

张邢,王广河,楼小凤,等. 2013. 对流云盐粉催化的数值模拟研究. 气象, 39(8):1057-1068.

# 对流云盐粉催化的数值模拟研究<sup>\*</sup>

张 邢<sup>1,2,3</sup> 王广河<sup>1,2</sup> 楼小凤<sup>1,2</sup> 胡志晋<sup>1,2</sup>

1. 中国气象科学研究院,北京 100081

2. 中国气象科学研究院中国气象局云雾物理环境重点开放实验室,北京 100081

3. 北京市人工影响天气办公室,北京 100089

**提 要:** 利用三维对流云盐粉催化模式对一次对流云降水进行了盐粉催化模拟试验。模式中考虑了盐粉与云雨滴和冰相粒子间的相互作用。模拟结果显示,当采用 20  $\mu\text{m}$  粒径的盐粉进行单次催化时,催化效果较好,地面总雨量可增加 20%,催化次数的增多会导致降水的减少。霰融化成雨是雨滴增长的主要机制,霰碰并过冷云水是霰增长的主要机制,催化后霰融化成雨和霰碰并过冷水雨的速率均有提高。催化会引起水成物云滴、冰晶、霰和雨滴的比质量变化。霰和云滴的粒径也在催化后出现了明显的增大。催化后短时间内动力过程出现了变化。

**关键词:** 盐粉催化, 三维对流云模式, 催化模拟

**中图分类号:** P481

**文献标志码:** A

**doi:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2013.08.013

## Research on Salt-Seeding Numerical Simulations in Convective Cloud

ZHANG Xing<sup>1,2,3</sup> WANG Guanghe<sup>1,2</sup> LOU Xiaofeng<sup>1,2</sup> HU Zhijin<sup>1,2</sup>

1. Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

2. CMA Key Laboratory for Cloud Physics and Weather Modification, CAMS, Beijing 100081

3. Beijing Weather Modification Office, Beijing 100089

**Abstract:** A convective precipitation is simulated by using a 3-D convective cloud salt-seeding model. The model considers the microphysical processes between salt particles, liquid and ice particles. The simulation results indicate that seeding at a single time with seeding particle size of 20  $\mu\text{m}$  can produce a good seeding effect, which can achieve 20% precipitation enhancement. Increasing the number of seeding time causes precipitation reduction. Graupel melting into rain is the main mechanism of raindrop increasing, and graupel collecting raindrop is the main mechanism of graupel increasing. The two processes get enhanced after seeding. Seeding brings changes to mixing ratios of cloud water, ice crystal, graupel and rain. The sizes of rain and graupel gain in seeded cloud.

**Key words:** salt seeding, 3-D convective cloud model, seeding simulation

## 引 言

目前人工增雨工作在世界多个国家广泛开展,有意识人工影响降水催化可以分为两大类。第一类

为成冰剂催化,第二类催化为吸湿性催化。多年来,世界上一些国家已经开展了外场催化暖云的随机试验,并得到了人工增雨的催化效果。南非的试验中利用吸湿性焰剂产生平均尺度约 0.5  $\mu\text{m}$  的小盐粒。焰剂在云底播撒,期望播入的吸湿核与自然的

\* 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201106031、GYHY201306065)、国家自然科学基金面上项目(41075100)和(4080500341275148)共同资助

2012 年 8 月 18 日收稿; 2013 年 3 月 12 日收修定稿

第一作者:张邢,从事中尺度与人工影响天气方面的研究. Email:zhangxingyy@126.com

通信作者:王广河,主要从事云雾物理和人工影响天气技术研究. Email:wgh@cams.cma.gov.cn

云凝结核(CCN)竞争,优先长成大云滴,以拓宽云滴谱,加速碰并过程(Mather et al, 1997)。墨西哥科阿韦拉州(Coahuila)的计划试验进一步证明了这种催化暖云的方法是可行的(WMO, 2000)。泰国的试验长期使用吸湿核催化暖云,得出在 4 种化学物质(氯化钙、硝酸铵、氯化钠和尿素)中,干氯化钙催化效果最好(Silverman et al, 2000)。在我国的人工影响天气工作中,20 世纪 60 年代曾使用盐粉催化对流云,提出了大颗粒、大剂量的催化方法(顾震潮等, 1962; 顾震潮, 1980)。近年来我国也开始了吸湿性粒子的观测、吸湿性焰剂的研究和外场催化试验(马培民等, 1965; 王伟民等, 2000; Liu et al, 2011)。

对于吸湿性粒子对云降水的影响及吸湿性粒子的催化,有很多人已经做了大量的研究工作。利用包含气溶胶质量和数浓度预报的详细气溶胶清除和微物理模式(DESCAM),在背景气溶胶中包含不同气溶胶物质形成的 CCN,从而可以计算彼此间的竞争。在背景气溶胶的基础上,加入吸湿性催化剂进行催化(Flossmann et al, 1985)。混合云催化中吸湿性核可形成大滴,导致形成大量的霰粒子,同时消耗液水。大粒子催化,增加毛毛雨大小的粒子,增加了催化剂在云体中的停留时间,进而影响到整个云过程。巨核的盐粉粒子,可以增加降水,但过早诱发降水,会使降水提早消散(Caro, 2002)。吸湿性焰剂在云上催化比云下催化更有效。催化粒子比自然 CCN 大,同时可溶性更好,所以比自然 CCN 有优势(Yin et al, 2000a; 2000b)。Rosenfeld 等(2010)从催化剂对对流云中云滴大小分布(DSD)的影响和催化剂如何影响对流云降水形成过程两方面研究了吸湿性催化剂的扩散和稀释,发现吸湿性催化剂的作用主要是加速云雨自动转化过程。周秀骥(1964)提出了云滴增长的随机过程理论,表明由于湍流所引起的起伏现象以及湍流碰并对降水形成有极其重要的作用,建立了我国的暖云降水理论。

20 世纪 80 年代开始我国开展了不少暖云催化的数值模式研究工作。二维平面对称积云降水模式试验表明,盐粉催化后约半小时可出现增雨,一般采用几十微米至一百微米直径的盐粉为宜(徐华英等, 1983)。一维非定常积云分档模式结果表明,大云滴浓度在云中下层随高度加大并在云的中上部达到最大值,在云顶附近又减少(肖辉等, 1988)。云滴总浓度随高度变化不大。用一个分档模式对海洋层积云进行了研究(Zhao et al, 2004)。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水的落区、雨强变化及风场对增雨的影响(胡志晋等, 1983; 1985)。在此模式基础上,又发展了盐粉催化模式。该模式包含了盐粒的凝结增长,盐溶滴与云雨滴的碰并增长,盐溶滴与冰相粒子间的相互作用等过程(楼小凤等, 2013)。

本文利用盐粉催化模式进行个例模拟试验,并对催化结果进行了分析。本文所用的三维对流云模式是楼小凤在胡志晋对流云微物理模式和邹光源的动力学模式基础上进行了系统改进形成的(胡志晋等, 1987; 邹光源, 1991)。本文研究了在同一催化总量的前提下,不同盐粉的粒径以及催化次数对盐粉催化效果的影响,着重对催化后云的动力场和微物理量场进行详尽的分析,以研究盐粉催化后的动力和微物理响应。

