是滴半径的函数;  $\rho$  为空气密度,  $\rho_L$  为液滴密度。

由于凝结过程初期增长很快, 随后近似地随滴半径 5 次方的增长而迅速减慢, 将上式简化为

$$r \frac{dr}{dr} = 0.18A \times \frac{M_{\text{salt}}}{r^3} \times F_1 + sA \times \frac{1}{\rho_L} \times F_1. \quad (2)$$

式(2)中,

$$A = D\rho q_s \left[ 1 + \frac{D\rho q_s L}{K_1 T} \left( \frac{L}{RT} - 1 \right) \right]^{-1}, \quad (3)$$

$A$  是温度的函数。将凝结增长分成两部分:  $r \frac{dr}{dt} = 0.18A \times \frac{M_{\text{salt}}}{r^3} \times F_1$  和  $r \frac{dr}{dt} = sA \times \frac{1}{\rho_L} \times F_1$ , 前者为盐溶液的增长, 后者为水滴的增长。

由于模式中仅考虑较大的盐粉粒子, 一般认为盐核在云中吸湿增长直径可增加 3~4 倍<sup>[25]</sup>, 同时盐溶滴通过与云滴的碰并而较快增长, 认为催化后的盐溶滴可形成雨胚, 因此, 本文考虑盐溶滴冻结后形成为霰粒子<sup>[32]</sup>。

将盐粉催化和碘化银催化两个催化模块进行衔接和耦合, 形成了碘化银盐粉对流云催化模式, 使模式具备同时开展吸水性催化和碘化银催化的能力。模式中对催化剂播撒后进行简化处理, 假定催化剂在网格内均匀分布。假定水平扩散速率为  $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 则从催化位置扩散到 1.2 km 的网格需要 10 min。

2016 年 9 月 1 日 08:00(北京时, 下同)至 2 日 08:00, 受高空槽东移和局地混合云系统影响, 浙江南部地区出现中到大雨, 局部暴雨。利用三维对流云盐粉-碘化银催化模式, 以 2016 年 9 月 1 日 08:00 衢州探空作为初始场, 加入温度和湿度扰动启动模式, 分别进行盐粉催化、碘化银催化和盐粉-碘化银联合催化模拟试验。模式的水平分辨率  $1.2 \text{ km} \times 1.2 \text{ km}$ , 垂直分辨率 0.7 km, 格点数为  $80 \times 80 \times 30$ , 积分步长为 2 s, 模拟时长为 90 min。

9 月 1 日实况雷达回波显示, 浙江南部地区大范围层状云回波中镶嵌着 30 dBZ 以上对流单体, 这些对流单体自西向东移动不断生消演变, 大多生命

史约 2 h, 对流单体水平尺度 10~30 km, 垂直较深厚, 达 12~14 km。模式模拟第 30 分钟云发展深厚处回波结构见图 1, 水平尺度约为 20 km, 高度接近 12 km, 强回波位于 5 km 以下, 模拟的回波强度比实况偏强。

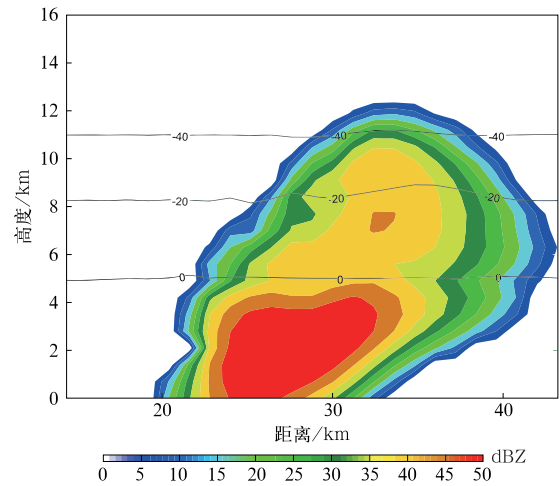


图 1 2016 年 9 月 1 日模拟回波垂直剖面图 (黑线表示温度, 单位:  $^{\circ}\text{C}$ )

Fig. 1 Vertical section of simulated echo on 1 Sep 2016 (black line denotes temperature, unit:  $^{\circ}\text{C}$ )

图 2 为模拟第 15 分钟和第 40 分钟两个时刻的流场和水成物的垂直剖面。可以看到, 第 15 分钟空中 2~8 km 高度已出现雨水, 高值中心位于 5 km 处, 最大值约为  $2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。冰晶粒子主要分布在 5~9 km 高度, 含量很低, 量级约为  $10^{-5} \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 此时霰粒子非常少。第 40 分钟时已出现降水, 此时冰晶粒子的高值中心高于 12 km 的高度, 最大值约为  $1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。霰粒子高值中心出现在 9~10 km, 雨水主要分布在 6 km 以下, 最大比质量超过  $2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。从模拟的雨水源项变化可以看到, 雨水最先以云雨自动转化(Acr)生成(图 3a), 但数值较小, 第 15 分钟的速率约为  $0.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ , 随后迅速减弱, 持续时间不足 10 min; 云水雨水碰并(Ccr)主要发生在模拟过程的第 20~30 分钟, 碰并速率超过  $1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ , 此时雨滴长大, 但降雨量较小, 30 min 后霰融化成雨水(Mgr)的过程速率逐渐达到  $0.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ , 并在第 40 分钟时增长到  $1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ , 同时降雨量迅速增加(图 3b), 霰融化成雨水过程成为降雨的主要源项。

