## 层状云催化后过冷水分布与演变规律的数值模拟

刘晓莉1 牛生杰1 陈 跃2

1南京信息工程大学大气物理与大气环境实验室,南京 210044
2中国气象科学研究院,北京 100081

**摘 要** 在郭学良等(1999年)发展的层状云雨滴分档模式中加入冰晶繁生过程,模拟了碘化银和液态二氧化碳的催化效率以及催化后云中过冷水的分布与演变过程。结果表明:碘化银和液态二氧化碳在5200~5600m高度上的催化效率相当,最大达到11.1%;液态二氧化碳在2600~3000m高度层的催化效率明显增大,达到14.2%;模式云被催化后,云中云水含量在200min都较未催化时增长0.05g/m<sup>3</sup>以上,表现出云中过冷水被消耗后的恢复趋势;碘化银和液态二氧化碳对云体催化后,云中水汽含量减少0.5~2g/m<sup>3</sup>,对过冷水的恢复作出贡献;催化过程使得模式云中雨滴浓度在210min时较未催化时减少73%,在240min时较未催化时增加309%。得出了两点结论:(1)模式云被催化后,云中过冷水在200min表现出恢复趋势,云中水汽对过冷水的恢复过程作出了贡献;(2)在过冷水较多的区域播撒液态二氧化碳可以取得较好的催化效率。

关键词 层状云 过冷水 时间尺度 数值模拟

**文章编号** 1006 - 9895(2005)04 - 0561 - 09 中图分类号 P426 文献标识码 A

## Numerical Simulation of Distribution and Evolution of Supercooled Liquid Water in Seeding Stratiform Cloud

LIU Xiao-Li $^1$  , NIU Sheng-Jie $^1$  , and CHEN  $Yue^2$ 

- Laboratory of Atmospheric Physics & Environment, Nanjing University of information Science & Technology, Nanjing 210044
- 2 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

**Abstract** Two materials are usually used for cold cloud seeding agents. One is coolant agent such as solid, liquid  $CO_2$  or  $N_2$ , and they can generate ice crystals by strong cooling, the other agent, such as AgI, can be ice-forming nuclei. The important advantage of the coolant agent is that a number of generated ice crystals is nearly independent of the temperature. Since dry ice pellets have high fall velocity and have to be dropped from high altitudes, Fukuta (1996a, b) suggested a method to seed the liquid  $CO_2$  horizontally at the lower level of the supercooled portion of cloud. The objectives of this study are to compare the effect of the newly proposed cloud (seeding agent-liquid  $CO_2$  with current widely used seeding agent-AgI on cloud dynamics, cloud microphysics and precipitation evolution, especially the distribution and evolution of supercooled liquid water in seeded stratiform cloud. A one-dimensional rain category model developed by Guo Xueliang et al. (1999) is employed in this study with ice multiplication available. The contact and deposition nucleation processes of the seeding agents are considered as only inertial impact and Brownian collection are considered as a possible mechanism for contact nucleation. As a cooling agent, the cooling process due to vaporization and heat conduction between the seeded air and the liquid  $CO_2$  droplets are also included

**收稿日期** 2005-01-04, 2005-11-09 收修定稿

基金项目 国家自然科学基金资助项目 40537034、40175003,南京信息工程大学气象灾害国家重点实验室培育点 KLME050217,国家十 五科技攻关项目 2001BA610A06