## 1 系列催化模拟试验研究

本文利用在三维对流云模式的基础上发展的三维盐粉催化方案(楼小凤等, 2013),考虑了盐溶滴与云中水成物和宏观过程的相互作用,增加的微物理过程包括,盐溶滴在过饱和云中的凝结增长,盐溶滴与云滴的碰并,盐溶滴与冰晶的碰并,盐溶滴与霰的碰并,盐溶滴与雨滴的碰并,盐溶滴与冰雹碰并,盐溶滴在云外蒸发,盐溶滴在低温( $T < 273$  K)区域冻结成霰。模式增加了盐溶滴的质量  $Q_n$  和浓度  $N_n$  两个预报量,模式中考虑了水汽( $w$ )、云滴( $c$ )、雨滴( $r$ )、冰晶( $i$ )、霰( $g$ )和雹( $h$ )等水成物粒子以及凝结蒸发( $S$ )、碰并( $C$ )、自动转化( $A$ )、核化繁生( $P$ )、融化冻结( $M$ )等 27 种主要云微物理过程。在胡志晋的模式基础上增加了云霰转化过程( $A_{cg}$ )和雹霰转化过程( $A_{hg}$ ),并且计算了凝结蒸发和水汽过饱和度。2002 年 9 月 3 日青海省河南县附近有一次较强的降水过程。房文曾利用此三维对流云 AgI 催化模式对此次降水过程做了个例模拟和 AgI 催化试验,分析了利用 AgI 进行地面和空中播撒催化的有效催化方法(房文, 2004; 房文等, 2005)。本文利用盐粉催化模式对此个例进行盐粉催化模拟试验。模式初始场采用探空资料作为水平均一的理想初始场,对流启动采用湿热泡扰动方式,模式的水平格距为 1200 m,垂直格距为 700 m;水平积分范围为  $80 \times 80$ ,垂直层数取 30 层。模式采用 08:00 在青海省河南县的加密探空资料。在求出自由对流高度后,

按  $\gamma_d = -0.0095^\circ\text{C} \cdot \text{m}^{-1}$  的温度递减率订正云下各层的温度。采用的扰动中心湿度为 90%，温度扰动 1.2℃。模式中设定自然云和催化云中的云滴初始浓度均为  $3 \times 10^8$  个  $\cdot \text{kg}^{-1}$ 。盐粉通过吸湿凝结增长，其增长率随盐溶滴浓度减小（即溶滴半径增大）而迅速减小，故采用隐式格式计算。碰并增长也考虑了溶滴的大小。当溶滴长到一定大小，盐浓度很低时，即同雨滴一样计算（胡志晋等，1979）。

为了研究在同一催化剂总量的前提下，催化剂粒子粒径以及催化次数对催化效果的影响，模式中设定同一催化总量，针对不同盐粉粒径和不同催化次数的条件进行了模拟试验。本试验中，催化的最佳时间是在第 12 min，催化剂总量  $1.0 \times 10^5$  个  $\cdot \text{kg}^{-1}$ 。播撒范围为东西 40~42 格点，南北 42~44 格点，垂直 4~6 格点，尺度范围为东西方向 2400 m，南北方向 2400 m，垂直范围在 2100~3500 m 高

度范围，催化时间间隔为 2 min。系列试验结果如表 1 所示。表 1 中序列 0 为自然降水的结果，其余为催化结果。催化序列 1~6 的催化起始时间均为第 12 min。其中序列 1~3 是粒径大小为 30  $\mu\text{m}$  的盐粉的催化结果，序列 4~6 是粒径大小为 20  $\mu\text{m}$  的盐粉的催化结果。当盐粉粒径大小为 30  $\mu\text{m}$  时，随着播撒次数的增加，引起了催化时间延长，减少了增雨的强度。当盐粉粒径大小为 20  $\mu\text{m}$  时，也有近似的趋势。其中，催化序列 6 甚至出现了减雨的效果。可能由于最佳催化时刻为第 12 min，如果多次催化的首次播撒选在第 12 min，就会导致催化过程整体向后推迟，从而延误了最佳催化时机，导致降水减少。因此，催化序列 7~10 是在已有的多次播云催化试验基础上进行的改进试验，将每个多次播云催化试验中最中间的一次播撒时间定在第 12 min，以减少催化过程延迟造成的减雨效果。

表 1 青海省河南县 2002 年 9 月 3 日降雨个例自然云总降水和盐粉催化总降水和催化效果

Table 1 Seeding effect of natural and seeded clouds on 3 September 2002 in Henan County, Qinghai Province

序列	单次播撒剂量 /个 $\cdot \text{kg}^{-1}$	盐粉粒径 大小/ $\mu\text{m}$	播撒次数 /次	开始播撒 时间/min	催化间隔 /min	地面降雨 总量/kt	催化效果 /%
0			自然云			481	
1	$1.0 \times 10^5$	30	1	12	0	553	15
2	$3.3 \times 10^4$	30	3	12	2	515	7
3	$2 \times 10^4$	30	5	12	2	496	3
4	$3.375 \times 10^5$	20	1	12	0	577	20
5	$1.125 \times 10^5$	20	3	12	2	535	11
6	$6.75 \times 10^4$	20	5	12	2	450	-6
7	$3.3 \times 10^4$	30	3	10	2	522	9
8	$2 \times 10^4$	30	5	8	2	518	8
9	$1.125 \times 10^5$	20	3	10	2	531	10
10	$6.75 \times 10^4$	20	5	8	2	533	11

从改变了催化起始时间的多次播撒催化的序列 7~10 的催化效果可以看出，当多次催化的中间一次固定选在第 12 min 时，这些改进的催化模拟试验都达到了增雨的效果。将所有同一总剂量的催化效果（催化序列 1~10）进行比较，可以看出，采用 20  $\mu\text{m}$  粒径的盐粉进行一次性大剂量播撒所得到的催化效果较好。地面总雨量达到 577 kt，增雨效果为 20%（催化序列 4 的结果）。催化次数的增加，会使增雨效果变得不理想。因此，合理的催化起始时间、盐粉粒径和播撒次数，是盐粉催化取得较好增雨效果的重要因素。

为了研究催化时间对增雨效果的影响，设计了不同催化时间的敏感性试验。盐粉粒径大小为

30  $\mu\text{m}$ ，催化剂总量  $1.0 \times 10^5$  个  $\cdot \text{kg}^{-1}$ ，进行单次播撒催化，播撒范围为东西 40~42 格点，南北 42~44 格点，垂直 4~6 格点。试验结果如表 2 所示。

由表 2 中结果可以看出，单次播撒催化理想时间范围为第 12~20 min，在此时间范围内催化都能到一定的增雨效果。催化时间提前或者延迟，都会使得增雨效果不理想。

下面针对增雨效果比较好的表 1 中催化序列 4 的模拟结果进行详细分析。

## 2 雷达回波和动力场分析

为了达到较好的催化效果，催化位置应该选择

表 2 不同催化时间的增雨效果

Table 2 Rain enhancement of different seeding time

催化时间/min	地面降雨总量/kt	催化效果/%
自然云	481	
6	465	-3
8	474	-1
10	475	-1
12	553	15
14	542	12
16	551	14
18	547	13
20	535	11

云水丰富的地区(高茜等,2009)。取催化后第 6 min 即模式第 18 min 时 50.4 km(Y=43)处东西方向的垂直剖面(图 1)进行分析,阴影部分是盐溶滴数浓度(单位:个·kg<sup>-1</sup>),等值线为等温线。模拟试验中所取的催化位置为图中方框的位置。催化位置正处于过冷云水比质量的高值区。盐粉在播撒入云后,吸湿增长,随强上升气流抬升至高空并随水平气流扩散,同时与云中其他水成物发生相互作用,影