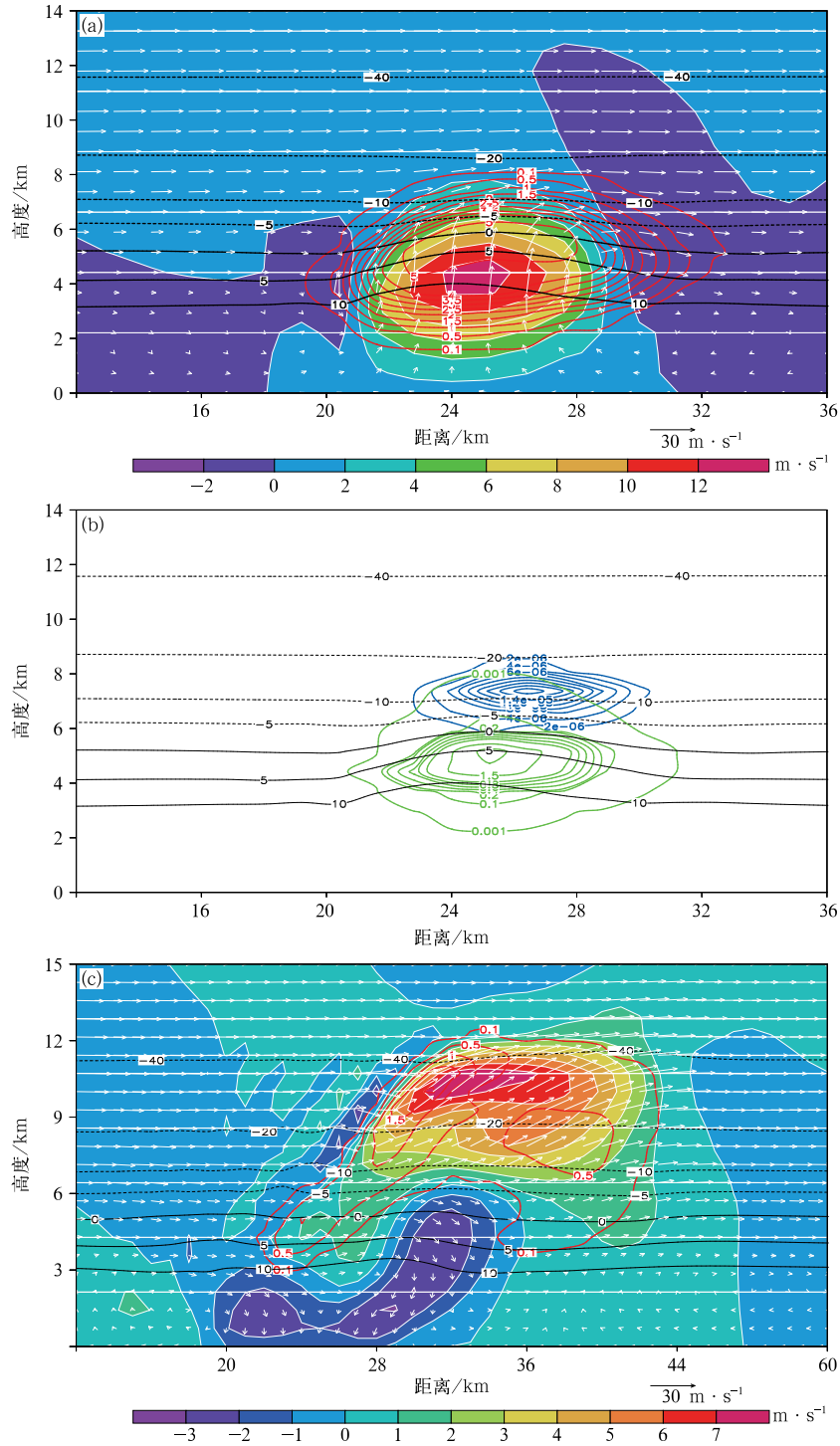
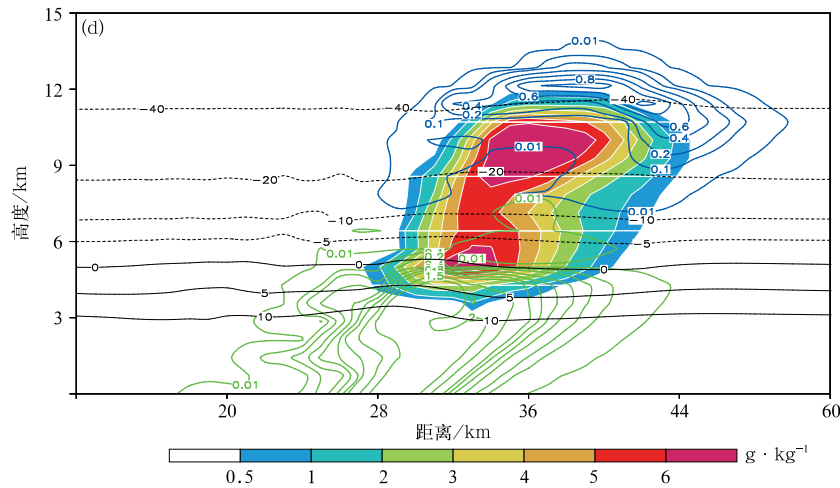


图2 模拟的流场、温度和云中水成物垂直分布 (a)模拟第15分钟的云水(红线,单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )、流场(白色箭头)、垂直速度(填色)、温度(黑线,单位: $^{\circ}\text{C}$ ), (b)模拟第15 min的冰晶(蓝线,单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )、雨水(绿线,单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )、温度(黑线,单位: $^{\circ}\text{C}$ ), (c)模拟第40分钟的云水(红线,单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )、流场(白色箭头)、垂直速度(填色)、温度(黑线,单位: $^{\circ}\text{C}$ ), (d)模拟第40分钟冰晶(蓝线,单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )、雨水(绿线,单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )、霰(填色)、温度(黑线,单位: $^{\circ}\text{C}$ )

Fig. 2 Vertical subsections of simulated vector, temperature and water substances (a) cloud water content (red line, unit:  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), vector (white arrow), vertical speed (the shaded), temperature (black line, unit:  $^{\circ}\text{C}$ ) at the 15th minute, (b) ice (the blue line, unit:  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), rain water (green line, unit:  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), temperature (black line, unit:  $^{\circ}\text{C}$ ) at the 15th minute, (c) cloud water content (red line, unit:  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), vector (white arrow), vertical speed (the shaded), temperature (black line, unit:  $^{\circ}\text{C}$ ) at the 40th minute, (d) ice (blue line, unit:  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), rain water (green line, unit:  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), graupel (the shaded), temperature (black line, unit:  $^{\circ}\text{C}$ ) at the 40th minute



续图 2

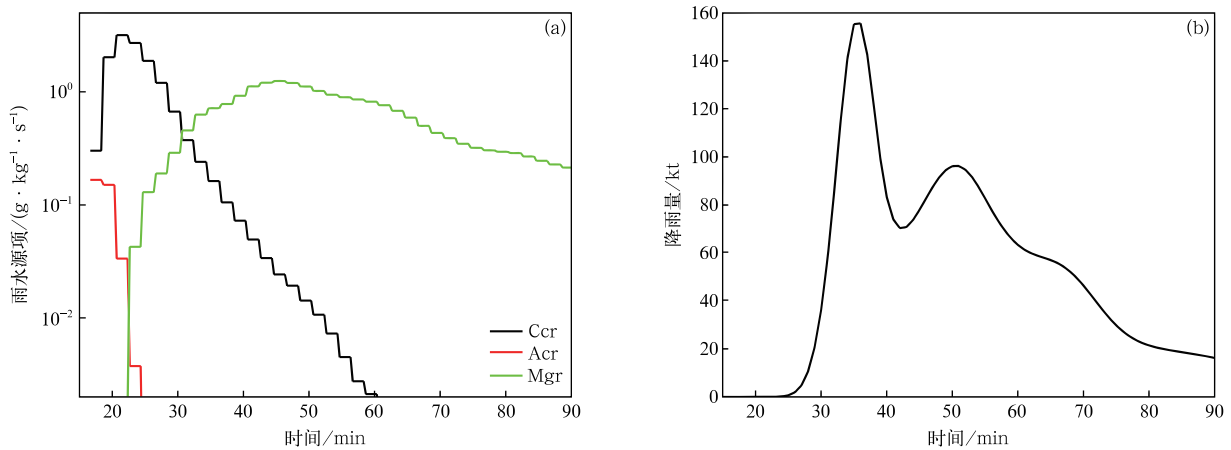


图 3 雨水的源项(a)和降雨量(b)随时间分布

Fig. 3 Time series of rainwater source terms(a) and precipitation(b)

