黄河上游河曲地区对流云催化增雨的 数值模拟研究*

王 宏^{1,2)} 雷恒池²⁾ 李书严²⁾ 德力格尔³⁾
李仑格³⁾ 肖稳安⁴⁾ 洪延超²⁾ 黄美元²⁾
1) (中国气象科学院数值预报基地,北京 100081)
2) (中国科学院大气物理研究所中小尺度部,北京 100029)
3) (青海省气象局人工影响天气办公室,西宁 810001)
4) (南京气象学院,南京 210044)

摘 要 应用中国科学院大气物理研究所开发的三维对流云模式,对青藏高原河曲地区 强对流云的催化增雨效果及催化云的动力特征、微物理机制进行了模拟研究。模拟结果显 示:黄河上游河曲地区的对流云具备一定的催化潜力。如果催化时机、部位选择适当,降

水总量增加有望达到 30%~50%,催化所产生的动力效果比较显著。催化剂的加入使得云 中凝华潜热释放量增加,上升气流加强,云顶升高,云水平尺度也有所加大,地面降水区 域扩大,降水时间延长。由于云中冰晶大量生成,导致过冷云水、雨水减少,暖雨过程迅 速减弱,云中霰和冻滴量增多,其融化过程加强引起的降水增加远远超过了暖雨量的减 少,总的增雨效果比较显著。敏感性实验表明,催化高度对增雨效果的影响最为显著,高 于某一催化高度,有可能产生增雨防雹的好效果;低于某一催化高度,则会在防雹的同时 使地面降水减少。对流云早期催化的增雨效果较好。一定范围内催化剂量的变化对增雨量 影响不大,小剂量催化也有可能达到较好的增雨效果。 关键词:云模拟;动力特征;微物理机制;催化增雨

文章编号 1006-9585 (2004) 04-0619-12 中图分类号 P481 文献标识码 A

1 引言

近年来黄河流域因严重干旱而导致的黄河断流、生态环境恶化等问题日益引起人 们的关注。黄河自发源地沿阿尼玛卿山南麓东流,在甘肃省的玛曲(或称河曲)地区 附近沿山脚拐弯而折向西。河曲地区是青藏高原年降水量最多的区域,黄河汇水量 53%来自这一区域^[1]。为解决黄河水的问题及黄河上游生态环境保护问题,青海省人 工影响天气办公室从 1997 年开始在黄河上游河曲地区开展了专项的人工增雨作业试 验。河曲地区地处青藏高原的东南部,是全国对流云出现最频繁、发展最旺盛的地区 之一,尤其夏季的 6~8 月几乎都是对流降水。该地区位于海拔 3 000 m 以上,使得这 一地区的对流云有其独特的动力特征和微物理结构,如,零度层距地面近,云顶高度 低和云层薄;云底温度低,暖云层薄,暖雨过程弱;以冷雨过程为主且冷雨过程也弱;

2003-07-24 收到, 2004-10-20 收到再改稿

* 青海省人工影响天气办公室"黄河上游人工增雨技术研究"课题资助



强对流云的地面气温偏低,降水强度小,云顶冰晶化明显。对此,王宏等[1]已进行了 模拟研究并与观测资料及其他地区作了对比分析。

对于产生于高原地区且以冷云过程为主的对流云,其催化增雨的可行性如何,增 雨潜力有多大,引晶催化的机制又是怎样的,目前国内的研究还非常少。本文在文献 [1] 工作的基础上,对该地区对流云催化增雨的可行性及其机理进行了模拟研究。