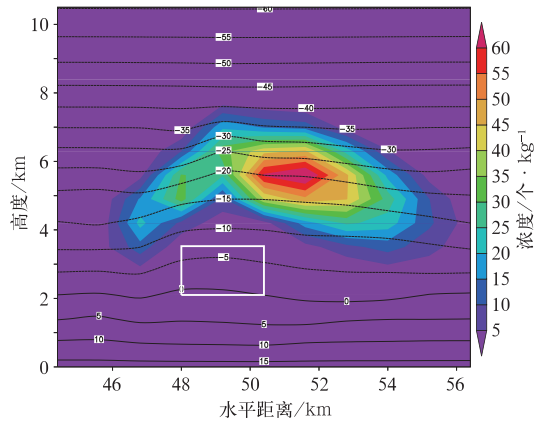


图 1 模拟第 18 分钟 50.4 km 处东西向盐溶滴比质量剖面图

(阴影区域代表盐溶滴数浓度分布,单位:个·kg<sup>-1</sup>;等值线代表温度分布,单位:℃。白色方框为催化区域)

Fig. 1 The cross sections of physical quantities in seeding cloud along 50.4 km at 18th minute of simulation [Shaded area represents number concentration of salt particles (unit: kg<sup>-1</sup>); Isoclines are isothermal lines (unit: ℃); The rectangle depicts the seeding area]

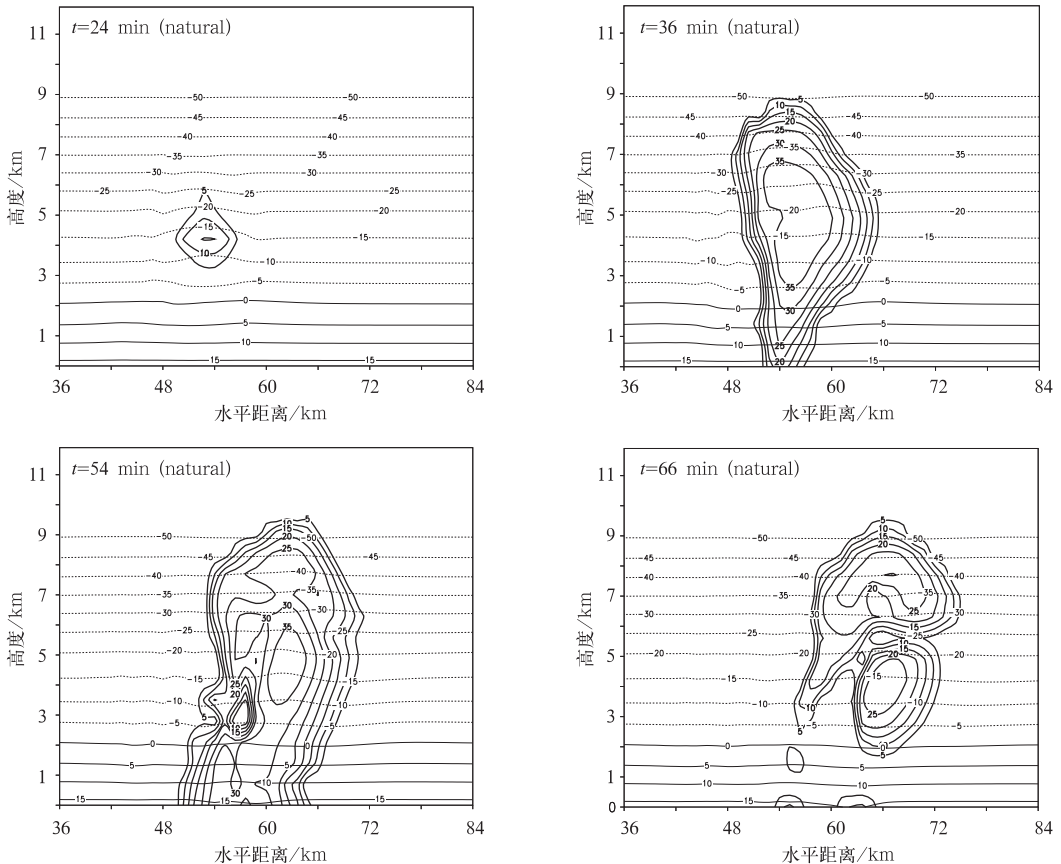


图 2 4 个时刻模拟的 Y=55.2 km 处东西方向自然云雷达回波演变

(等值线为雷达回波强度,依次为 5、10、15、20、25、30 和 35 dBz;点虚线为等温线,单位:℃)

Fig. 2 Cross sections of reflectivity evolution along 55.2 km from west to east of four moments

(The isoclines represent echo intensity of 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 dBz; Black dash represents isothermal, unit: ℃)

响云的微物理过程。

对自然云的模拟雷达回波进行分析。回波是雨、霰、雹和冰晶 4 种水成物造成的回波之和。图 2 为模拟的自然云在 55.2 km 处东西方向的雷达回波垂直剖面图。选择回波出现时刻,回波及地时刻,回波最强时刻和回波消亡时刻 4 个典型时刻的雷达回波来分析。雷达回波在第 24 min 开始出现,回波中心高度约为 4 km,温度为  $-15^{\circ}\text{C}$ 。初始回波是雨滴(暖雨过程)形成的。随后回波进一步发展。第 36 min,回波及地,地面开始出现降水。此时,回波中心位于约 5 km 高度,回波强度最大值达到 35 dBz。由于上升气流的抬升导致大量云水凝结产

生,所以云水中心与最大上升气流位置一致。第 54 min 时,强回波中心向下扩展到 1 km 高度处,这是由于此高度处雨滴下落而产生较大的下沉气流拖曳造成的。第 66 min 时,回波底出现抬升,回波强度减弱,表明降水结束。

催化云与自然云相比,回波提前 3 min 出现。在第 54 min,催化前后回波差异明显(图 3),主要体现在催化后强回波区(35 dBz)的范围扩大并及地,与之对应的是降水的增强。催化云的雷达回波强度和范围在暖层和冷层与自然云相比均有增加(张瑞波等,2010)。

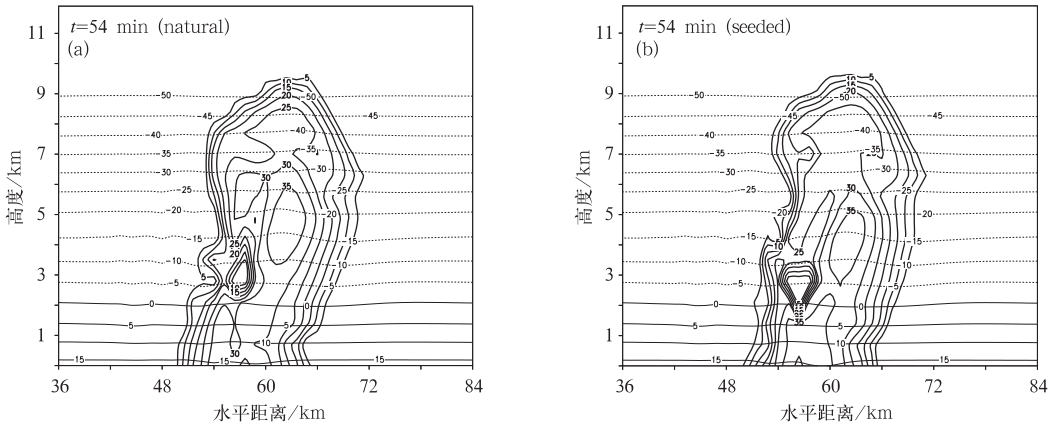


图 3 自然云(a)与催化云(b)第 54 min  $Y=55.2$  km 处东西方向的雷达回波图  
(等值线为雷达回波强度,依次为 5、10、15、20、25、30 和 35 dBz;点虚线为等温线,单位:  $^{\circ}\text{C}$ )

Fig. 3 Cross sections of reflectivity evolution along 55.2 km from west to east at 54th minute

