第 28卷第 6期　　南 京 气 象 学 院 学 报　　Vol 28 No 6
2005年 12月　　Journal of Nanjing Institute of Meteorology　　Dec 2005

文章编号: 1000-2022(2005) 06-0763-07

青海秋季对流云降水及催化过程数值模拟研究

房　文[1,2]，　郑国光[2]，　何观芳[2]

(1. 南京信息工程大学 大气科学系, 江苏 南京　210044; 2 中国气象科学研究院, 北京　100081)

摘　要: 利用 CAMS三维对流云模式和青海省河南县秋季外场试验取得的资料, 对自然云的发展演变过程进行了数值模拟试验。进一步就催化时间、催化剂量对增雨效果的影响进行了数值试验。结果表明, 该地区秋季对流云降水主要为冷云降水, 冰晶是霰产生的主要来源, 冰霰自动转化是霰产生的最主要方式, 冰晶与霰的碰并又促进了霰的进一步增长, 霰是云中过冷水消耗的主要因素。人工播撒催化剂应在冰核活化过程大量开始以前进行, 以达到增加冰晶浓度, 消耗过冷云水, 从而增加降水的目的。

关键词: 三维模式; 对流云; 数值模拟

中图分类号: P426 611　　文献标识码: A

青海省位于黄河上游流域地区, 地形、地貌复杂多变, 有高山、平原、盆地、丘陵和冰川, 流域内大体由西倾山、阿尼玛卿山、巴颜喀拉山和松潘草地这 4个较为独特的地貌小区组成。流域平均海拔 4 000 m。当地具有特殊的地理位置和地形条件, 来自孟加拉湾和印度洋上空的暖湿气流及藏东、川西的低空水汽均能到达, 其水汽通量与降水量均为青藏高原同纬度地区的相对大值区。其降水的天气系统主要为高原低涡、西南气流和北方冷空气形成的阵雨天气。

由于青藏高原对我国、亚洲, 甚至对北半球的大气环流演变都有极其重要的影响, 因此, 有关青藏高原地区天气系统的科学分析已经做了很多工作。如 1979年 5—8月进行的第一次青藏高原气象科学试验 (QXPMEX), 1998年进行的第二次青藏高原科学试验 (TIPEX), 两次试验研究了青藏高原地区地面辐射平衡和热量平衡的地理分布特征。1998—2000年, 实施了有组织的人工增雨科学试验。李仑格等[1]分析了黄河上游地区的降水系统; 张国庆等[2]、张加昆等[3]考虑了风场结构、温度场及上升气流的作用, 分析了催化作业的适宜时段及作业位置; 王宏等[4]利用中科院大气所改进的完全弹性三维云模式, 模拟了黄河上游和渭北地区强对流云的发展过程。于达维等[5]利用气科院三维对流云模式模拟分析了当地的对流云降水机制, 并通过数值模拟试验讨论了催化效果。洪延超[6-7]、周玲等[8]利用洪延超等[9]三维双参数冰雹云催化模式模拟研究了陕西旬邑的冰雹云, 指出了在云的发展早期具有前苏联 Sulakvelidze

收稿日期: 2004-04-06; 改回日期: 2004-09-20

基金项目: 国家"十五"科技攻关项目 (2001BA610A-06)

作者简介: 房　文 (1969-), 女, 山东文登人, 硕士, 研究方向: 云雾物理及人工影响天气.

E-mail: fangwen@cams.cma.gov.cn.