作者简介 刘晓莉,女,1979年出生,博士研究生,主要从事云物理与人工影响天气研究。E-mail: liuxiaoli2004y@nuist.edu.cn

大 气 科 学 Chinese Journal of Atmospheric Sciences

into this model to explore the cooling effect of liquid  $CO_2$  on the seeded cloud. Seeding rate is set to 0. 06 g/s for both AgI and liquid  $CO_2$  in all seeded cases and seeding was starting at 170 min. Both AgI and liquid  $CO_2$  were released continuously for 10 min, 20 min and 30 min in 5200 – 5600 m and 2600 – 3000 m levels, respectively. The simulations indicate that the liquid  $CO_2$  and AgI seeding in 5200 – 5600 m levels have nearly the same seeding effect which can reach to 11. 1%, while that of liquid  $CO_2$  seeding at 2600 – 3000 m levels can reach 14. 2%; and the cooling effect of liquid  $CO_2$  is found to be very faintness at the same time; when it comes to the seeding effect on cloud microphysics, growth of super cooled water begin at 200 min after depleted by seeding process; and the vapour content reduces 0. 5 g/m<sup>3</sup> – 2 g/m<sup>3</sup> after seeding and contribute to the growth process of super cooled water; the concentration of rain droplet reduces 73% at 210 min and increases 309% at 230 min as compared to the condition without seeding. The conclusions can be made that; (1) Growth process of supercooled cloud water appears at 200 min after depleted with the vapour content contributed to the growth process; (2) better seeding effect can be achieved by seeding liquid  $CO_2$  in the region with more supercooled liquid water.

Key words stratiform cloud, distribution and evolution of supercooled water, time scale, numerical simulation

## 1 引言

层状冷云的催化一般采取人工冰核和致冷剂 两种类型的催化剂。人工冰核除通过贝吉隆过 程[1]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[2]。而致冷剂的催化机制[3] 是使云中造成局部超低温,形成过饱和状态,促使 水汽同质核化形成冰晶,与过冷云中有无自然冰 核或过冷水的多少无关,成核率与温度相独立。 致冷剂的成冰率基本不受云中温度、水汽和过冷 水含量的影响。在0℃附近的云中,直接播撒致冷 剂就可以产生大量的冰晶,故层状冷云人工催化 应首选致冷剂。人工冰核通常选用碘化银(AgI)。 在-10℃时,1g碘化银可产生10<sup>12</sup>~10<sup>13</sup>个有效 冰核,是一种高效催化剂,但其产生的冰晶数随温 度降低而增加, 需从温度较低处播撒才能发挥最 大效益。Bigg 等<sup>[4, 5]</sup>研究了碘化银催化剂对云体 催化后的持续效应,发现小剂量的碘化银对云体 催化后 13~21 h, 云内产生了大量的次生冰晶, 碘化银催化剂的持续效应至少可以持续一星期, 目每10天重复发生一次,并认为碘化银催化后, 与地表植物之间发生化学作用,从而在很长一段 时间内对催化后的降水存在着影响。澳大利亚在 1947~1952 年和 1972~1975 年的人工增雨试验 中都采用了干冰作为催化剂, 雷达回波显示, 干冰 从云顶播撒后,迅速使云水转化为云冰,使云体增 雨<sup>[6]</sup>。但是,干冰沉降速度较大,需从云顶或高空 播撒。Fukuta<sup>[3,7]</sup>提出在云中相对较低处用液态

二氧化碳(Lco<sub>2</sub>)代替干冰进行催化,液态二氧化 碳的表面温度可达-90℃,可以在相对较低的高 度播撒。每克液态二氧化碳产生的冰晶量与干冰 的基本相同,大概接近同质核化机制能够达到的 最大值,只要温度低于 0℃,液态二氧化碳产生的 冰晶量基本是一个常数。

在实际人工增雨作业中,对云系进行催化作 业后,云中过冷水将经历一个逐步被消耗、冰晶浓 度增加的过程,表现在宏观降水上就是降水强度 随时间的强弱变化。对某一云系进行催化后,是 否还需要继续催化?何时催化?这就要利用综合 观测和数值模拟方法来研究人工催化后云中过冷 水分布和演变规律。郭学良等<sup>[8,9]</sup>在层状云中引 入了雨滴分档模式,对北方常见的三类层状云中 引入了雨滴分档模式,对北方常见的三类层状云中 水成物的总比含水量、降水强度及雨滴谱进行了 数值模拟,并与观测值进行了比较分析,结果表 明,雨滴分档模式更能反映雨滴的自然演变特征。 本文将在一维雨滴分档模式中研究层状云被碘化 银和液态二氧化碳催化后,云中过冷水的分布与 演变规律。