## 2 盐粉催化模拟结果

利用三维对流云盐粉催化模式,在催化剂总量相同的情况下,采用粒径为  $8\ \mu\text{m}$ ,  $15\ \mu\text{m}$  和  $30\ \mu\text{m}$  3 种盐粉,相应的催化剂量分别为  $66/\text{L}$ ,  $10/\text{L}$  和  $1.25/\text{L}$ ,与 10 倍催化剂量  $660/\text{L}$ ,  $100/\text{L}$  和  $12.5/\text{L}$  的催化效果对比,研究粒子大小对降雨的影响。模拟的第 12 分钟进行 3 种粒径盐粉催化,催化高度为  $2800\sim 4900\ \text{m}$ (图 4a),催化水平范围为  $7.2\ \text{km}\times 7.2\ \text{km}$ 。结果表明:这 3 种盐粉粒子,均能改变降雨,总体为降雨先增加,随后出现减少。 $8\ \mu\text{m}$  和  $15\ \mu\text{m}$  粒径在 90 min 的模拟时段内总催化效果为增雨,但增雨率均不足 1%。在总催化剂量相同的情况下, $30\ \mu\text{m}$  粒径盐粉的催化效果远远高于另外

2 种粒径盐粉的催化效果,当  $30\ \mu\text{m}$  盐粉剂量为  $1.25/\text{L}$  时,在第 22~52 分钟表现为增雨效果,第 52 min 最大增雨量为  $130.1\ \text{kt}$ ,增雨率达到 8.7%,第 74 分钟出现  $112.1\ \text{kt}$  的最大减雨量,减雨率为 4.3%;当盐粉剂量从  $1.25/\text{L}$  增加为  $12.5/\text{L}$  时增雨效果明显增加,最大增雨量为  $458\ \text{kt}$ ,增雨率达到 15.7%。

为了解盐粉催化后的分布规律,图 5 为模拟第 32 分钟, $30\ \mu\text{m}$  粒径盐粉催化后 20 min 的盐溶液及其他水成物的分布。盐溶液主要分布在催化高度附近及其下方  $1\sim 5\ \text{km}$  的范围,并有少量的盐溶液出现在低于  $0^\circ\text{C}$  的区域。盐溶液在增长和消耗过程中,催化的水平范围从  $7.2\ \text{km}$  扩大到  $15\ \text{km}$ ,此时盐溶液最高比含量达到  $0.3\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。对比发现,大粒径盐粉催化的盐溶液比含量高于其他小粒径盐



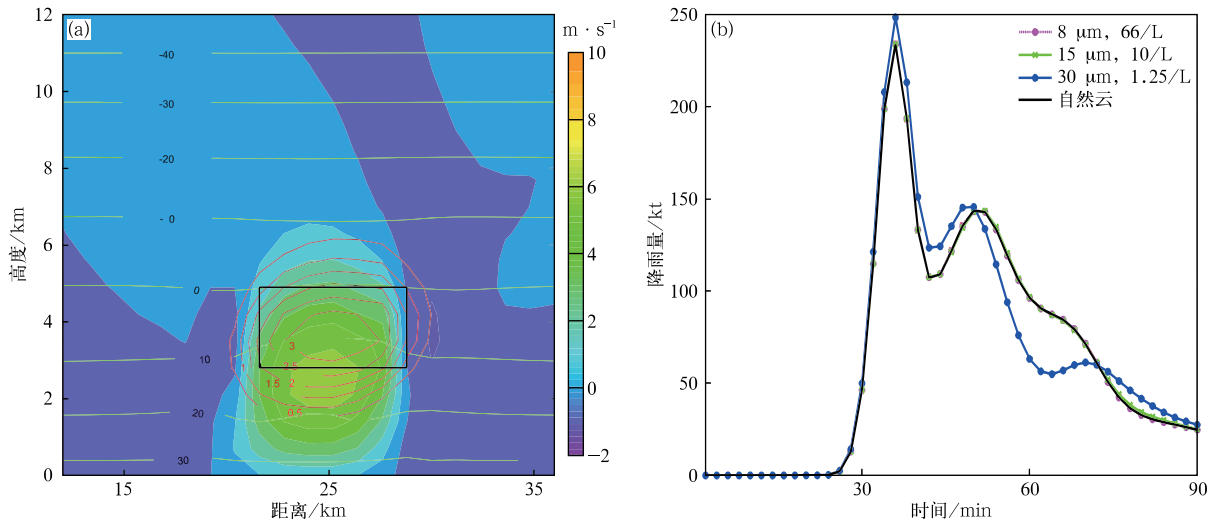


图4 催化部位和拟降水分布  
 (a)模拟区域(黑色方框)和模拟云水(红线,单位: $g \cdot kg^{-1}$ )、垂直速度(填色)、温度(绿线,单位: $^{\circ}C$ )分布,  
 (b)不同盐粉粒径和小催化剂量下2 min降雨随时间分布,  
 (c)不同盐粉粒径和大催化剂量下2 min降雨随时间分布  
 Fig. 4 Seeding location and precipitation distribution  
 (a) seeding area(black box) and subsections of simulated cloud water(red line,unit: $g \cdot kg^{-1}$ ), vertical speed (the shaded), temperature(green line, unit: $^{\circ}C$ ),  
 (b)time series of precipitation within 2 min with different salt particle size and small seeding rates,  
 (c)time series of precipitation within 2 min with different salt particle size and big seeding rates