(The isoclines represent echo intensity of 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 dBz; Black dash represents isothermal, unit:  $^{\circ}\text{C}$ )

为了详细研究雷达回波的形成原因,对自然云中冰晶( $Q_i$ )、云水( $Q_c$ )、霰雹( $Q_g + Q_h$ )、雨水( $Q_r$ )比质量分布和催化云与自然云中四种水成物的比质量分布之差随时间变化以及催化后盐溶滴的比质量分布随时间变化(图 4)分别进行分析。

自然云中,在模拟的开始阶段就出现了冰晶、云水和霰雹,直到第 24 min 才在催化高度上空出现明显的雨水分布。第 36 min,云体发展进入成熟阶段,冰晶、云水和霰雹的量级达到峰值,雨水的空间分布及地,地面形成大规模降水。随后,冰晶、云水和霰雹比质量总体上逐渐减少,雨水继续增加直到模拟第 60 min 之后才逐渐减少。催化后,冰晶比质量在模拟第 54 min 左右时出现了明显的变化。主要体现为催化云的冰晶分布范围增大,冰晶比质量最大值也增大。催化后,云水比质量在模拟第 45

min 其分布中心达到最大值。第 54 min 后,催化云的云水比质量与自然云相比区别不大。催化后,模拟第 18 min 开始霰雹比质量比自然云有一定的增加,第 24—36 min 增加显著。到第 54 和第 66 min,催化云中霰雹的分布范围比自然云大,但是催化云中霰雹比质量最大值要小于自然云。

在模拟第 24 min 雨水开始出现较为明显的分布,模拟第 36 min,催化云雨水分布与自然云相比,出现了明显的变化。首先,催化云和自然云中雨水比质量均在地面附近和 4 km 左右高空出现了两个高值区域,催化云的雨水比质量分布主要是在近地面附近,而自然云中雨水比质量分布主要在高空,说明催化促进了雨水的形成和下落。模拟第 60 min 后,高空的雨水分布高值中心消失,只剩下地面附近的区域有一雨水比质量高值区,催化云的雨水比质

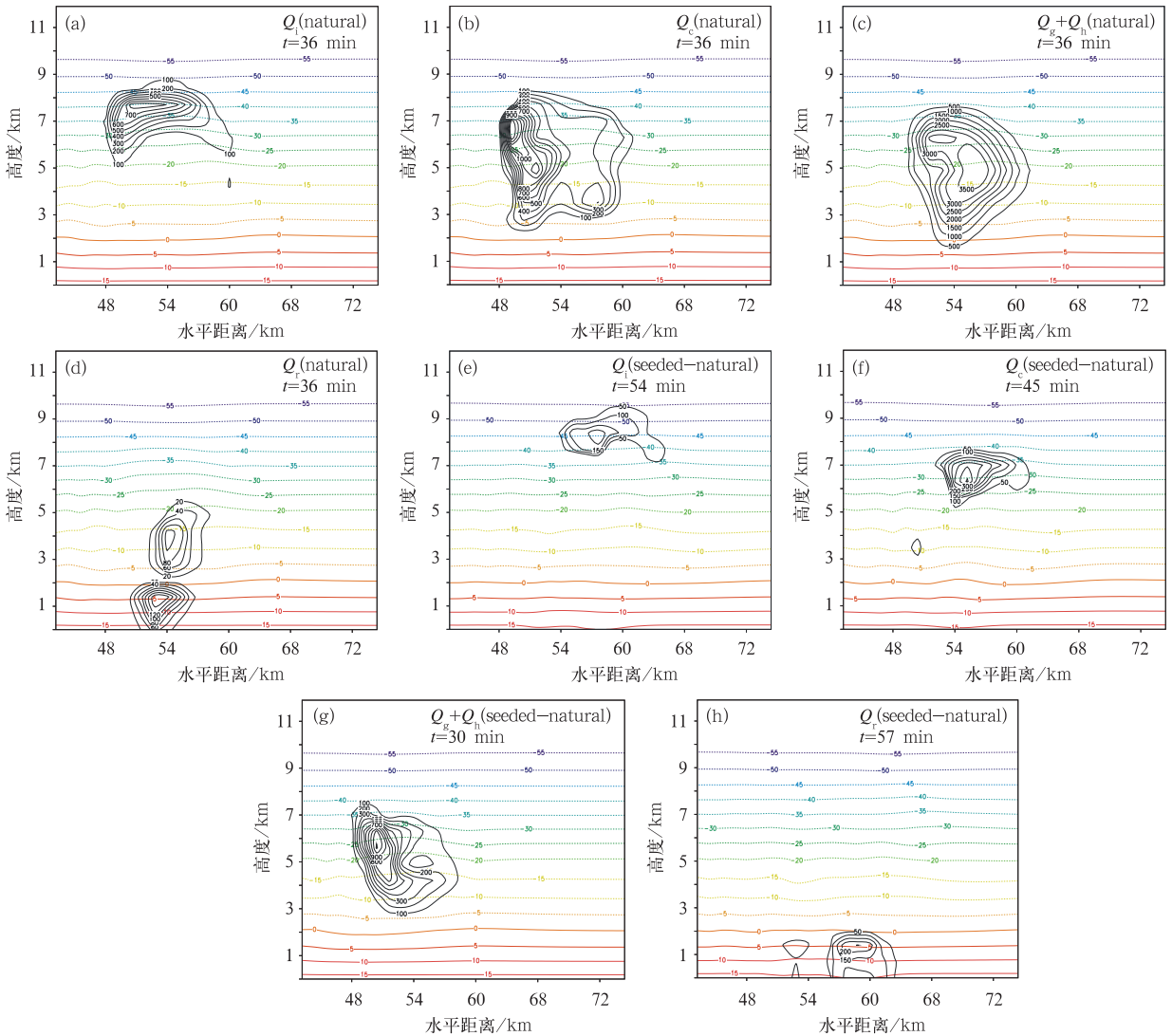


图 4 自然云中水成物比质量空间分布(a~d)以及催化云与自然云水成物比质量变化之差的空分布(e~h)图(单位:  $10^{-3} \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )

Fig. 4 Hydrometeors distribution of moisture variables in natural cloud (a~d) and variation of seeded cloud minus natural cloud (e~h) (unit:  $10^{-3} \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )

量明显大于自然云。

不同水成物在催化云和自然云中差异最大值的出现时间各有差异。总体来看,雨水出现明显变化的时间要滞后于其他水成物。催化云与自然云相比,霰雹在模拟的第 30 min 左右就出现了最大增长值,随后是云滴在第 45 min 出现增长峰值,冰晶在第 54 min 比自然云有明显增加。与自然云相比,雨水直到第 57 min 在催化高度下方出现了增长的最大值。盐粉播撒入云后,模拟第 24 min 时随强上升气流扩散到 7 km 高度处,随云体不断发展,第 36 min 出现两个高值中心,直到第 54 min,盐滴比质量已经降到很低的水平。

为了研究云中动力场的变化,对自然云中垂直气流分布进行分析,取  $Y=50.4 \text{ km}$  处的垂直气流剖面(图 5)。模式第 12 min 时,垂直速度最大值位于 3 km 左右高度,风速为  $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的量级。在第 21 min 时,自然云中垂直速度出现了最大值  $21 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,风速最大值位置约为 7 km 高度。此后,上升气流速度逐渐减小,到第 36 min 时,垂直速度最大值仅为  $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。对比催化云与自然云垂直速度变化,发现在第 27 min 时,催化云与自然云垂直速度差值达到最大,最大上升速度催化云比自然云大  $0.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