### 2 模式介绍

本文使用郭学良等<sup>[δ, 9]</sup>建立的一维层状云雨滴 分档模式,模式中假定组成云水场的粒子是单分散 的,云滴的平均浓度为常数。模式中将雨滴按直径 从 100 μm 到 6 mm 分为 37 档,隔一定的时间步长 对雨滴重新分档。模式的初始场水汽比含量、温 度、气压由探空资料确定,垂直速度假定随高度成 抛物线分布:

 $w(z) = w_{max} \{1 - [(2z - H)/H]^2\},$  (1) 其中,  $w_{max}$ 为 w 的最大值,模拟中对不同系统取其 典型值, H 为云顶高度,由观测决定。

模拟过程中,假定水平场均匀,垂直速度保持不变。模式的垂直格距为 200 m,时间步长为 10 s,垂直范围取 8 km。本文以 1995 年 6 月 23 日在吉林白城地区的一次降水过程为例进行模拟,该层状云系由强锋面抬升形成,云顶温度低 (-25 °C),云体深厚(4~5 km),云顶高度为 7 km,零度层位于 2600 m。云内最大垂直气流速 度  $w_{max}$ 取为 0.2 m/s。

模式包含的变量有:水汽比含量 q<sub>v</sub>、云水 q<sub>c</sub>、 雨水 q<sub>r</sub>、云冰 q<sub>i</sub>、雨滴分档浓度 N<sub>r</sub>(I)(I 是雨滴档 数)以及冰粒子浓度 N<sub>i</sub>。模式中共考虑了 9 种主 要的微物理过程:云雨自动转化过程、雨水对云 水的碰并收集过程、云滴的凝结与蒸发过程、雨 滴的凝结蒸发过程、冰晶核化过程、冰粒子的凝 华增长过程、冰粒子碰并云滴的结淞增长过程、 冰粒子的融化过程和冰晶繁生过程。有关模式详 细情况以及冰晶繁生过程模拟试验见文献[8~ 10]。

液态二氧化碳的核化率不随温度改变,取为 10<sup>16</sup> kg<sup>-1</sup>。AgI 的核化率随温度改变,通过下式计 算:

 $N_{\rm a}(\Delta T) = \begin{cases} 0 & \Delta T < 5^{\circ}{\rm C}, \\ \exp[-0.022(\Delta T)^2 + 0.88(\Delta T) - 3.8] \\ 5^{\circ}{\rm C} \leqslant \Delta T \leqslant 20^{\circ}{\rm C}, \\ 1.6 \times 10^2 & \Delta T > 20^{\circ}{\rm C}. \end{cases}$ (2)

模式中考虑两种催化剂的成核机制<sup>[11,12]</sup>,即 由于布朗运动和惯性碰并而发生的在人工冰核和 云、雨滴之间的接触冻结核化以及水汽在人工冰核 上的凝华核化过程。

模式中还考虑了液态二氧化碳对云体催化 后,由于液态二氧化碳汽化和被催化后的空气与 液态二氧化碳之间的热传导对云体产生的冷却过 程。

(1) 液态二氧化碳汽化对云体的冷却作用:

$$\frac{\mathrm{d}Q_1}{\mathrm{d}t} = -L \,\frac{\mathrm{d}M}{\mathrm{d}t},\tag{3}$$

其中, L(=229.9 J/g)是液态二氧化碳的汽化潜热, dM/dt 是液态二氧化碳的播撒率。

(2)被催化后的空气与液态二氧化碳之间的热 传导对云体的冷却作用:

$$\frac{\mathrm{d}Q_2}{\mathrm{d}t} = -\frac{\mathrm{d}M}{\mathrm{d}t}c_V(T-T_s)\,,\tag{4}$$

563

在式(4)中, $T_s$ 是液态二氧化碳的表面温度,T是 被催化云体的环境温度。 $c_V$ (=717 J·kg<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>) 为干空气的热容量。