(见文献 [10])提出的过冷水累积带的类似结构, 对其及时催化可导致减雹增雨的效果。

2002年 9月国家科技攻关课题“人工增雨技术研究及示范”在青海省河南县进行了外场综合观测, 从取自青海省河南县的探空资料看, 当地海拔高度 3 500 m, 地面气压 667 hPa。在 8 000~ 10 000 m的高空西风风速可达 20~ 30 m/s, 风切变很大。黄河上游人工增雨作业区内以草场、湖泊、沼泽地和山地为主, 基本上没有工业生产活动, 大气中自然冰核较少。

本文采用 CAMS三维对流云催化模式, 其中的微物理方案采用胡志晋等[11]的双参数方案, 预报量包括三维风、温、压、比湿、云水量、云滴谱拓宽度以及雨、冰、霰、雹的比水量和比浓度。在本文模式中包括了霰胚形成的两个过程冰霰转化 (Aig)和云霰转化 (Acg), 还包括了冻滴胚形成的云雨转化 (Acr)、雨滴冻结 (Mrg)、雨冰碰冻 (Cri)等过程以及霰、雹融化 (Mgr, Mhr)和湿增长成雨 (Cih+ Cch- Cwh)等过程。AgI催化过程采用刘诗军的方案[12]。

1 自然云的模拟实验

1.1 参数确定

模式的初始场采用探空资料作为水平均一的理想初始场, 对流启动采用热湿泡扰动方式, 模式的水平格距为 1 200 m, 垂直格距为 700 m; 水平积分范围 50×50, 垂直层数取 30层。模式采用 08: 00在河南县的加密探空资料。在求出自由对流高度后按 $\gamma_d = -0.0095$ ℃/m 的温度递减率订正云下各层的温度。

1.2 敏感性试验

使用不同扰动温度参数对 9月 18日个例模拟其雨强及最大对流上升速度随时间的演变。结果表明, 初始扰动对降雨开始的时间和最大强度都有影响, 扰动越大, 降水越早开始。在扰动温度 $t = 2.0$ ℃时, 降雨强度和总雨量达到最大。扰动温度如果太小, 最大上升速度较小, 不利于启动对流。

1.3 实况模拟试验

采用扰动的中心湿度为 90%, 温度扰动 1.0 ℃, 扰动范围为直径 5个格点, 高度为 1~ 2层, 对 9月 3—21日的天气过程进行了模拟。模拟出的每天降水过程的云底高度, 最大云顶高度等参数见表 1。结果表明, 模式基本上预报出了当天是否有对流云发展, 模拟与实测得到的雷达回波高度比较近似。

表 1 模拟的 9月 3—21日的各种云参数

Table 1 Simulated various cloud parameters from 3rd to 21st September 2002

时期	云底		云顶		最大升	初始回波			降水总量		格点降水	
(月-日)	高度/km	温度/℃	高度/km	温度/℃	速/(m/s)	时间/min	高度/km	温度/℃	雨/kt	雹/kt	雨/mm	雹/mm
09-03	1.5	3.2	12.1	-66	41	21	7.0	-40	436	7.0	8.6	0.2
09-08	1.4	0	8.4	-32	16	33	7.7	-42	3	0.3	0.2	0
09-12	1.0	2.7	10.5	-52	8							
09-14	2.8	-3.8	11.2	-59	21	30	9.1	-45	60	10.4	1.3	0.3
09-16	1.4	1.1	11.9	-63	13	33	9.1	-45	76	0	0.6	0
09-17	1.4	1.0	11.2	-62	12	36	9.1	-45	37	1.0	0.1	0
09-18	0.7	3.3	14.0	-66	15	42	8.2	-43	133	9.3	2.0	0.2
09-19	1.6	-0.2	15.0	-65	14							
09-20	1.8	-1.0	14.0	-63	12	36	7.3	-32	26.5	1.3	0.3	0.17
09-21	1.6	2.0	13.0	-64	32	33	8.4	-45	404	58.0	5	0.2

2　个例模拟

2.1　基本情况

9月 3日有一次较强的降水过程。当天探空显示 0 ℃层位于 1.3 km, 对流凝结高度 1 457 m, 对流上限 18 km, 最大经向风速位于 5.6 km, 达 8 m/s; 5 km 以下垂直风切变 0.000 5 s^{-1}。输入模式进行计算, 得到模拟云的云底高度 2.1 km, 云底温度 3.2 ℃, 结果降雨量 436×10^6 kg, 地面单点最大降水 8 mm。