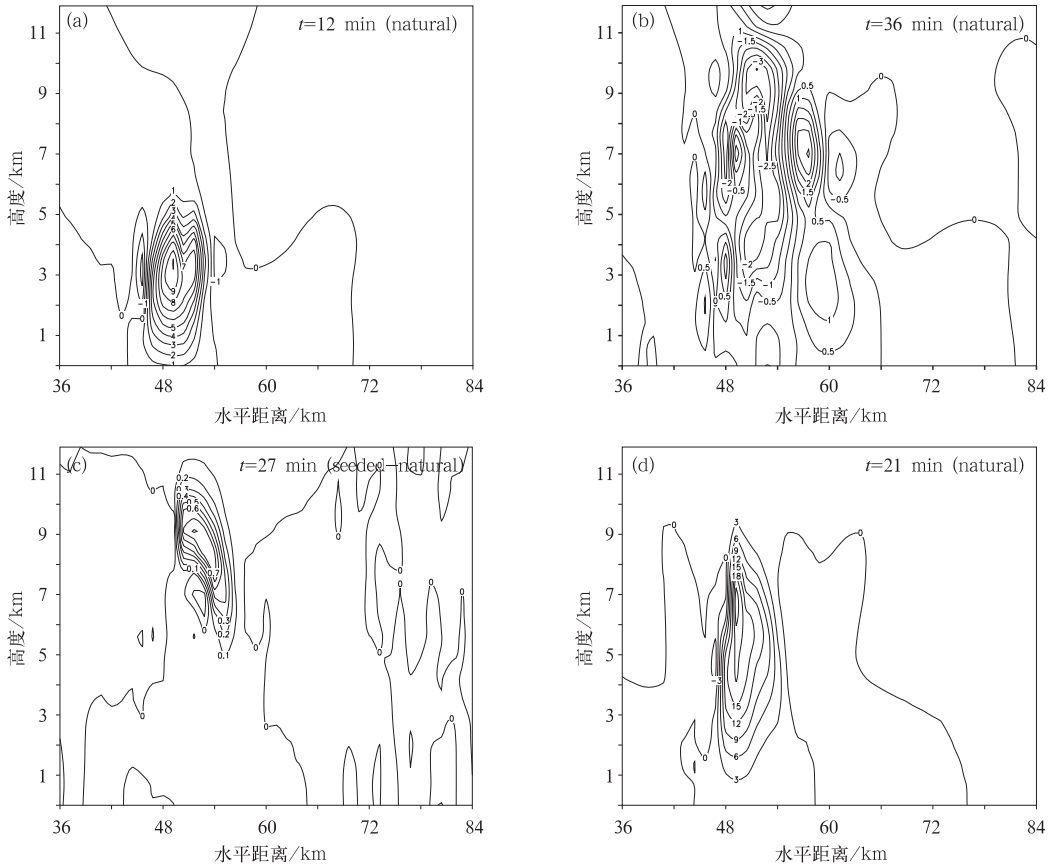


图 5 自然云  $Y=50.4$  km 处第 12、21 和 36 min 东西方向的垂直速度剖面图(a,b,d) 以及催化云与自然云 27 min 垂直速度之差(c) (单位:  $m \cdot s^{-1}$ )

Fig. 5 Cross sections of vertical velocity along 50.4 km from west to east at 12, 21, 36 min (a, b, d) and difference of vertical velocity between seeded cloud and natural cloud at 27th min (c) (unit:  $m \cdot s^{-1}$ )

### 3 微物理过程分析

#### 3.1 雨滴和霰的源项分析

为了研究催化引起的水成物源项变化,分析了雨水和霰的源项随时间演变。图 6 列出了雨水生成和增长的微物理过程随时间的演变。主要微物理过程包括云雨自动转化(Acr),雨水碰并云水(Ccr),霰融化成雨(Mgr),雹融化成雨(Mhr)。

自然云中模拟的第 20 min 时出现了云雨自动转化过程(Acr),形成了雨滴,该过程持续了大概 10 min 左右。雨滴形成后的短时间内通过碰并云水(Ccr)增长,此过程速率在第 30 min 附近达到最大值,随后逐渐减小。霰融化成雨(Mgr)过程从 25 min 左右开始出现,并且速率随时间迅速增加,到 45 min 左右达到最大值,之后略有减小并一直持

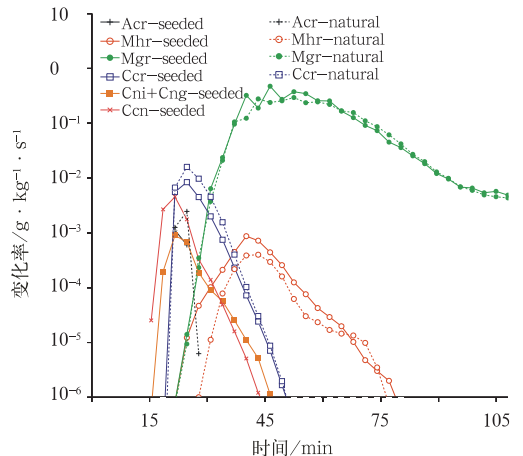


图 6 雨滴源项微物理过程随时间变化 (实线为催化序列 4 的变化曲线,虚线为无催化序列的变化曲线)

Fig. 6 Temporal evolution of microphysical processes for rain-forming (Solid lines represent seeded sequence 4, dash lines represent natural sequence)

续到整个过程结束。霰融化成雨(Mgr)是整个雨滴形成过程中最重要的机制。冰雹融化成雨(Mhr)的转化机制从第 30 min 开始出现,速率随时间缓慢增加,在 45 min 后,此过程速率减小并逐渐消失。在雨滴生成和增长的开始阶段,雨滴碰并云水增长(Ccr)的过程占主导地位,雨滴通过暖雨过程增长。模拟第 30 min 后,雨滴的增长主要是通过冷雨过程实现的,霰融化成雨(Mgr)是雨滴的最主要来源。

盐粉播撒入云后,雨水碰并云水(Ccr)速率出现了大幅的减少,冰雹融化成雨水(Mhr)微物理过程速率增加了。催化后变化最显著的微物理过程是霰融化成雨过程(Mgr),尤其是在模拟的 40~65 min 时段内,此过程明显增加,从而导致了降水的增加。

对比催化云与自然云雨滴源项微物理过程的变化可以看出,催化后由于盐粉的播撒,在模拟开始阶段出现了云水碰并盐溶滴增长(Ccn)的过程,盐溶滴收集云水后增长,随后作为雨滴和霰形成的胚胎,被冰晶和霰碰并(Cni,Cng),导致冰晶和霰的增加,间接使霰融化成雨过程在催化后增加,在一定程度上导致了降水增加。由于盐溶滴收集云水的过程消耗了云水,导致催化后云雨自动转化过程出现时间推迟,并且速率也有所降低。

在霰源项随时间的演变图 7 中,列出了霰生成

和增长的微物理过程随时间的演变。主要微物理过程有冰霰自动转化(Aig),霰碰并过冷云水(Ccg),霰碰并雨水(Crg),雨滴冻结成霰(Mrg),冰晶碰并雨水(Cri),云滴与霰自动转化(Acg)。