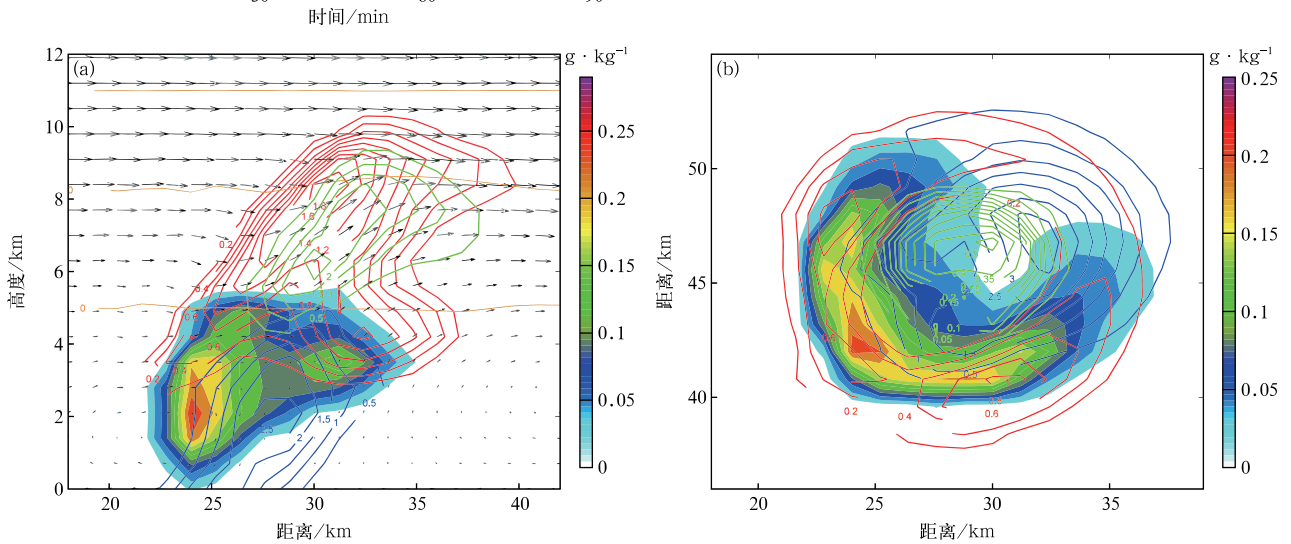
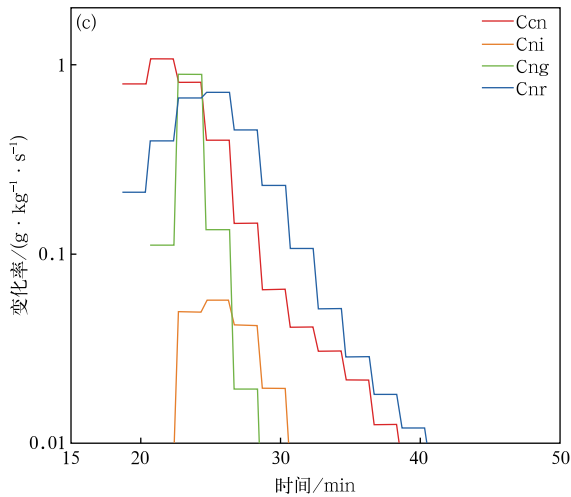


图5 模拟第32分钟时水成物、盐溶滴分布和主要微物理过程 (a)模拟云水(红线,单位: $g \cdot kg^{-1}$ )、雨水(蓝线,单位: $g \cdot kg^{-1}$ )、霰(绿线,单位: $g \cdot kg^{-1}$ )、盐溶滴(填色)垂直剖面,(b)模拟云水(红线,单位: $g \cdot kg^{-1}$ )、雨水(蓝线,单位: $g \cdot kg^{-1}$ )、霰(绿线,单位: $g \cdot kg^{-1}$ )、盐溶滴(填色)水平分布,(c)盐粉与其他水成物之间的微物理过程随时间变化  
 Fig. 5 Subsection of simulated water substances,salt resolved water and main microphysical processes at the 32nd minute  
 (a) the vertical section of simulated cloud water(red line,unit: $g \cdot kg^{-1}$ ), rainwater(blue line,unit: $g \cdot kg^{-1}$ ), graupel (green line,unit: $g \cdot kg^{-1}$ ), salt resolved water(the shaded),(b) the horizontal distribution of simulated cloud water (red line,unit: $g \cdot kg^{-1}$ ),rainwater(blue line,unit: $g \cdot kg^{-1}$ ), graupel(green line,unit: $g \cdot kg^{-1}$ ), salt resolved water (the shaded), (c)time series of microphysical processes between salt resolved drops and other water substances



续图 5

粉催化后的盐溶滴比含量。

在盐溶滴的高度上有大量雨水和云水，盐溶滴与云水发生碰并增长，并发生与雨水的碰并、与冰晶和霰粒子的碰冻过程。图 5c 为盐溶滴与其他水成物碰并过程的时间演变，在催化后的短时间内，盐溶滴的源项除了瞬间完成的凝结过程外，还包括与云滴碰并增长(Ccn)过程，盐溶滴的汇项包括与雨滴碰并(Cnr)过程、与霰的碰冻(Cng)过程和与冰晶的碰冻(Cni)过程。一部分盐溶滴与云滴通过碰并增长，该过程大约在催化后 10 min 出现最大值，此时盐溶滴的最大值达到 $2.7 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，随后由于其汇项

的增长，盐溶滴比含量逐渐减少。盐溶滴与冰晶碰并(Cni)过程较小，盐溶滴与霰碰并过程(Cng)时间较短。部分盐溶滴与雨水碰并不断被消耗，使雨滴长大，增加降雨量，该过程在第 25 分钟前后达到最大值，随后逐渐减少。盐溶滴的微物理过程在催化后 15 min 快速减小，标志着盐溶滴绝大部分被雨水和霰碰并消耗，或直接降落到地面。模拟 40 min 后，盐溶滴的微物理过程量仅为峰值的 1%，第 46 分钟云中盐溶滴含量仅为  $0.02 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

$30 \mu\text{m}$  粒径、 $12.5/\text{L}$  催化剂量的盐粉催化试验中，设计 2100~4200 m(区域 1)、2800~4900 m(区域 2)和 3500~5600 m(区域 3)3 个催化高度(图 6)，以研究不同高度的催化效果。试验表明：在上升气流区进行催化时，选择云水含量高值区的下方区域进行催化，即区域 1 催化，具有较好的催化效果，这是由于上升气流可将盐粉带入上方云水含量的高值区，通过云水碰并增长过程，促使盐溶滴增长，从而产生比较好的催化效果。区域 1 催化方案，在 90 min 模拟时段内始终保持增雨的效果，最大增雨量达到 518.9 kt，增雨率为 17.8%。区域 3 的催化效果较差，出现减雨效果的时间段最长，增雨量为 246.0 kt，仅为区域 1 增雨量的一半。以下盐粉催化试验都在区域 1 进行催化。