模式和资料介绍 2

本文所用模式为中国科学院大气物理所孔凡铀等[2~4]发展的三维完全弹性对流云模 式,洪延超^[5]对模式的微物理过程进行了改造,增加了 AgI 催化所发生的物理过程。 该模式的动力框架采用 Klemp-Wilhelson 的完全弹性原始方程组。采用开放侧边界, 海绵吸收上边界。模拟域随对流单体质心移动,模式包含了水汽(Q,)、云水(Q,)、雨水 $(Q_r)、冰晶(Q_i)、雪(Q_s)、霰(Q_g)、冻滴(Q_i)、冰雹(Q_h)等8种水物质量及其相互转化$ 的主要微物理过程,微物理过程采用双参数谱。模式的控制方程组如下:

$$\begin{aligned} \frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}t} + c_p \overline{\theta_v} \frac{\partial \pi}{\partial x} &= D_u, \\ \frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t} + c_p \overline{\theta_v} \frac{\partial \pi}{\partial y} &= D_v, \\ \frac{\mathrm{d}w}{\mathrm{d}t} + c_p \overline{\theta_v} \frac{\partial \pi}{\partial z} &= g \left(\frac{\theta'}{\overline{\theta}} + 0.\ 608\ Q_v' - Q_t \right) + D_w, \\ \frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t} &= D_{\theta} + S_{\theta}, \\ \frac{\mathrm{d}M}{\mathrm{d}t} &= \frac{1}{\overline{\rho}} \frac{\overline{\partial \rho} V_M M}{\partial z} + D_M + S_M, \\ \frac{\mathrm{d}\rho}{\mathrm{d}t} + \rho \nabla \cdot V &= 0, \\ \frac{\mathrm{d}\pi}{\mathrm{d}t} + \frac{\overline{c}^2}{c_p \overline{\theta_v} \overline{\theta_v}} \frac{\overline{\partial \rho} \overline{\theta_v} U_J}{\partial X_J} &= -\frac{R_d}{C_v} \pi \frac{\partial U_J}{\partial X_J} + \frac{c^2}{c_p \theta_v^2} \frac{\mathrm{d}\theta_v}{\mathrm{d}t} + D_\pi, \end{aligned}$$

其中, $Q_i = Q_i + Q_i + Q_i + Q_i + Q_i + Q_i$ 为液态、固态水总比含水量。D 为次网格尺 度混合项,S为微物理过程源、汇项; $M = [Q_x, N_x], Q$ 为各种粒子的比含量,N为 比浓度, 下标 x 代表微物理过程的 8 种水物质和催化剂; π 为无量纲气压的扰动项; ρ 为密度; θ_v 为位温;U为风速;C_v为定容比热;模式的预报量有u、v、w、 θ 、 π 、 Q_x 和 N_x ; X_1 为三维坐标标号,对应 U_1 为 u、 v、 w, X_1 为 x、 y、 z。其余为常见符 号。

自模式发展以来,经过不断改进^[5,6],已成功地应用于不同地区的积云数值模拟和

防雹催化实验^[1,7~10]。因为河曲没有探空资料,本文用河曲南部大约 60 km 的(四川)

红原地区 1999 年 7 月 6~15 日 13:00 的加密探空资料,并用河曲人工影响天气作业点

的地面观测进行订正作为河曲的探空使用,模式以湿热泡启动,初始扰动温度为

2.0°C。

621

3 催化增雨的模拟结果及讨论

3.1 催化概况

首先本文对河曲 1999 年 7 月 6~15 日的对流云进行了人工催化实验。催化参数的 选取为: AgI 100 g; 加入催化剂时间为模式启动后的第 8 min; 催化高度取 5 km; 催 化部位的中心选在给定催化高度上最大上升气流处; 催化区域是在以此为中心, 沿东 西、南北方向各 1 km, 垂直方向 0.5 km 的长方体内。以下如不进行特别说明, 催化 参数均采用上述值。6~15 日催化实验的结果见表 1。

s toi	É	1然云	傄	K久 - レ + 治 + m - 目 - / 0/	
77-191]	降水总量/t	降水强度/mm h⁻¹	降水总量 /t	降水强度/mm h ⁻¹	陣小增加重 / 70
7.6	47	1.8	54	2.1	15
7.7	87	1.5	130	2.6	50
7.8	170	3, 7	246	5. 0	45

表 1 6~15 日对流云催化结果

7.9	81	4.1	124	3.4	35
7.10	118	3. 2	150	3. 7	27
7.11	272	7.6	417	9.0	53
7.12	869	25	1215	27	39
7.13	457	13.1	499	13.5	9
7.14	312	9.8	460	9.9	47
7.15	106	3.5	152	4.1	43