自然云中冰霰自动转化(Aig)在云产生后很快就出现,它是霰形成的启动机制,所以模拟开始不久的几分钟内就有小霰粒产生,霰自动转化速率随着

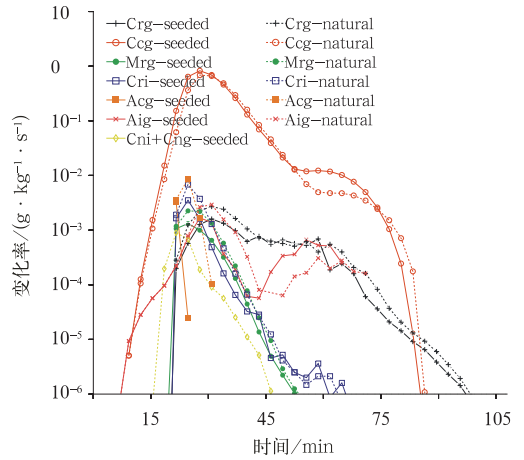


图 7 霰生成和增长的微物理过程随时间变化 (实线为催化序列 4 的变化曲线,虚线为无催化序列的变化曲线)

Fig. 7 Same as Fig. 6, but for graupel-forming

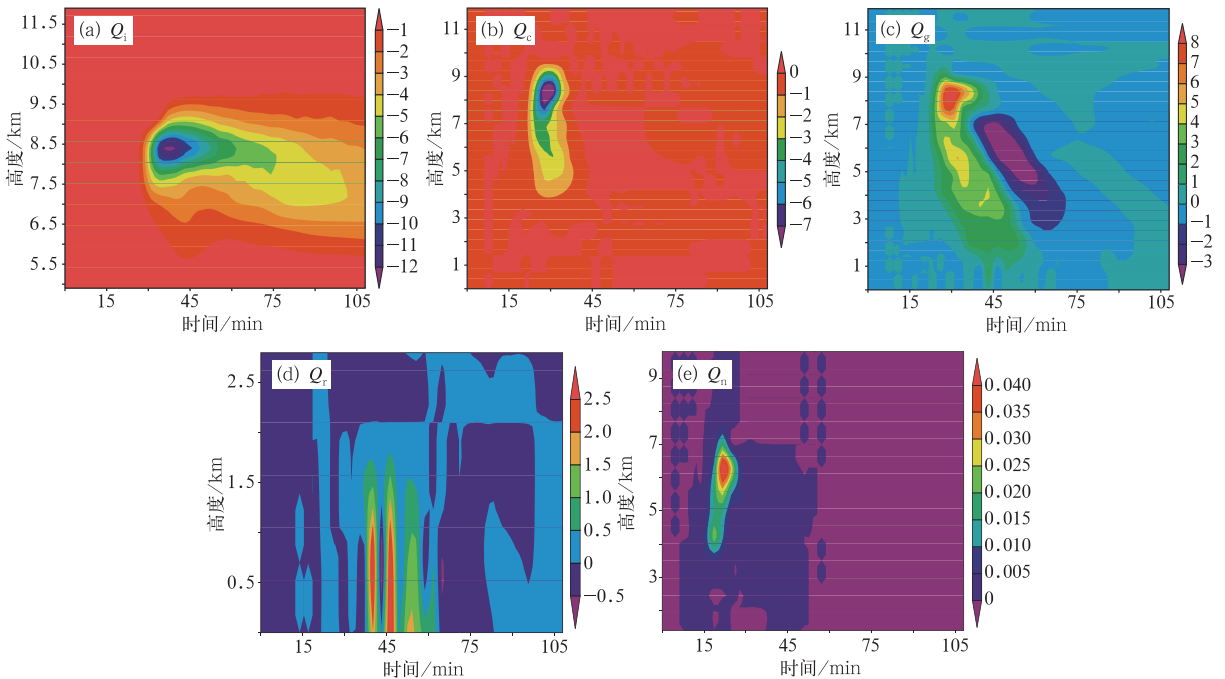


图 8 催化云与自然云对应各时刻各高度水成物比质量变化之差演变图 (单位:  $10^{-3} \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )

Fig. 8 Hydrometeors distribution of moisture variables (unit:  $10^{-3} \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )



时间明显增长,模拟的第 30 和 60 min 出现了两次峰值。霰碰并过冷云水(Ccg)机制在模拟的第 10 min 左右出现,其速率迅速增加,此过程使霰含量大幅增加。半小时后该过程速率逐渐减小。霰碰并过冷云水(Ccg)是霰增长的最主要机制,比其他霰的源项高出 2~3 个量级。此过程导致了云中大量过冷水消耗。雨滴冻结成霰(Mrg)和冰晶碰并雨水(Cri)过程随时间的变化趋势和量级相似,均是在催化后不久就出现,速率逐渐增大达到最大值,在模拟的第 45 min 前对霰的形成贡献较大,随后其贡献逐渐减小。霰碰并雨水(Crg)的过程在模拟第 20 min 左右出现,贡献较大,随后其速率缓慢减小。云滴与霰自动转化(Acg)过程仅在模拟的第 20 min 出现,持续时间很短,对霰的形成贡献很小。

对比催化云与自然云的结果可以看出,催化引起了多个霰源项的变化,包括在模式第 15 min 左右出现的盐滴被冰晶碰并形成霰(Cni+Cng),此过程造成霰的增加。霰碰并过冷云水(Ccg)在催化的开始阶段和模拟的第 60 min 左右均增加,同时,霰碰并雨水(Crg)在催化后 20 min 内变化不大,因此催化后霰的总量是增加的。冰晶碰并雨水(Cri)过程在模拟的 20~50 min 内一直减少。霰自动转化(Acg)出现了较明显的减少。催化云中冰霰自动转化(Aig)过程在模拟的 30~45 min 时段内速率比自然云有所降低,45 min 后其速率较自然云有明显增加。

云发展的初期,由冰霰自动转化过程形成霰胚,然后霰胚通过收集过冷云水长大形成霰,霰的粒径增大到一定程度后,霰下落到暖区融化成雨,形成降水。冰霰自动转化是霰的形成机制,霰碰并过冷云水增长是霰增长的最主要机制,该过程在整个降水过程中都保持着较高的速率。

### 3.2 水成物变化分析

为了研究催化后云中水成物的变化,对各个时刻和高度上的水成物比质量求平均,分析催化前后的水成物变化(如图 8 所示)。在冰晶比质量变化图 8a 中,催化引起了整个催化时段内冰晶的持续减少,这是由于催化后冰霰自动转化过程增加,冰晶消耗增加造成的。模拟第 25 min 左右开始出现冰晶比质量的大幅减少,出现变化的高度较为集中,主要在 6~10 km 的范围内,低值中心在 8.5 km 的高度,减少量级最大达到  $10^{-2} \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。模拟第 45

min 左右,低值中心处的催化前后冰晶比质量差异逐渐减小。冰晶比质量减小的原因主要是催化后冰晶碰并过冷云水增长过程在模拟的 20~50 min 内较催化前减少。由于盐粉粒子吸收过冷云水形成盐溶滴,其体积会扩大 3 倍,从而引起云水比质量的减少,因此云水比质量变化图 8b 中,模拟第 20 min 开始,云水比质量在催化高度上空出现了较大程度的减少,虽然催化高度位于 3 km 左右的较低高度,不过其影响范围可以向上延伸到 10 km 的高度。模拟第 40 min 后,盐溶滴对云水的影响逐渐消失。

由霰比质量变化图 8c 看出,模拟第 20 min 左右,在 2~8 km 高度内,霰比质量较自然云有所增加,高值中心位于 8 km 高度处。高值中心的高度随时间逐渐降低,模拟第 45 min 时降到 3 km 左右的高度,之后霰比质量在 5~7 km 高度范围内减小,低值中心也逐渐降低,直到模式 60 min 后,催化云与自然云相比,霰比质量变化不明显。在雨水比质量变化图 8d 中可以看出,第 35~80 min 这段时间内,近地面 2 km 范围内雨水变化明显,催化云与自然云相比,比质量增长区域的范围和持续时间要大于比质量减少区域的范围和持续时间,因此催化后雨水比质量增加。在盐溶滴比质量变化图 8e 中,盐粉在播撒入云后吸湿增长,15 min 左右盐溶滴在催化高度上空开始出现明显的增长。第 20 min 左右,在 6 km 高度处,出现了盐溶滴比质量最大值,30 min 之后,盐溶滴比质量降低到较低水平。