上述两种冷却过程使云体降温:

$$\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}Q_1 + \mathrm{d}Q_2}{\mathrm{d}t\,M_{\mathrm{a}}c_V},\tag{5}$$

其中, Ma为空气质量。

## 3 催化方案

胡志晋[1]探讨了人工增雨机制、条件和方法, 提出了人工增雨条件:(1)云降水处于发展或维持 阶段,云中有比较深厚的上升气流,云下蒸发较 弱,云厚较大,过冷水层较厚,云底较低;(2)云中 有过冷水,在较厚的层次里有较大的冰面过饱和水 汽值。并指出层状云中升速较小,除对流区外,冰 晶增长后主要是下落,所以催化高度宜高,使人工 冰核能充分利用整个云层的增长条件而提高催化效 率。牛生杰等[13]利用机载粒子测量系统,对宁夏 地区 1994 年 6 月、1996 年 5 月的 4 次层状云降水 过程进行了探测。从对这些资料的分析中得到启 示,层状云云团的催化潜力较大,人工催化作业应 尽可能在这些区域中进行,且作业高度应尽可能高 些。冰晶凝华增长速率同温度有关[14],凝华最快的 是一7℃和一15℃层;凝华慢的是>-5℃层、-19℃附近和<-22℃层。过饱和水汽和过冷水容 易在冰晶凝华慢的部位出现。

综合考虑温度和过冷水含量的多少对催化效 率的影响,当模式云发展到 170 min 时,分别在 5200~5600 m (温度为-14.7~-16.8℃)高度 层和 2600~3000 m (温度为-0.1~-2.2℃)高 度层播撒碘化银和液态二氧化碳催化剂,播撒持 续时间选取为 10 min、20 min 和 30 min 来反映不 同剂量的催化剂对云体的催化。催化剂的播撒速 率取为 0.06 g/s。因为使用的是一维模式,三种 催化时间对应的单位面积上催化层内的催化剂量 分别为 36 g、72 g和 108 g,在实际催化作业中是 可以达到的。

## 4 人工催化的数值试验

### 4.1 催化效率

未催化时,模式云在 360 min 时的过程雨量 为 105.9 mm。在 5200~5600 m 高度层播撒碘化 银和液态二氧化碳后,两种催化剂的催化效率相 差不大(表 1)。增雨量并不总是随着播撒时间的 增长而增大,对两种催化剂而言,播撒 30 min 后 的催化效率都小于播撒 20 min 时的催化效率。在 2600~3000 m 高度层播撒两种催化剂后,液态二 氧化碳的催化效率明显优于碘化银。碘化银的催 化效率随着播撒时间的增长而增长,最大可达 5.2%。在这一区域播撒液态二氧化碳 10 min 时, 催化效率为 14.2%,高于在 5200~5600 m 处催 化时的催化效率。随着播撒时间的增长,液态二 氧化碳的催化效率降低。

在云中播撒液态二氧化碳后,由于液态二氧化 碳汽化和被催化空气与液态二氧化碳表面之间的热 传导,催化层的温度会有所降低。表 2 给出了在 5200~5600 m 和 2600~3000 m 高度层分别播撒液 态二氧化碳 30 min 后,相应催化层各自降低的温 度。可以看到,在两次催化过程后,云体温度均最 多降低 0.4℃。说明液态二氧化碳催化对云体的降 温作用是非常微弱的。

表 1 模式云被催化后的降雨量及催化效率 Table 1 Rainfall and seeding efficiency with seeding process

催化部位 Seeding location/m	催化剂 Seeding material	催化时间 Seeding time /min	降雨量 Rainfall/ mm	催化效率 Seeding efficiency
5200 – 5600 m	碘化银	10	116.9	10.4%
	Silver iodide	20	117.5	11.0%
		30	117.2	10.7%
	液态二氧化碳	10	117.5	11.0%
	Liquid car-	20	117.7	11.1%
	bon dioxide	30	116.9	10.4%
2600 – 3000 m	碘化银	10	108.1	2.1%
	Silver iodide	20	108.9	2.8%
		30	111.4	5.2%
	液态二氧化碳	10	120.9	14.2%
	Liquid car-	20	120.5	13.8%
	bon dioxide	30	119.9	13.2%