可以看出,总体上 6~15 日的对流云催化均取得了很好的催化增雨效果,催化增雨量大多在 30%~50%之间,平均达到 37%。增雨效果最好的 7 月 11 日为 53%,最差的为 7 月 13 日也达到了 9%。可见从数值模拟结果来看,黄河上游河曲地区(以河曲为代表)的对流云具有较大的人工增雨潜力。由于表 1 中自然云和催化云的地面降水量相差不大,可见降水总量的增加主要是靠地面降水的区域增大或时间延长而形成,这在后面的个例分析中将有进一步的阐述。

3.2 催化增雨机制分析

万方数据

以上的催化概况分析从数值模拟的角度探讨了河曲地区对流云催化增雨的可行性 和可能达到的增雨效率。为了更加详细地研究该地区对流云的增雨机制和催化过程, 我们对 6~15 日 10 个对流云个例发生的大尺度天气背景、探空曲线、动力过程和微物 理转化过程进行了分析研究,选出了最具代表性的 7 月 11 日,将自然云和催化云进行 了比较详细的对比分析,以期初步建立该地区对流云催化机制模型。 3.2.1 动力效应 表 2 为自然云和催化云部分动力特征参数。从表 2 和表 1 可以看出,自然云发展过 程中,在 15 min 时,云发展成熟,云顶高度为 8.25 km,上升速度在此之前达到最大 值 17.45 m s⁻¹。18 min 时出现地面降水,降水持续 18 min,降水面积为 667 km²,最

表 2 部分动力特征参数

	$W_{\rm max}/{ m m~s^{-1}}$	$C_{ m max}/ m km$	$T_{\rm max}/{ m min}$	$\Delta t/\min$	S/km ²
自然云	17.45	8.25	15	18	667
催化云	18.83	8.75	18	26	837
注:Wmax为气流量	员大上升速度,C _{max} 为	最大云顶高度,T,	nax 为最大云顶高度h	出现时间, ∆t 为降	水持续时间, S 为
地面降水区域。					

大地面降水量 7.6 mm。降水总量为 272 kt, 其中, 降雨总量 27 kt, 降雹总量 34 kt。

第8 min 在5 km 高度加入 AgI 100 g 进行催化后,由于催化时间较早,上升速度 在相同时间达到最大,其值增加到 18.83 m s⁻¹,云成熟期推迟至 18 min,云顶最大值 达到 8.75 km。19 min 地面降水开始,降水持续 26 min,降水面积增至 837 km²,地面 最大降水量为 9.2 mm,降水总量为 417 kt,比自然云增加降水 53%,其中降雨总量 99 kt,增加 72 kt (267%),降雹总量 18 kt,减少 47%。

从上升速度随时间的变化曲线(图1)和云顶高度随时间的变化(图2)可以更为 直观地看出,加入催化剂后的10min之内,云中上升气流有明显的加强。最大增加值 为1.4ms⁻¹。上升气流的加强导致积云爆发性增长,云厚在16min到30min内比自

然云普遍增加 0.5~1 km。

相变潜热是积云对流的主要能量来源。图 3 给出了自然云和催化云相变潜热随时 间的变化曲线。因为冻结潜热值小了 1~2 个量级,对积云对流的贡献很小,所以这里 不做分析。从图 3 中可以看出云中加入催化剂后,凝结、凝华和总的潜热释放都有明 显增加,其中凝华潜热的增量远大于凝结潜热的增量,而且增加的速度更快,持续时 间也更长。在 12 min 以前,凝结潜热几乎没有什么变化,加入催化剂后,云中上升气 流的增强完全得益于凝华潜热的释放。12 min 以后,凝结潜热逐渐比自然云有所增加, 但其增量仍较凝华潜热小且持续时间短。对照自然云和催化云还可以看出,自然云的 潜热释放以凝结潜热为主,而催化云却是凝华潜热的作用大于凝结潜热。