初始回波于 21 min出现在高度 7 km 处 (图 1), 温度为 - 30 ℃, 回波的形成主要是由于冰相粒子的出现。图 2为 12 min到 42 min云水、雨水、霰的比含水量在 y = 33处的垂直剖面分布, 30 min时回波已接近 10 km, 云顶温度为 - 45 ℃, 回波逐渐向下扩展, 33 min雷达回波及地 (图 1), 地面开始出现明显降水 (图 2), 第 21 min, 云中出现霰。比较霰、冰晶的分布可见, 过冷云水的分布范围较广, 比水量也较大。42 min时雨水的比水量增大, 霰量也达到最大。可以看出 42 min时的 0 ℃层附近的冷区霰的分布与雨水的位置较为吻合, 雨区就在霰区的下方。将 0 ℃层与霰粒、雨水的分布对比, 0 ℃层恰好位于霰区的下部和雨区的上部, 这说明雨水是由霰落入暖区融化形成的。

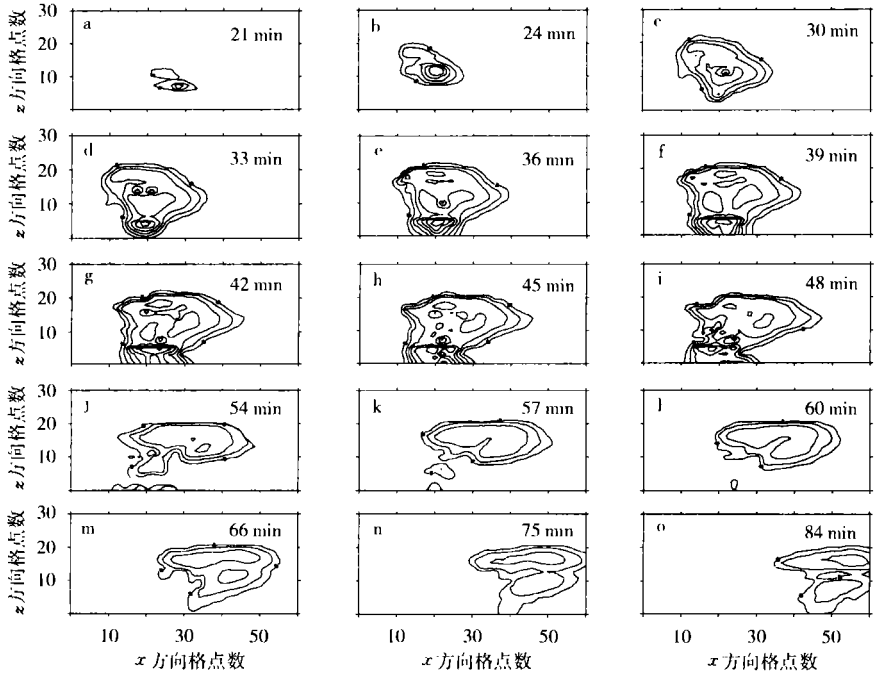

图 1　模拟的雷达回波剖面演变 (21— 84 min, j= 33; 单位: dBZ)

Fig. 1　Cross-sections of simulated radar reflectivity at j= 33 from 21m in to 84 m in(units dBZ)

2.2　模拟的自然云微物理过程的演变情况

图 3为生成霰和霰增长的主要机制随时间的演变, 可以看出, 霰收集云水 (Cτg)一直是霰增长的最主要的机制, 雨滴碰并冰晶 (Cri)由于缺乏过冷雨水而贡献极小, 霰收集冰晶 (Cig)随着冰晶的逐渐增多而增大, 霰的凝华增长 (Svg)随霰量的变化而增减, 贡献一直不大。而冰霰自动转化 (Aτg)虽然提供了最初的霰, 但在霰后来的增长过程中所起的作用不大。