# 表 2 液态二氧化碳在 2600~3000 m 高度层和 5200~5600 m 高度层催化 30 min 对云体温度的影响

Table 2Effect of liquid  $CO_2$  ( $Lco_2$ ) seeding for 30 minutes oncloud temperature in 2600 - 3000 m and 5200 - 5600 m levels

		未催化时	催化后云	
		云体温度	体温度	
		Cloud	Cloud	降温
催化部位		temperature	temperature	Reduced
Seeding	高度	without	after	temper-
location/m	Height/m	$\text{seeding}/^{\circ}\!\!\mathbb{C}$	$\mathrm{seeding}/^{\circ}\!\!\mathbb{C}$	ature/°C
5200 – 5600 m	5600	-16.8	-17.1	0.3
	5400	-15.7	-16.0	0.3
	5200	-14.7	-15.1	0.4
2600 - 3000 m	3000	-2.2	-2.6	0.4
	2800	-1.2	-1.5	0.3
	2600	-0.1	-0.5	0.4

### 4.2 催化后云中过冷水的分布与演变

因为播撒过程中的播撒速率保持不变,同一种 催化剂在同一部位播撒对云体微物理过程产生的影 响是随着播撒时间的增长逐渐变化的。在下面的分 析中,给出的均是每一种催化剂在每一个催化部位 播撒30 min的计算结果。鉴于在 2600~3000 m 播 撒碘化银的催化效率较小,对其结果不再作详细分 析。

从图 1 可以看到, 当在 5200~5600 m 高度层 播撒碘化银 30 min 后, 1500~3500 m 高度层的云 水在 180~200 min 较未催化时减少 0.05~0.1 g/m<sup>3</sup>。210~230 min 时, 1800~2500 m 高度层的 云水较未催化时的增长可达 0.05 g/m<sup>3</sup>。240 min 后,催化过程产生的冰粒子增长消耗大量云水,云 水含量均小于催化之前。在该高度层播撒液态二氧 化碳 30 min 后, 1500~3500 m 高度层的云水在 180~200 min 亦被消耗 0.05~0.1 g/m<sup>3</sup>。1800~ 2500 m 高度层的云水在 210~220 min 时, 较未催 化时的增长可达 0.05 g/m<sup>3</sup>。在 2600~3000 m 高 度层播撒液态二氧化碳 30 min 后, 云中云水在 170 ~180 min被迅速消耗 0.05~0.15 g/m<sup>3</sup>。180 min 后,1800~5000 m 高度层的云水逐渐发展起来,并 表现出分层结构,存在三个云水含量极大区。在 2200~2600 m 之间的最大值可达 0.7 g/m<sup>3</sup>,在 3500 m 和 4200 m 的最大值分别为 0.2 g/m<sup>3</sup> 和 0.3 g/m<sup>3</sup>。4000 m 以上的云水区随时间逐渐加厚, 到 360 min 时达到 4900 m。



图 1 云水含量的时间-高度剖面分布(单位:g/m<sup>3</sup>):(a)未催化;(b)碘化银在 5200~5600 m 催化;(c)液态二氧化碳在 5200~5600 m 高 度层催化;(d)液态二氧化碳在 2600~3000 m 高度层催化

Fig. 1 Time - height cross section of cloud water content (g/m<sup>3</sup>): (a) No seeding; (b) AgI seeding in 5200 - 5600 levels; (c) Lco<sub>2</sub> seeding in 5200 - 5600 m levels; (d) Lco<sub>2</sub> seeding in 2600 - 3000 m levels