20 20 60 0 40 **60** 40 0 时间/min 时间/min 图 自然云和催化云最大上升速度随时间的变化 自然云和催化云的云顶高度随时间的变化 图 2 实线为自然云,虚线为催化云 实线为自然云,虚线为催化云



从以上分析可以看出,云中加入催 化剂以后,相变过程的加强,特别是凝 华过程的加强为积云爆发性增长提供了能 量, 使得云中上升气流明显加强, 云层加 厚,云的水平尺度(图略)、降水区域、 降水量等均有不同幅度的增加。动力催化 的效果比较显著。

3.2.2 微物理过程的变化

除了动力过程, 云中各种粒子之间 的微物理转化过程也从另一方面清晰地 描述了这次催化增雨的机制。图 4 分别 给出了自然云和催化云中相应粒子质量 产生率的时变曲线。图 4a 显示催化剂的 加入使冰晶生成的时间提前,产生率大 幅度提高,其时间变化与前面分析的水





汽凝华过程表现出非常一致的趋势,这一现象说明冰晶的增加可能主要由水汽凝华过 程加强造成。从图 4b 可以看出自然云中霰的转化主要由两部分组成, 25 min 以前是霰 碰并云水增长, 25 min 以后靠碰并冰晶增长。催化云中,由于冰晶产生时间提前,生 成率提高,霰碰并冰晶的过程提前,并且转化率也明显提高,同时霰碰并云水过程也 有较大加强,因而导致霰的生成率显著增加。图 4c 显示,自然云和催化云中雨水的瞬 时转化率均出现两个峰值,其中第一个峰值对应于暖雨过程,第二个峰值主要是霰、 冻滴和冰雹融化形成雨水的冷雨过程。可以看出,在自然云的雨水形成机制中,暖雨 过程雨水的转化率峰值高,维持时间短,冰相粒子转化率小,但维持时间长。以上两 过程对形成降雨的作用基本相当。而催化云中冰晶的大量增加导致过冷云水、雨水减 少,暖雨过程迅速减弱;霰、冻滴增加使冰相粒子融化为雨水的过程加强,其中霰融 化形成的降雨占降雨总量的绝大部分。由于催化云中霰和冻滴粒子的大量增加,"争食 过冷水现象"使得两种粒子向冰雹的转化减弱,冰雹的生成率明显降低。

由此可以看出,在该次对流云的人工催化过程中,冷云过程明显加强,暖云过程 显著减弱,冰相粒子的增加及液态降水中冷雨过程的加强是导致增雨的主要原因。这 也是该地区对流云能够同时达到增雨防雹的主要原因,对此将在下面的论述中进一步 分析。

3.3.3 催化云中各粒子含水量场

万方数据

自然云和催化云中冰晶含水量场的变化(图5)与以上微物理转化过程的变化互为 补充,从另一个角度描述了这次强对流云催化增雨过程。第8 min 向云中加入催化剂 テ由冰島的今水島(図 5)在 9~15 min 刍剧增加・覆盖区域扩大,此时自然云和

种状态一直维持到 30 min 以后。催化云中含水量(图 7) 18 min 开始也有所例	成弱,但
明显增长,到21 min 时,自然云中心值仅为0.5 g m ⁻³ ,而催化云却达到2 g 1	n ³ ,这
程度仍强于自然云。由于冰晶含水量的持续增长, 霰含水量(图 6)从 15 mir	ı 也出现
催化云的冰晶化程度差别最大,之后冰晶含水量的这种差异有所减缓,但云中	□冰晶化
后,云中你皕的召水重(图 5) 任 5~15 mm 忌剧增加; 復益区域 7 八, 此时日	コムシロル