由于降水粒子出现后天气雷达才有回波产生，依靠雷达指挥的外场催化试验才能开展，所以设计

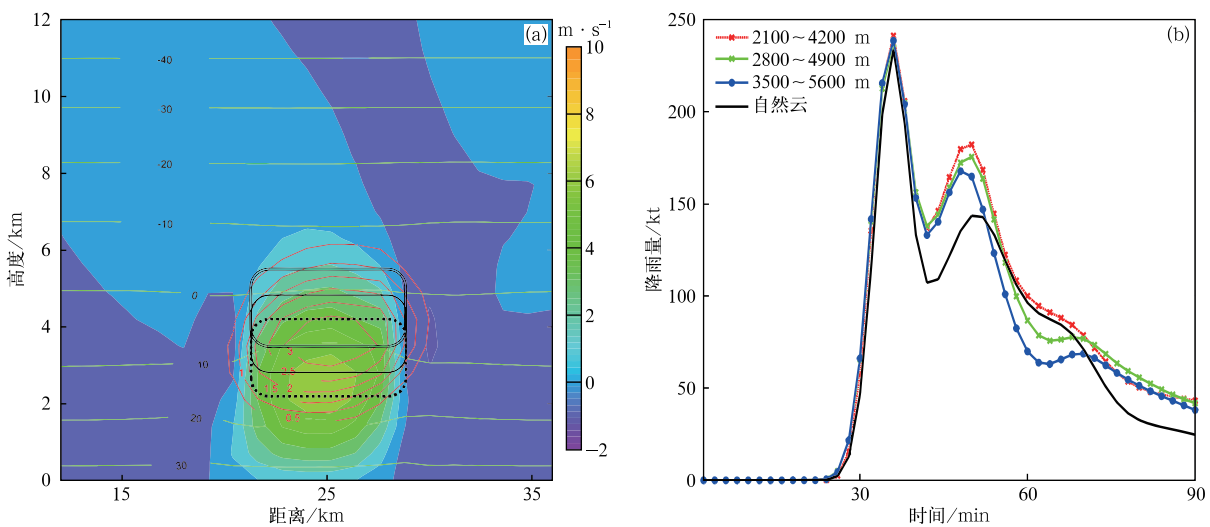


图 6 催化部位和模拟降雨分布 (a)催化区域(黑色方框)和模拟云水(红线,单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )、垂直速度(填色)、温度(绿线,单位: $^{\circ}\text{C}$ )分布,(b)不同催化高度下 2 min 降雨量随时间分布

Fig. 6 Seeding location and precipitation distribution (a)seeding area(black box) and subsections of simulated cloud water(red line,unit: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), vertical speed(the shaded),temperature( $^{\circ}\text{C}$ ), (b)time series of precipitation within 2 min at different seeding level(unit:kt)

在降水粒子出现后的不同时间进行  $30\ \mu\text{m}$  粒径和  $12.5/\text{L}$  催化剂量的盐粉催化试验,以研究不同催化时间的催化效果,包括霰粒子和雨滴出现后,降雨开始前的不同时段,第 12 分钟、第 14 分钟、第 16 分钟、第 18 分钟和第 20 分钟。区域内 2 min 累积降雨量分布表明:催化时间对催化效果的影响非常明显(图 7),第 12 分钟开始催化,有明显的增雨效果,增雨率可达 17.8%,随着时间的后延,催化效果逐渐变小,第 20 分钟开始催化,90 min 的增雨率仅为 1%。总的来说,降水粒子形成后,催化开始得越早,催化效果越好。

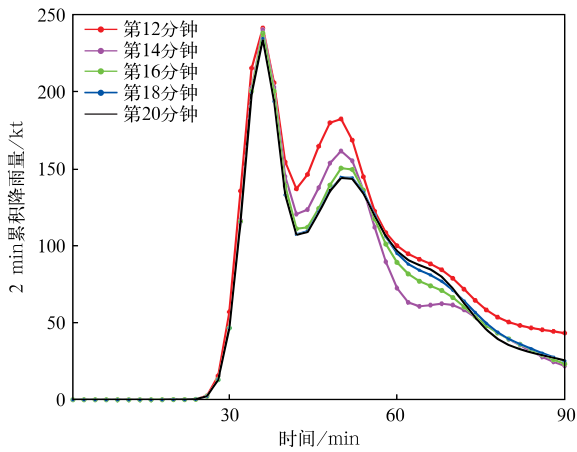


图 7 不同催化开始时间 2 min 累积降雨量随时间变化  
Fig. 7 Precipitation within 2 min with different seeding start time(unit:kt)

盐粉催化试验表明剂量、粒径、部位和开始时间不同都会导致不同的催化效果。在降雨粒子开始出现的第 12 分钟,  $2100\sim 4200\ \text{m}$  高度云水含量丰富的暖区,进行  $30\ \mu\text{m}$  粒径和  $12.5/\text{L}$  催化剂量,连续 2 次催化的方案,可取得较好的增雨效果。催化后动力场发生变化(图略),一方面由于盐溶滴的下落会减弱上升气流,催化后盐粉的凝结过程会导致凝结潜热释放,使云内小范围内上升气流增强。催化后 6 min 云内上升气流比自然云增加  $0.1\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  左右,模拟到第 28 分钟时,在 7 km 高度附近催化云的垂直速度可以比自然云大  $1.8\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,随后很快减弱。

### 3 碘化银催化模拟结果

利用三维对流云碘化银催化模式,对不同催化剂量进行试验,对比不同催化方案对降雨的影响。由于过冷云水分布高度较低,催化选取  $5600\sim 7000\ \text{m}$  高度,  $-12\sim -4\ ^\circ\text{C}$  的冷区进行。与盐粉催化一致,在第 12 分钟开始催化,共进行 3 次,时间间隔为 2 min,水平范围为  $7.2\ \text{km}\times 7.2\ \text{km}$ (图 8a),催化剂量分别为  $1/\text{L}$ ,  $10/\text{L}$ ,  $100/\text{L}$  和  $1000/\text{L}$ ,催化范围内有  $0.5\sim 1\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  的过冷水。模拟发现当催化剂量为  $1/\text{L}$  和  $10/\text{L}$  时,催化后降雨变化不明显。催化剂量为  $100/\text{L}$  和  $1000/\text{L}$  时催化效果为减雨,且碘化银催化剂量越大减雨效果越明显(图 8b)。