所以,总体上来看,催化可以引起冰晶和云水的比质量减少,霰和雨水的比质量增加。雨水变化出现时刻晚于其他的水成物的变化。综合雨水和霰源项的分析,可知形成该现象的原因是,盐粉播撒入云后吸湿形成盐溶滴,盐溶滴碰并冰晶,造成冰晶减少,同时由于冰晶自动转化为霰过程增加,霰在与冰晶和云水碰并过程中使得霰对冰晶和云水消耗增加,因此,冰晶和云水比质量减少,霰比质量增加。霰增加后,相应地影响了霰融化成雨水过程,使雨水比质量增加。一段时间后,由于霰融化成雨消耗了霰,所以霰比质量随后会减少。霰的比质量减少,对冰晶和云水的消耗也减少,所以冰晶和云水在降水形成后,其比质量与自然云相比相差不大。

### 3.3 云中粒子粒径变化分析

为了研究催化对水成物粒子的影响,选取催化云和自然云的粒子粒径随高度变化趋势进行分析。

用每一高度层的水成物比质量之和除以该层的水成物数浓度之和得到平均体积,再由此计算出平均粒径。从图 8d 的分析中看出,在模式的第 48 min 左右催化引起的雨水比质量变化比较明显,所以对此时刻的粒子粒径进行分析。给出了第 48 min 时冰晶、霰和雨的粒径随高度变化图(图 9)。由图 9a 可以看出,随高度增加,冰晶粒径呈现先增大后减小的趋势。在 4 km 高度处,冰晶粒径平均值达到最大,与其他学者的研究结果相近(于丽娟等,2009)。冰晶分布的垂直高度最高可达 16 km,催化导致 4 km

高度处冰晶粒径有所增大。图 9b 中,自然云中霰粒径垂直分布随高度呈现减小的趋势,其较大粒径出现的高度大概在 2 km 左右,14 km 以上的高空几乎没有霰粒子。霰粒子的粒径分布总趋势不变,也是随高度减小,催化云与自然云相比,在 4~10 km 范围霰粒径在催化云中有明显增大,10 km 以上霰粒径比自然云小。图 9c 中,自然云中雨滴主要分布在 8 km 以下的高度,其粒径随高度呈现递减趋势。催化云中,在催化高度附近,雨滴的粒径有小幅度增长,地面附近粒径增长较为明显。

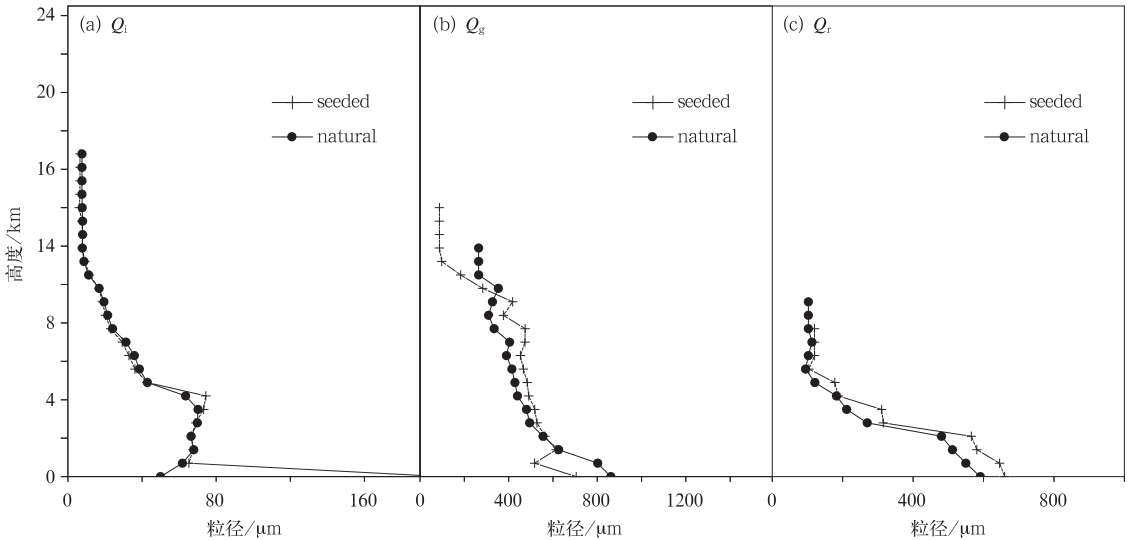


图 9 第 48 min 自然云中和催化云中冰晶(a)、霰(b)和雨(c)的粒径垂直廓线  
(各高度层粒径平均值随高度的变化)

Fig. 9 The vertical profiles of particle diameters of ice crystal, graupel and rain in seeded and natural cloud at 48th min (average of all levels)

图 10 为第 48 min 冰晶、霰和雨滴三种水成物在自然云和催化云中比质量随高度变化分布图。图 10a 中可以看出,冰晶比质量高值区位于 4~10 km 的高空,8 km 附近冰晶比质量平均值最大。催化云中冰晶的比质量与自然云相比在 5~8 km 附近略有减小。图 10b 中,霰比质量高值区位于 1~10 km 空中。在催化云中,霰比质量在催化高度 3~5 km 附近处比自然云增加,而在催化高度上空,距地面 6 km 左右高度处,催化云中霰的比质量比自然云有所减小。图 10c 中可以明显看出,催化云中,地面附近(2 km 以下的高度范围)雨水比质量明显增加,催化增雨效果明显。综合图 9 和图 10,可以看出,催化云中,催化导致催化高度附近 4 km 左右高度处霰的粒径和比质量都比自然云有所增加。同时,催

化云中雨滴的粒径和近地面的雨水比质量也都比自然云大。

## 4 结 论

本文利用三维对流云盐粉催化模式,对一次对流云降水过程进行了催化模拟研究。模式考虑了盐粉与云中水成物的相互作用。得出了以下结论:

(1) 模拟研究发现,采用合适的催化方法,可以有效增加降水。在本试验中,当盐粉粒径大小为 20  $\mu\text{m}$ ,在模拟的第 12 min 进行单次播撒,可以达到最佳的催化效果,增雨效果达 20%。房文等(2005)的碘化银催化增雨效果是 38%,楼小凤等(2013)的盐粉催化增雨效果是 10%,本文的增雨效果是