图 4 微物理过程中各水成物的质量瞬时产生率

(a)冰晶; (b) 霰; (c) 雨; (d) 雹

自然云:Qi00(冰晶),Qr00(雨水),Qg00(霰),Qh00(冰雹),CLig00(霰碰并冰晶增长),CLcg00(霰碰并 云水增长),MLgr00(霰融化为雨水),VDvi00(水汽凝华为冰晶),CNgh00(霰自动转化为雹),CNfh00(冻滴 自动转化为雹);催化云:Qich(冰晶),Qrch(雨水),Qgch(霰),Qhch(冰雹),CLigch(霰碰并冰晶增长), CLcgch(霰碰并云水增长),MLgrch(霰融化为雨水),VDvich(水汽凝华为冰晶),CNghch(霰自动转化为 雹),CNfhch(冻滴自动转化为雹)

变化不大(图略)。直到21 min 云水含水量迅速降低且区域也明显缩小,自然云和催化 云的差别最为明显。由于该地对流云以冷雨过程为主^[5],云中雨水含量原本就很低,

催化剂的加入使得云中雨水含量更低且覆盖区域更小(图8)。与自然云相比,催化云中冰雹含水量略有降低,但变化不大(图略)。









图 5 自然云 (左) 和催化云 (右) 冰晶的比含水量 (单位: g m⁻³)

催化的敏感性实验 4

已有的研究表明,在对流云的人工催化过程中,催化部位、催化时机和催化剂量 的选取对云催化的效果和地面降水状况影响非常大。本文对7月6~15日的对流云都 作了敏感性实验,在分析了7月6~15日所有个例的宏观动力特征、微物理过程和催 化增雨机制等基础上,选取对该地区对流云最具普遍意义的1999年7月11日,分别对 高炮的不同发射仰角、催化时机和催化剂量进行了敏感性实验,其中以催化高度的变 化来代替高炮发射仰角的变化。

对该个例不同催化高度的敏感性实验(表 3)表明,随着催化高度从 3 到 7 km 不

	未催化	3 km	4 km	4.5 km	5 k m	5.5 km	6 km	7 km
降水总量 /10 ³ t	272	201	169	377	429	408	374	333

表 3 不同催化高度的催化结果

降雹总量 /10 ³ t	34	18	11	15 ·	18	19	23	35
冻滴总量/10 ³ t	116	97	106	119	119	131	129	119
降霰总量/10 ³ t	96	70	34	170	181	187	164	146
降雨总量/10 ³ t	27	16	19	72	99	72	57	33

万方数据

9卷



万方数据

图 6 自然云 (左) 和催化云 (右) 霰的比含水量 (单位: g m⁻³)



图 7 自然云 (左) 和催化云 (右) 云水的比含水量 (单位: g m⁻³)





图 8 自然云 (左) 和催化云 (右) 雨水的比含水量 (单位: g m⁻³)

效果为防雹减雨,降水总量的减少以霰和冰雹的减少为主。 为了分析这一现象的原因,表4给出了自然云以及4和5km高度催化微物理转化

万方数据

量的累计值。由此可以看出,在5 km 高度催化,冰晶凝华(VDvi)和核化过程(NUvi)的加强引起云中冰晶总量(Qi)大幅度增加,而冰晶粒子的增多使得霰胚碰并冰晶 增长过程(CLig)显著加强,同时霰胚碰并云水增长过程(CLcg)也加强,这是霰 (Qg)累计生成量增加的两个主要因素。云中霰胚的增加,一方面使霰的融化过程 (MI_gr)加强从而造成雨水总量(Qr)显著增加;另一方面霰胚争食使得向雹的转化 过程(CNgh,CNfh)减弱,云中冰雹生成量(Qh)减少。而在4 km 高度催化则相 反,冰晶核化和凝华过程减弱,因而云中冰晶生成量减少,导致霰胚碰并冰晶增长过 程减弱,霰的总生成量明显降低,最终霰融化为雨水和转化为雹的总量也随之减少。 由以上分析可知,不同高度催化所引起的冰晶凝华和核化过程的减弱或加强是地面无 灾降水能否增加的关键。

分析催化高度在 4 和 5 km 粒子转化累积量发现,对于这两个催化高度,虽然增雨 的效果截然相反,但冰雹量都是减少的,暖雨过程(Acr+CLcr)也都是减弱的,这就 是上述多数催化个例防雹以减少地面降水为代价的主要原因^[15]。而对于该地区的对流 云,决定其降水总量的不是暖雨过程,而是冰相粒子霰、冻滴和由此融化形成的降水。 由于催化作用使这些无灾固态降水和冷雨过程降水的变化远远超过了暖雨过程,因而