### 4.3 云中水汽场的演变

图 2 中为未催化时和在 2600~3000 m 高度层 播撒液态二氧化碳 30 min 后云中水汽含量的时间 高度剖面。与未催化时相比,2400~6000 m 高度 层之间的水汽从 170 min 开始减少 0.5~2 g/m<sup>3</sup>。 从 180 min 开始,2600 m 和 2900~3000 m 高度层出 现了两个低值区。这两个低值区出现于这次催化中 2200~2600 m 云水高值区的上方。2900~3000 m 的 低值区与 2200~2600 m 云水高值区都开始于180 min, 在时间上具有较好的对应关系。3700 m、4000~ 4300 m 和 4700 m 的水汽含量相对于未催化时先后 出现了三个高值区。4000~4300 m 的高值区在 200 min时发展起来,云中 4000 m 以上的云水区在 220 min 时开始发展起来。这说明催化过程中,水汽 向云水的转化过程对云中过冷水的恢复有促进作用。 云中水汽含量比云水含量大得多,催化后水汽的减少 一方面是因为催化剂的凝华核化过程,另一方面是因 为水汽向云水转化,对云水的恢复作出了贡献。

565

#### 4.4 冰粒子的演变

图 3 给出了未催化、在 5200~5600 m 播撒碘化 银和液态二氧化碳 30 min,以及在 2600~3000 m 播 撒液态二氧化碳 30 min 后云中的冰晶浓度。在 5200~5600 m 对模式云催化后,云中仍有冰晶繁 生过程发生,但是繁生产生的次生冰粒子数减少, 在该高度层播撒碘化银 30 min 后,繁生过程产生 的次生冰粒子浓度为 3 L<sup>-1</sup>,催化过程产生的冰粒 子数在 5000 m 达到最大(14.9 L<sup>-1</sup>)。在相同情况 下,液态二氧化碳催化后,繁生过程产生的最大次



图 2 水汽含量的时间-高度剖面分布(单位:g/m<sup>3</sup>):(a)未催化;(b)液态二氧化碳在 2600~3000 m 高度层催化

Fig. 2 Time – height cross section of vapor content  $(g/m^3)$ ; (a) No seeding; (b)  $Lco_2$  seeding in 2600 m – 3000 m levels



图 3 冰晶浓度的时间-高度剖面分布(单位:L<sup>-1</sup>):(a)未催化;(b)碘化银在 5200~5600 m高度层催化;(c)液态二氧化碳在 5200~ 5600 m高度层催化;(d)液态二氧化碳在 2600~3000 m高度层催化

Fig. 3 Time - height cross section of ice crystal concentration  $(L^{-1})$ : (a) No seeding; (b) AgI seeding in 5200 - 5600 levels; (c) Lco<sub>2</sub> seeding in 5200 - 5600 m levels; (d) Lco<sub>2</sub> seeding in 2600 - 3000 m levels

No. 4 LIU Xiao-Li et al. Numerical Simulation of Distribution and Evolution of Supercooled Liquid Water in ...

生冰粒子浓度减少到 2 L<sup>-1</sup>,催化产生的冰粒子数 最大为 29.4 L<sup>-1</sup>。在 2600~3000 m 播撒液态二氧 化碳 30 min 后,因云水被大量消耗,冰晶繁生过程 不能发生。因为零度层附近的过冷水含量丰富,液 态二氧化碳催化后产生了大量的冰粒子,最大达到 450000 L<sup>-1</sup>。