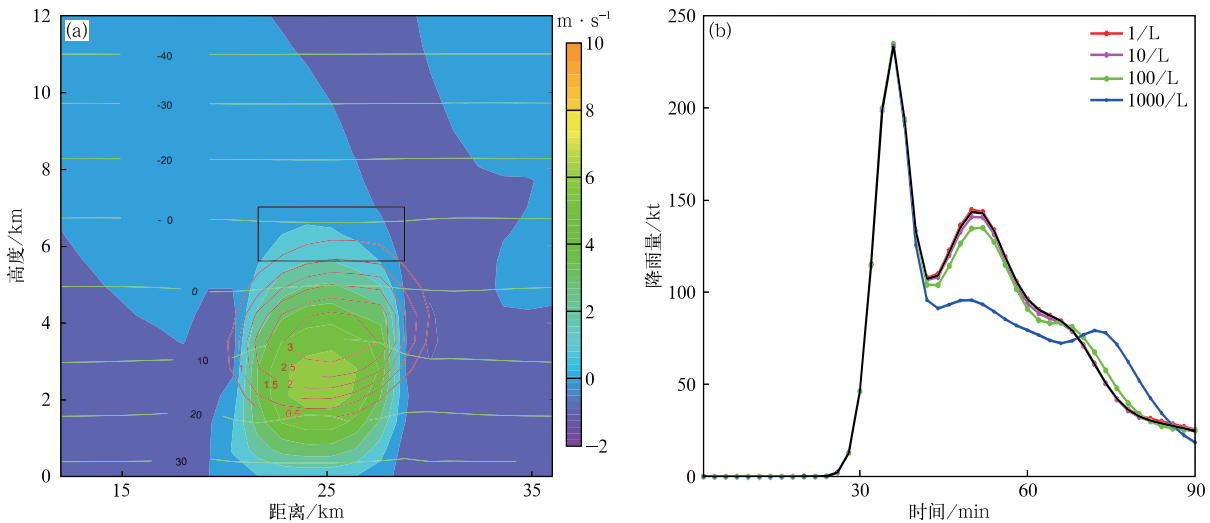


图 8 催化部位和模拟降雨分布 (a)碘化银催化区域(黑色方框)和模拟云水(红线,单位: $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )、垂直速度(填色)、温度(绿线,单位: $^\circ\text{C}$ ), (b)不同催化剂量下 2 min 降雨量随时间分布  
Fig. 8 Seeding location and precipitation distribution (a)seeding area(black box) and subsections of simulated cloud water(red line,unit: $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ), vertical speed(the shaded), temperature(green line,unit: $^\circ\text{C}$ ), (b)time series of precipitation within 2 min with different seeding rates



1000/L 剂量下自然云和催化云水成物总量随时间分布情况可知,催化后的水成物与非催化云有较大差别,且变化特征不同(图 9)。在所有水成物中霰总量最多,催化后的变化也最显著。冰晶总量和云水的总量都不到霰总量的 50%,催化后的变化幅度较小。催化开始到催化结束初期,尽管核化形成了大量冰晶,但由于初始核化的冰晶质量较小,冰晶总量仅出现小幅增加,同时大量的过冷水云水被消耗,霰粒子持续增加,并维持到模拟结束。雨水总量在催化后减少,直至模拟第 50 分钟,雨水增加,尽管降雨强度超出了非催化云,但由于此时降雨很弱,总体结果表现为减雨。

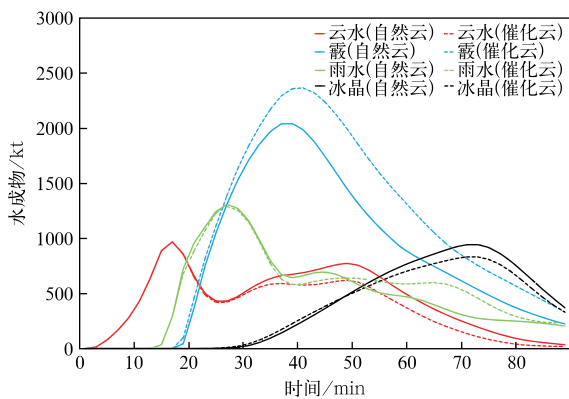


图 9 自然云和催化云的云中水成物随时间分布  
Fig. 9 Time series of unseeded and seeded water substances

与盐粉催化方案类似,降雨开始前(第 12 分钟、第 16 分钟、第 20 分钟、第 24 分钟)和降雨开始后(第 28 分钟、第 32 分钟),在  $-12 \sim -4^{\circ}\text{C}$  冷区高度进行碘化银催化,催化剂量为 100/L,都表现出明显的先减雨后增雨的催化效果,在第 28 分钟前进行催化,前期的减雨效果与后期的增雨效果相当;第 24 分钟进行的催化增雨效果最明显,第 90 分钟时总体表现为增雨效果,增雨量达 40.0 kt。在第 28 分钟后开始催化,前期的减雨效果明显大于后期的增雨效果,整个模拟时段内催化效果表现为减雨。

#### 4 盐粉和碘化银联合催化模拟结果

进行盐粉和碘化银联合催化,分析不同联合催化方案对降雨的影响(图 10)。在模拟的第 12 分钟降雨初期进行盐粉和碘化银联合催化,其中暖区选择粗径  $30 \mu\text{m}$ ,剂量 1.25/L 和粗径  $30 \mu\text{m}$ ,剂量 12.5/L 两种盐粉催化方案,催化 2 次,催化高度为 2100~4200 m;冷区选择 100/L,1000/L 剂量在 5600~7000 m 高度(图 8a)进行碘化银催化,催化 3 次。结果表明:通过改变盐粉或碘化银催化剂量会影响增减雨催化效果的出现时间及增减雨的强弱。在模拟第 40 分钟,催化后第 1 个降雨峰值附近,所有的催化方案降雨都增加,随后的降雨时段,不同的催化方案,呈现不同的效果,差异非常明显。

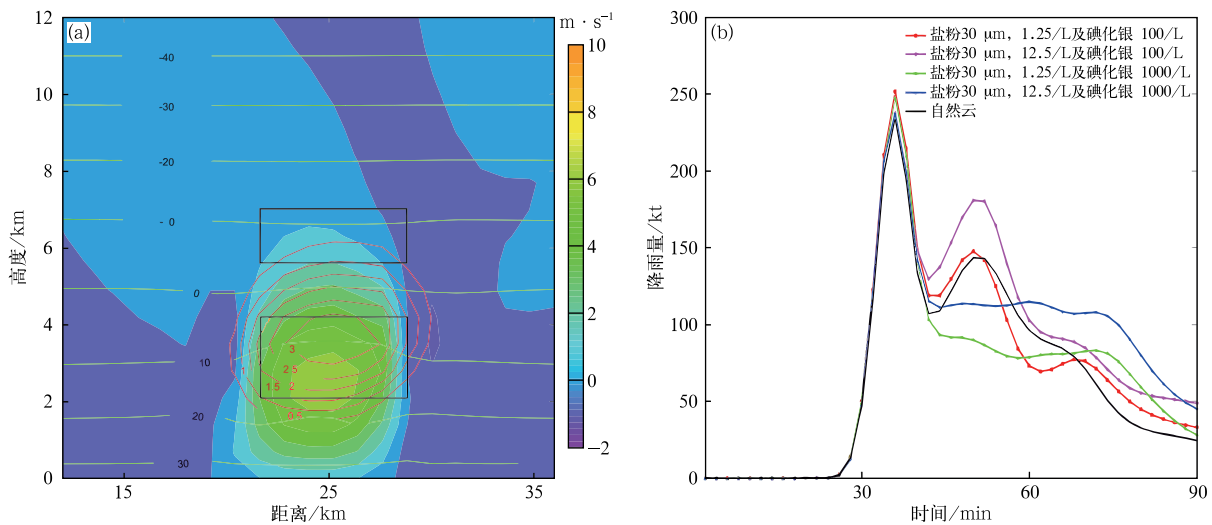


图 10 催化部位和模拟降雨分布 (a)催化区域(黑色方框)和模拟云水(红线,单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )、垂直速度(填色)、温度(绿线,单位: $^{\circ}\text{C}$ ), (b)不同催化方案下 2 min 降雨量随时间分布  
Fig. 10 Seeding location and precipitation distribution (a)seeding area(black box) and subsections of simulated cloud water(red line,unit: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),vertical speed(the shaded),temperature (green line,unit: $^{\circ}\text{C}$ ), (b)time series of rainfall within 2 min with different seeding schemes