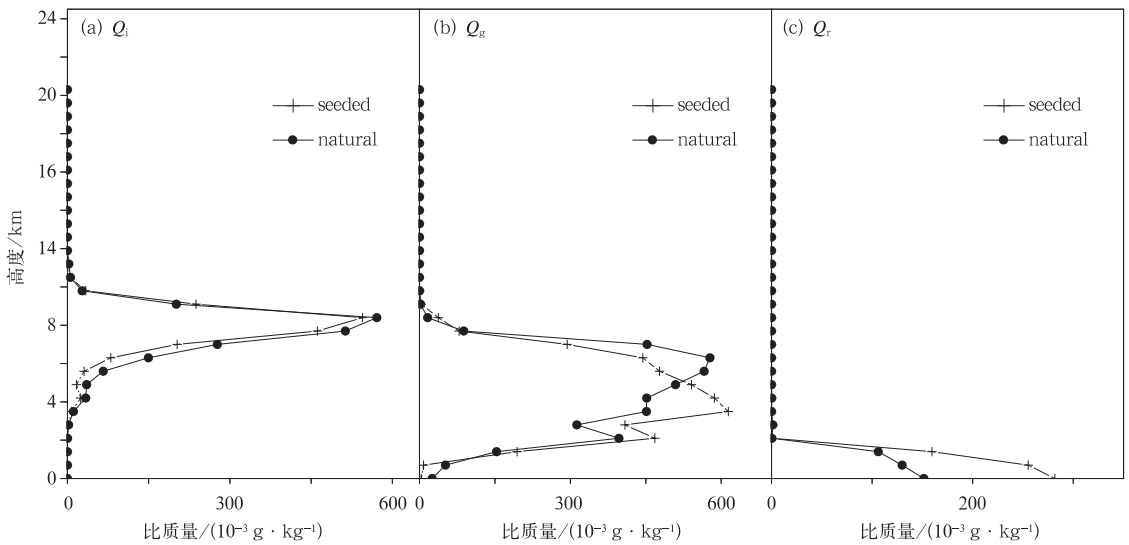


图 10 第 48 min 自然云中和催化云中冰晶(a)、霰(b)和雨(c)的比质量垂直廓线  
(各高度层水成物比质量平均值随高度的变化,单位:  $10^{-3} \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )

Fig. 10 The vertical mix ratio profiles of ice crystal (a), graupel (b) and rain (c) in seeded and natural cloud at 48th min (average of all levels; unit:  $10^{-3} \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )

20%, 本文的结果处于中间水平。催化次数的增加, 会使增雨效果变得不理想。

(2) 催化会引起多个雨和霰源项的变化。霰融化成雨是雨滴增长的主要机制, 催化后霰融化成雨的速率有所增长。霰碰并过冷云水是霰增长的主要机制, 霰碰并过冷云水增长过程的速率也在催化后有所增加。播撒的盐粉可以作为雨滴和霰形成的胚胎, 被雨滴和霰碰并, 消耗云水, 导致云雨自动转化过程出现时间推迟及转化率减小。

(3) 催化会引起云中水成物比质量的变化。总体上来看, 催化后, 盐粉粒子吸收云水形成盐溶滴引起云水比质量的减少, 冰晶碰并雨水过程的减缓引起冰晶比质量的减少, 冰霰自动转化过程速率的增加导致霰的比质量增加, 随后由于霰融化成雨速率增加, 导致霰的比质量较催化前减少以及雨水比质量的增加。雨水出现变化的起始时间比其他的几种水成物出现变化的时间稍晚。

(4) 催化后, 催化区域上空冷区的霰、云滴粒子的粒径有了不同程度的增长, 表明盐粉催化也会通过冷雨过程来影响降水。催化云中, 催化区域附近的霰和地面附近的雨水比质量都有明显增长。催化后的动力场也反映出冷区的上升气流增强, 催化后的云体在成熟阶段其雷达回波强度较自然云有明显的增强。

(5) 下一步的工作中将在中尺度模式的框架下

进行盐粉催化的数值模拟, 结合观测资料, 进一步对比分析催化后云中各物理量的响应和催化效果。

## 参考文献

- 房文. 2004. 青海对流云数值模拟分析. 气象科技, 32(5): 343-347.
- 房文, 郑国光, 何观芳. 2005. 青海秋季对流云降水及催化过程数值模拟研究. 南京气象学院学报, 28(6): 763-769.
- 高茜, 王广河, 史月琴. 2009. 华北层状云系人工增雨两个例数值研究. 气象, 35(1): 1241-1251.
- 顾震潮. 1980. 云雾降水物理基础. 北京: 科学出版社, 203-205.
- 顾震潮, 陈炎清, 徐乃璋, 等. 1962. 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, 2-21.
- 胡志晋, 蔡利栋. 1979. 积云暖雨过程及其盐粉催化的参数化数值模拟. 大气科学, 3(4): 334-342.
- 胡志晋, 何观芳. 1987. 积雨云微物理过程的数值模拟——(一)微物理模式. 气象学报, 45(4): 467-484.
- 胡志晋, 严采繁. 1985. 盐粉催化不同生命史的浓积云的数值模拟. 大气科学, 9(1): 62-72.
- 胡志晋, 严采繁, 王玉彬. 1983. 层状暖云降雨及其催化的数值模拟. 气象学报, 41(1): 79-88.
- 楼小凤, 何观芳, 胡志晋, 等. 2013. 三维对流云盐粉催化模式的发展和催化模拟试验. 高原气象, 32(2): 491-500.
- 马培民, 孙灵敏, 赵瑞华, 等. 1965. 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, 35(3): 280-291.
- 王伟民, 卢伟, 黄培强, 等. 2000. 几种消暖云(雾)催化剂的试验研究. 气象科学, 20(3): 478-486.
- 肖辉, 徐华英, 黄美元. 1988. 积云中云滴谱形成的数值模拟研究(一)——盐核谱和浓度的作用. 大气科学, 12(2): 121-130.

- 徐华英,郝京甫. 1983. 盐粉催化积云降水的数值模拟. *大气科学*, 7(4):403-410.
- 于丽娟,姚展予. 2009. 一次层状云飞机播云试验的云微物理特征及响应分析. *气象*, 35(10):8-24.
- 张瑞波,刘丽君,钟小英,等. 2010. 利用新一代天气雷达资料分析飞机人工增雨作业效果. *气象*, 36(2):70-75.
- 周秀骥. 1964. 暖云降水微物理机制的研究. 北京:科学出版社,105.
- 邹光源. 1991. 三维准弹性对流云模式. 北京:中国气象科学研究院.
- Caro D, Wobrock W, Flossmann A I. 2002. A numerical study on the impact of hygroscopic seeding on the development of cloud particle spectra. *J Appl Meteor*, 41:333-350.
- Flossmann A I, Hall W D, Pruppacher H R. 1985. A theoretical study of the wet removal of atmospheric pollutants. Part I: The redistribution of aerosol particles captured through nucleation and impaction scavenging by growing cloud drops. *J Atmos Sci*, 42:583-606.
- Liu P F, Zhao C S, Göbel T, et al. 2011. Hygroscopic properties of aerosol particles at high relative humidity and their diurnal variations in the north china plain. *Atmos Chem Phys*, 11:3479-3494, doi: 10.5194/acp-11-3479-2011.
- Mather G K, Terblanche D E, Steffens F E, et al. 1997. Results of the South African cloud-seeding experiments using hygroscopic flares. *J Appl Meteor*, 36:1433-1447.
- Rosenfeld D, Axisa D, Woodley W L, et al. 2010. A quest for effective hygroscopic cloud seeding. *J Appl Meteorol Clim*, 49:1548-1562.
- Silverman B A, Sukarnjanaset W. 2000. Results of the Thailand warm-cloud hygroscopic particle seeding experiment. *J Appl Meteor*, 39:1160-1175.
- WMO. 2000. Report of the WMO International Workshop on Hygroscopic Seeding: Experimental Results, Physical Processes and Research Needs. WMP Rep 35, WMO/TD1006, WMO, 68.
- Yin Y, Levin Z, Reisin T, et al. 2000a. Seeding convective clouds with hygroscopic flares: Numerical simulations using a cloud model with detailed microphysics. *J Appl Meteor*, 39:1460-1472.
- Yin Y, Levin Z, Reisin T G, et al. 2000b. The effects of giant cloud condensation nuclei on the development of precipitation in convective clouds—a numerical study. *Atmos Res*, 53:91-116.
- Zhao Chunsheng, Yutaka I. 2004. Modeling marine stratocumulus with a detailed microphysical scheme. *Adv Atmos Sci*, 21(1):61-74.