由图 4a 可以看到,未催化时,云中冰水含量在 100 min 后呈现出明显的准周期变化,周期约为 100 min。冰粒子的浓度和含水量在模式中是两个 完全独立的预报量,模式云发展到 100 min 以后, 冰粒子的数浓度在时间分布上没有出现明显的时断 时续的周期现象,在浓度变化不大的情况下,引起 含水量显著周期性变化的原因只能是冰粒子的长大 过程呈现周期变化<sup>[9]</sup>。本模式假定冰粒子的长大过 程只有凝华和碰并过冷云水两种过程。在零度层附近,过冷水含量丰富,冰粒子碰并过冷水增长。当冰粒子增长到一定程度,自身落速大于垂直上升速度时,冰粒子落到零度层以下,融化成为雨滴。冰粒子在该层增长的过程,即为冰水含量的积累过程,对应冰水含量高值区。而冰粒子落出云体的过程,即为冰水含量的消耗过程,对应冰水含量的低值区。可见,冰水含量的周期分布是由冰粒子碰并过冷水引起的。云体被催化后,云中冰粒子数浓度增大,冰粒子难以长大,冰水含量没有呈现出周期变化。在5200~5600 m高度层播撒碘化银和液态二氧化碳 30 min 后,对云中冰水含量产生的影响非常相似。在200 min 时,2600~3000 m高度层的冰水含量比未催化时减少 0.1~0.2 g/m<sup>3</sup>,2700 m

567



图 4 冰水含量的时间-高度剖面分布(单位:g/m<sup>3</sup>):(a)未催化;(b)碘化银在 5200~5600 m高度层催化;(c)液态二氧化碳在 5200~5600 m高度层催化;(d)液态二氧化碳在 2600~3000 m高度层催化

Fig. 4 Time – height cross section of ice water content  $(g/m^3)$ : (a) No seeding; (b) AgI seeding in 5200 – 5600 levels; (c) Lco<sub>2</sub> seeding in 5200 – 5600 m levels; (d) Lco<sub>2</sub> seeding in 2600 – 3000 m levels

处的冰水含量极大值由未催化时的 1.1 g/m<sup>3</sup>降低 到 0.9 g/m<sup>3</sup>。但是 3800 m 以上的冰水含量在 200 min时较未催化时增长 0.1~0.2 g/m<sup>3</sup>。此后,云 中冰水含量逐渐发展起来,对碘化银催化达到 5600 m 高度,对液态二氧化碳催化达到 5800 m 高度。

与云水含量和水汽含量相似,在 2600~3000 m 播撒液态二氧化碳 30 min 后,云中冰水含量也呈现 出分层现象。在 2800~3400 m 和 3600~4000 m 之 间各存在一个高值区,最大值均达到 1.4 g/m<sup>3</sup>。在 4800 m 处也存在一个值为 0.6 g/m<sup>3</sup>的高值区。

### 4.5 催化过程对雨滴谱的影响

图 5、6 分别给出了未催化时和在 5200~5600 m

高度层播撒液态二氧化碳 30 min 时,210 min 和 240 min 云中雨滴谱的演变。210 min 时,由于云 中冰晶浓度大幅度增大,冰粒子难以长大,模式云 中的雨滴浓度较未催化时减少 73%。到 240 min 时,云中雨滴浓度较未催化时增加了 309%。催化 过程使得雨滴浓度先减小后增大,反映在微物理过 程上就是催化产生的冰粒子逐渐长大的过程。模式 云被催化后,云中产生大量直径和落速均较小的冰 粒子,这些冰粒子因为数目较多,增长过程变慢, 可以落出云体的冰粒子数目减少,使得 210 min 时 的雨滴浓度减小。随着冰粒子的增长,在 240 min 时,可以落出云体的冰粒子数目增多,则该时刻雨



图 5 未催化时各高度层的雨滴谱(单位: m<sup>-3</sup>)分布: (a) 210 min; (b) 240 min。等值线表示各档雨滴直径对应的雨滴浓度 Fig. 5 Raindrop size distribution (m<sup>-3</sup>) without seeding at (a) 210 min and (b) 240 min. The contour is the raindrop concentration





滴浓度增大。

## 5 结论

(1) 碘化银和液态二氧化碳在 5200~5600 m 的催化效率相当,最大达到 11.1%。液态二氧化碳 在 2600~3000 m 催化后,催化效率明显增大,达 到 14.2%。