当采用小剂量盐粉-碘化银联合催化,即盐粉  $30\ \mu\text{m}$ ,  $1.25/\text{L}$  和碘化银  $100/\text{L}$  时,增雨效果不明显。但提高盐粉催化剂量到  $12.5/\text{L}$  后,  $2\ \text{min}$  内累积降雨量一直大于非催化云的降雨量,增雨效果明显,最大增雨量为  $559\ \text{kt}$ ,总降雨量增加  $19\%$ 。在此基础上,若增加碘化银催化剂量到  $1000/\text{L}$ ,则由于前期碘化银减雨效果更为显著,联合催化在第  $50$  分钟时表现为减雨,随后碘化银催化的增雨效果起主导作用,使模拟结果表现为降雨持续大幅增加,增雨率  $16.9\%$ 。

由于盐粉催化表现为降雨先增加后减少,而碘化银催化则降雨先减少后增加,造成两者的催化效果在时间上不同步,因此,在联合催化中,如增加盐粉催化剂量,则前期表现为降雨先增加后减少;当碘化银剂量增加时,前期可能表现为降雨先减少后增加。两者的催化剂量不同,将导致催化效果不同。所以,当吸湿性催化剂的大粒子数不足,会削弱盐粉增加降水的幅度,使催化效果不理想。当吸湿性大粒子数增多,增雨效果较好。

## 5 结 论

利用三维对流云盐粉催化和碘化银催化模式对  $2016$  年  $9$  月  $1$  日浙江南部一次对流云降水过程进行了吸湿性催化,碘化银催化及两者的联合催化模拟试验,对比研究催化时机、催化剂量、催化高度等因素对降雨的影响,并分析吸湿性催化剂和碘化银的不同配置对催化效果的影响。结果表明:

1) 盐粉催化试验,剂量、粒径、部位、时间均会影响催化效果。在降雨粒子开始出现的第  $12$  分钟,利用  $30\ \mu\text{m}$  粒径和  $12.5/\text{L}$  催化剂量,在云水含量高值区下方的上升气流区进行催化,可以取得较好的增雨效果。盐粉通过碰并云水增长,并被雨水碰并和霰碰冻而减少。

2)  $100/\text{L}$  和  $1000/\text{L}$  碘化银催化表现为降雨先减少后增加,导致增雨的总体效果不理想,碘化银催化剂量越大减雨幅度越大。

3) 盐粉和碘化银联合催化,由于盐粉催化表现为降雨先增加后减少,而碘化银催化则降水先减少后增加,使用不同吸湿性催化剂和碘化银催化剂量配置会导致催化效果不同。当粒径为  $30\ \mu\text{m}$  剂量为  $12.5/\text{L}$  的盐粉联合  $100/\text{L}$  碘化银在冷区催化,可以取得  $19\%$  的增雨效果。

由于模式分辨率较低,不能模拟碘化银和盐粉播入云后的扩散,简单认为播撒的网格点内均匀分布,这与实况不符,应采用高分辨率的模式(如大涡模式),水平格距设置为  $100\ \text{m}$ ,同时需考虑催化剂的扩散过程。

由于本文的吸湿性催化为单一粒径值,今后将开展多粒径的催化模拟,以取得更合理的结果。

## 参 考 文 献

- [1] 李大山. 人工影响天气现状与展望. 北京: 气象出版社, 2002.
- [2] 郑国光, 郭学良. 人工影响天气科学技术现状及发展趋势. 中国工程科学, 2012, 14(9): 20-27.
- [3] 苏正军, 郑国光, 鄯大雄. 吸湿性物质催化云雨的研究进展. 高原气象, 2009, 28(1): 227-232.
- [4] Koenig L R, Murray F W. Theoretical experiments on cumulus dynamics. *J Atmos Sci*, 1983, 40: 1241-1256.
- [5] Levy G, Cotton W R. A numerical investigation of mechanisms linking glaciation of the ice-phase to the boundary layer. *J Climate Appl Meteor*, 1984, 23: 1505-1519.
- [6] Xue L L, Hashimoto A, Murakami M, et al. Implementation of a silver iodide cloud-seeding parameterization in WRF. Part I: Model description and idealized 2D sensitivity tests. *J Appl Meteor Climatol*, 2013, 52: 1433-1457, DOI: 10.1175/JAMC-D-12-0148.1.
- [7] Xue L L, Tessendorf S A, Nelson E, et al. Implementation of a silver iodide cloud-seeding parameterization in WRF. Part II: 3D simulations of actual seeding events and sensitivity tests. *J Appl Meteor Climatol*, 2013, 52: 1458-1476, DOI: 10.1175/JAMC-D-12-0149.1.
- [8] 何观芳, 胡志晋. 人工影响积雨云机制的数值研究. 应用气象学报, 1991, 2(1): 32-39.
- [9] 洪延超. 三维冰雹云催化数值模式. 气象学报, 1998, 56(6): 641-653.
- [10] 洪延超. 冰雹形成机制和催化防雹机制研究. 气象学报, 1999, 57(1): 30-44.
- [11] 刘诗军, 胡志晋, 游来光. 碘化银核化过程的数值模拟研究. 气象学报, 2005, 63(1): 30-40.
- [12] 于达维, 何观芳, 周勇, 等. 三维对流云催化模式及其外场试用. 应用气象学报, 2001, 12(增刊 D): 122-132.
- [13] 楼小凤, 孙晶, 史月琴, 等. 减弱对流云降水的 AgI 催化原理的数值模拟研究. 气象学报, 2014, 72(4): 782-793.
- [14] 楼小凤, 师宇, 卢广献. 一次降雹过程的 AgI 系列催化模拟研究. 应用气象学报, 2016, 27(2): 129-139.
- [15] Guo X L, Zheng G G, Jin D Z. A numerical comparison study of cloud seeding by silver iodide and liquid carbon dioxide. *Atmos Res*, 2006, 79: 183-226.
- [16] Guo X L, Fu D H, Zheng G G. Modeling study on optimal convective cloud seeding in rain augmentation. *J Korean Meteor Soc*, 2007, 43: 273-284.