	Qi	VDvi	Nuvi	Qg	CLig	CLcg	Qh	CNgh	CNfh	Qr	Acr ⁺ CLcr	MLgr	MLfr
自然云	944	832	111	414	157	160	36	23	5	127	81	27	19

表 4 不同催化高度的累计转化量

kt



5 km 及以上催化出现了防雹的同时地面降水总量也增加的理想效果。

表 5 为不同催化时间的催化结果,从中可以看出,催化时机的选择对催化增雨的效果也有很大影响。选择在云发展初期(模式启动 8~10 min)催化,增雨效果比较明显;在云成熟之后催化,随着时间的推迟,增雨防雹的效果越来越差;任意时刻催化,只要降水增加,都是以雨和降霰量的增长为主。

由于催化剂造价比较昂贵,催化剂和剂量的选择一直是制约人工影响天气作业的 重要因子,而目前对于不同剂量催化效果的检验和研究还非常少。本文分别对于小剂 量(50g以下)、中等剂量(50~100g)和大剂量(150~300g)的催化实验(表6) 表明: AgI量18g以下时,对增雨基本没有影响,但已起到了很好的防雹效果;30~ 50g的小剂量催化可以达到将近40%的降水增量,同时达到最好的防雹效果;50~150 g中等剂量催化效果比小剂量略有提高,但降水量提高较小;超过150g的大剂量催化 降水总量明显提高,加入碘化银250g时,降水总量比自然云增加62%;而在超过250 g以后降水总量基本不变甚至反而稍有减少。由此可见,随着催化剂量的增加,降水总 量并不成线性增长。

由以上对7月11日催化高度、催化时机和催化部位的模拟研究发现,催化部位的

选取最为重要,4.5 km 以上催化,增雨效果显著,低于4.5 km 催化,地面降水总量可 能反而减少。对流云早期催化能取得最好的增雨效果。非常有意义的是在一定催化剂 量范围内,降水增量对催化剂量的敏感度较低,小剂量上限附近催化即可产生较好的 增雨效果,这一结果为该地区人工影响天气取得较大投入产出比的可能性提供了一定 参考。无论采用何种催化参数,增加的降水都是以无灾降霰和降雨的增加为主,而且 有可能增雨同时防雹。其他时间的对流云催化结果与7月11日的结果非常相似。

	未催化	6 min	8 min	10 min	12 min	14 min	16 min	18 min
降水总量 /10 ³ t	272	281	429	328	254	285	287	283
降雨总量/10 ³ t	27	34	99	63	29	34	31	29
降霰总量 /10 ³ t	96	102	181	144	96	104	107	105
冻滴总量 /10 ³ t	116	125	119	100	104	119	117	116
降雹总量/10 ³ t	34	20	18	20	29	28	32	33

表 5 不同催化时间的催化结果

表 6 不同剂量的催化剂催化结果

	未催化	18 g	30 g	50 g	70 g	90 g	100 g	150 g	200 g	250 g	300 g
降水总量 /10 ³ t	272	284	388	396	393	406	417	429	428	441	435
降雨总量/10 ³ t	27	52	92	94	93	98	99	101	100	104	104
降霰总量 /10 ³ t	96	95	156	167	165	173	181	190	190	199	198
冻滴总量/10 ³ t	116	123	129	119	118	117	119	121	121	120	116
降雹总量/10 ³ t	34	16	16	17	18	17	18	17	17	18	17

5 结论和讨论

通过应用强对流云模式对黄河上游河曲地区对流云进行人工催化模拟试验,对其 动力特征和微物理机制作如下几个方面的总结:

(1) 黄河上游河曲地区的对流云可能具备一定的催化潜力,如果催化时机、部位 选择适当,地面降水总量增加有望达到 30%~50%,并同时起到防雹的效果。

(2)催化所产生的动力效果比较显著,催化剂的加入使得云中凝华潜热释放量明显增加,云中上升气流明显加强,云顶有所升高,云的水平尺度也有所增加。地面的降水区域明显增大,降水时间延长,地面降水总量增加。

(3)向云中加入催化剂后,云中冰晶大量生成导致过冷云水、雨水减少,冰相粒子增加。暖雨过程迅速减弱,地面无灾固态降水霰和冻滴增加,冷雨过程加强,由此产生的地面降水量远远超过暖雨量的减少。总的增雨效果比较明显。

(4)催化部位对增雨效果影响最大,4.5 km 及以上高度催化,地面无灾固态降水和降雨量同时增加,降雹减少,达到了增雨防雹的理想效果;4.5 km 以下催化,则出

现了减雹同时地面无灾降水量减少的结果。催化时机最好选在对流云发展的初期,一定范围内催化剂量的增加对增雨效果影响不大。小剂量催化也能达较好的增雨效果。

最后需要说明的是,以上分析仅仅是针对1999年7月6~15日的10个个例,因此 对该地区该时段对流云特征的代表性有待进一步论证。

参考文献

- 1 王宏、雷恒池、德力格尔等,黄河上游地区强对流云特征的模拟分析,气候与环境,2002,7(4),397~ 408.
- 2 孔凡铀、黄美元、徐华英,对流云中冰相过程的三维数值模拟 I:模式建立及冷云参数,大气科学,1990,14
 (4),441~453.
- 3 孔凡铀、黄美元、徐华英,对流云中冰相的三维数值模拟 II. 繁生过程作用,大气科学,1991,15(6),78 ~88.
- 4 孔凡铀、黄美元、徐华英,冰相过程在积云发展中的作用的三维数值模拟研究,中国科学(B辑),1992,35 (6),78~88.
- 5 洪延超,三维冰雹云催化数值模式,气象学报,1998,**56**(6),641~651.
- 6 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.
- 7 吴翠红、杨洪平、万玉发, "98・7"鄂东南持续特大暴雨的分析,暴雨灾害(三),北京: 气象出版社, 1999,150~157.
- 8 雷恒池、王宏、胡朝霞、肖辉、黄美元,1998 年 7 月 21 日武汉暴雨小尺度动力特征的数值模拟研究,大气科 学,2002,**26**(5),647-662.
- 9 李宏宇、胡朝霞、肖辉等,人工防雹实用催化方法数值研究,大气科学,2003,27(2),217~222.



The Seeding Experiments of Severe Convective Clouds **Occurred** in the Tibetan Plateau

Wang Hong^{1, 2)}, Lei Hengchi²⁾, Li Shuyan²⁾, Deligeer³⁾, Li Lunge³⁾ Xiao Wenan⁴⁾, Hong Yanchao²⁾, and Huang Meiyuan²⁾

- 1) (Research Center for Numerical Prediction Research, Chinese Academy of Meteorological Science, China Meteorological Administration, Beijing 100081)
- 2) (Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)
- 3) (Meteorological Bureau of Qinghai Province, Xining 810001)
- 4) (Nanjing Institute of Meteorology, Nanjing 210044)

Using a 3-D convective cloud model with fully elastic primitive equations, a series of seeding Abstract experiments are done on convective clouds occurred in the Tibetan plateau. The results indicate that the convective clouds occurred in the Tibetan plateau have larger latent ability of seeding precipitation enhancement. Less dosage catalyst of AgI may increase 30% - 50% of precipitation when seeding location

and opportunity is correct. After convective clouds are seeded, the release of latent heat by deposition process, updraft and top of cloud increase distinctly, the horizontal scale and rainfall area of clouds are also enlarged. The number of Ice crystals increased greatly and thus lead to icy particles such as graupels and frozen droplets increase while supercooled water and hail decrease. Cold rain process is strengthened and warm rain process become weakened. The increasing of precipitation mainly comes from formation and melting process of graupel.

Key words: cloud model; dynamical characteristics; microphysics mechanism; seeding experiment