(2)液态二氧化碳对云体的降温作用非常微弱,云体最多降温 0.4 ℃。

(3)模式云被催化后,云中云水含量在200 min 较未催化时增长0.05 g/m<sup>3</sup>以上,说明云中过冷水被 消耗后都存在恢复的过程。

(4) 对云体催化后,云中水汽含量减少 0.5~2 g/m<sup>3</sup>,对过冷水的恢复作出了贡献。

(5)模式云被催化后,零度层附近的冰水含量 减少0.1~0.2g/m<sup>3</sup>,随后冰水含量整体增大,且 向更高层发展,达到5800m。

(6)催化过程使得雨滴浓度先减小后增大,雨 滴浓度在 210 min 时较未催化时减少 73%,在 240 min 时较未催化时增加了 309%。

### 参考文献 (References)

[1] 胡志晋. 层状云人工增雨机制、条件和方法的探讨. 应用气 象学报,2001,12(增刊):10~13

Hu Zhijin. Discussion on mechanisms, conditions and methods of precipitation enhancement in stratiform clouds. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 2001, **12** (Suppl): 10~13

[2] 胡志晋,秦瑜,王玉彬. 层状冷云的数值模拟. 气象学报, 1983, **41**(2): 194~203

Hu Zhijin, Qin Yu, Wang Yubin. An numerical model of the cold stratified clouds. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 1983, 41(2): 194 $\sim$ 203

- [3] Fukuta N. Project mountain valley sunshine—Progress in science and technology. J. Appl. Meteor., 1996, 35: 1483~1493
- [4] Bigg E K, Turton E. Delayed effects of cloud seeding with silver iodide. J. Appl. Meteor., 1986, 25: 1382~1386

- [5] Bigg E K, Turton E. Persistent effects of cloud seeding with silver iodide. J. Appl. Meteor., 1988, 27: 505~514
- [6] Ryan B F, King W D. A critical review of the Australian experience in cloud seeding. Bull. Amer. Meteor. Soc., 1997, 78: 239~254
- [7] Fukuta N. Low-level penetration seeding with homogeneous ice nucleant for optimization of the induced microphysics – dynamics interactions. Proc. of 13th Conference on Planned and Inadvertent Weather Modification, Atlanta, 1996b. 164 ~ 171
- [8] 郭学良,黄美元,徐华英,等. 层状云的雨滴谱分档数值模 拟研究. 大气科学, 1999, 23(4): 411~421
  Guo Xueliang, Huang Meiyuan, Xu Huaying, et al. The raindrop category model study on raindrop distribution of stratiform clouds. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 1999, 23(4): 411~421
- [9] 郭学良,黄美元,徐华英,等. 层状云降水微物理过程的雨 滴分档数值模拟. 大气科学, 1999, 23(6): 745~752
  Guo Xueliang, Huang Meiyuan, Xu Huaying, et al. Rain category numerical simulations of microphysical processes of precipitation formation in stratiform clouds. *Chinese Journal* of Atmospheric Sciences (in Chinese), 1999, 23(6): 745~ 752
- [10] 刘晓莉,牛生杰,郭学良,等. 层状云中冰晶繁生过程对降水影响的数值模拟. 气象科学,2006,已录用 Liu Xiaoli, Niu Shengjie, Guo Xueliang, et al. Numerical simulation researches on the effect of ice crystal multiplication on stratiform clouds and precipitation. *Scientia Meteorologica Sinica*, 2006 (in press)
- [11] Chen C S, Orville H D. The effects of carbon black dust on cumulus-scale convection. J. Appl. Meteor., 1977, 16: 401~412
- [12] Hsie E Y, Farley R D, Orville H D. Numerical simulation of ice-phase convective cloud seeding. J. Appl. Meteor., 1980, 19: 950~977
- [13] Niu Shengjie, Sun Zhaobo, Fan Shuxian. Observational study on the microphysical structures of rainfall-producing stratiform clouds. 14th International Conference on Clouds and Precipitation, Italy, 2004
- Pruppacher H R, Klett J D. Microphysics of Clouds and Precipitation. Kluwer London: Academic Publishers, 1978. 448~463