- [17] 史月琴,楼小凤,邓雪娇,等. 华南冷锋云系的人工引晶催化数值试验. *大气科学*,2008,32(6):1256-1275.
- [18] 孙晶,史月琴,楼小凤,等. 人工缓减梅雨锋暴雨的数值试验. *大气科学*,2010,34(2):337-350.
- [19] 方春刚,郭学良,王盘兴. 碘化银播撒对云和降水影响的中尺度数值模拟研究. *大气科学*,2009,33(3):621-633.
- [20] 何晖,金华,李宏宇,等. 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. *气候与环境研究*,2012,17(1):46-58.
- [21] 何晖,高茜,李宏宇. 北京层状云人工增雨数值模拟试验和机理研究. *大气科学*,2013,37(4):905-922.
- [22] 刘卫国,陶玥,党娟,等. 2014年春季华北两次降水过程的人工增雨催化数值模拟研究. *大气科学*,2016,40(4):669-688.
- [23] Rosenfeld D, Axisa D, Woodley W L, et al. A quest for effective hygroscopic cloud seeding. *J Appl Meteorol Clim*, 2010, 49:1548-1562.
- [24] 顾震潮,陈炎涓,徐乃璋,等. 南岳云雾降水物理观测(1960年3—8月)结果的初步分析. 我国云雾降水微物理特征问题. 北京:科学出版社,1962:2-21.
- [25] 马培民,孙奕敏,赵瑞华,等. 1963年夏季湖南盐粉催化浓积云降水试验效果的分析. *气象学报*,1965,35(3):280-291.
- [26] 王伟民,卢伟,黄培强,等. 几种消暖云(雾)催化剂的试验研究. *气象科学*,2000,20(3):478-486.
- [27] 党娟,苏正军,房文,等. 几种粉末型吸湿性催化剂的试验研究. *气象科技*,2017,45(2):398-404.
- [28] 姚展予. 中国气象科学研究院人工影响天气研究进展回顾. *应用气象学报*,2006,17(6):786-795.
- [29] 徐华英,郝京甫. 盐粉催化积云降水的数值模拟. *大气科学*,1983,7(4):403-410.
- [30] 胡志晋,严采繁,王玉彬. 层状暖云降雨及其催化的数值模拟. *气象学报*,1983,41(1):79-88.
- [31] 胡志晋,严采繁. 盐粉催化不同生命史的浓积云的数值模拟. *大气科学*,1985,9(1):62-72.
- [32] 楼小凤,何观芳,胡志晋,等. 三维对流云盐粉催化模式的发展和催化模拟实验. *高原气象*,2013,32(2):491-500.
- [33] 樊志超,周盛,汪玲,等. 湖南秋季积层混合云系飞机人工增雨作业方法. *应用气象学报*,2018,29(2):200-216.
- [34] 蒋年冲,吴必文,袁野,等. 江淮地区对流云人工增雨技术研究基地的可行性分析. *应用气象学报*,2003,14(增刊 I):151-155.
- [35] 胡雯,申宜运,曾光平. 南方夏季对流云人工增雨技术研究. *应用气象学报*,2005,16(3):413-416.
- [36] 曾光平,吴明林. 古田水库人工降雨效果的综合评价. *应用气象学报*,1993,4(2):154-161.
- [37] Dennis A S, Koscielski A. Results of a randomized cloud seeding experiment in South Dakota. *J Appl Meteor*, 1969, 8(4): 556-565.
- [38] 叶家东,范蓓芬,杜京朝. 人工增雨试验中的反效果问题. *应用气象学报*,1998,9(3):336-344.
- [39] Orville H D, Koop F J, Farley R D, et al. The Numerical Modeling of Ice-phase Cloud Seeding Effects in a Warm-base Cloud. *Cloud Physics and Weather Modification Research Program, WMO/TD*, 1989, 269:203-207.
- [40] 王春明,叶家东,魏绍远. 气溶胶对暖雨过程影响的数值模拟试验//第12次全云降水物理和人工影响天气科学讨论会. 中国气象学会学术会议文集,1996,79.
- [41] 胡志晋,何观芳. 积雨云微物理过程的数值模拟(一)微物理模式. *气象学报*,1987,45(4):465-484.
- [42] 邹光源. 三维准弹性对流云模式. 北京:中国气象科学研究院,1991.
- [43] DeMott P J. Quantitative descriptions of ice formation mechanisms of silver iodide type aerosols. *Atmos Res*, 1995, 38, 63-99.

## A Numerical Seeding Simulation of Convective Precipitation in Zhejiang, China

Lou Xiaofeng<sup>1)2)</sup> Fu Yu<sup>3)</sup> Sun Jing<sup>1)2)</sup>

<sup>1)</sup> (State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

<sup>2)</sup> (Key Laboratory for Cloud Physics of China Meteorological Administration, Beijing 100081)

<sup>3)</sup> (Dalian Weather Modification Office of Liaoning Province, Dalian 116001)

### Abstract

To change precipitation amount and distribution through artificial cloud seeding is one target of weather modification, especially for some important events. Cloud numerical simulations are important ways in research of weather modification activities. A 3-D convective model is used to do simulation for a convective rainfall case in Zhejiang on 1 September 2016. The 3-D convective model calculates 27 microphysical processes, which includes condensation, deposition, evaporation, collection, ice nucleation, ice multiplication, melting and freezing, auto conversion of cloud to rain, ice to graupel and graupel to hail. AgI seeding parameterization is based on cloud chamber results of ice forming processes by AgI which can be identified as deposition, contact freezing, condensation freezing and immersion freezing nucleation. Salt seeding scheme considers the micro-physical process between the salt particle and liquid and ice particles. Using the salt powder and AgI seeding scheme, a series of seeding simulations are designed with salt powder seeding, AgI seeding, and both of them, on seeding height levels, seeding rates, starting seeding times and the size of salt powder, to simulate seeding effects of warm cloud seeding, cold cloud seeding, and mixed cloud seeding schemes.

Results show that salt powder seeding is mainly manifested by seeding effects at first rain-increasing then rain-reducing. The seeding mechanism is characterized by salt-dissolved droplets growth through colliding with cloud droplets, collected by raindrops, both of which fall to ground to increase precipitation. The rain enhancement effect is better when seeding in the ascending flow region with 12.5/L of salt powder amount of 30  $\mu\text{m}$  particle size, the precipitation can be increased by 17.8%. AgI seeding is carried out, which basically shows an effect of increasing rainfall after rain reduction. The more silver iodide seeded, the greater the amount of rain reduction will be. For different seeding effects of salt powder and AgI, seeding effects are influenced by their amount of these two seeding agents. With 12.5/L of salt powder of 30  $\mu\text{m}$  particle size, along with 100/L AgI agent, the precipitation can be increased by 19%. These results can be used to guide the field seeding experiment of weather modification with hygroscopic seeding agent and glycolic seeding agent.

**Key words:** convective cloud model; salt powder seeding; AgI seeding; combined seeding