该地区降水形成和消耗的机制很简单, 霰下落到暖区的融化 (Mgr)几乎是雨水形成的唯

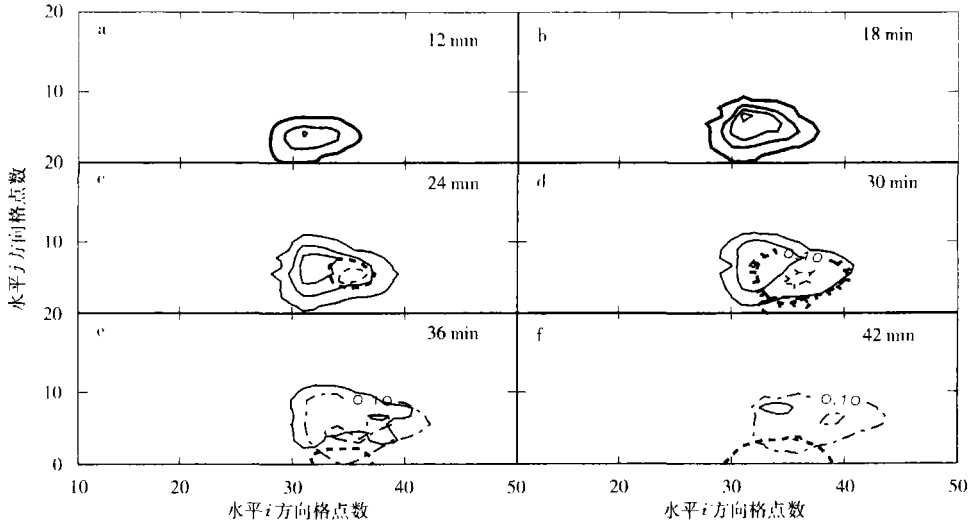

图 2 12—42 min云水雨水、霰的比水含量垂直剖面分布 (y = 33, 单位: g/kg)
(其中实线代表云水; 虚线代表雨水; 划线代表霰)

Fig 2 Cross-sections of cloud water, rain water and graupels at y = 33
(units: g/kg, the black solid line denotes cloud water, the dashed line rain, and the dotted dash line graupel)

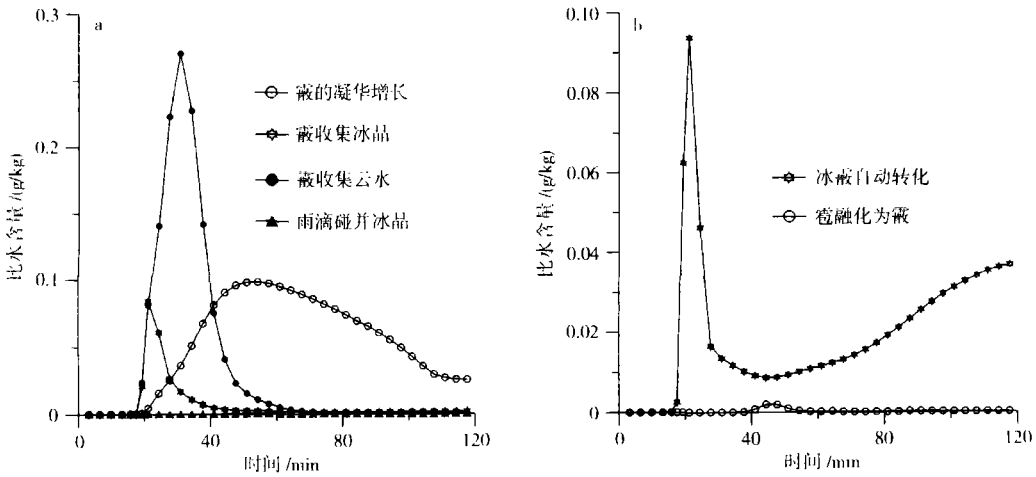

图 3 生成霰及霰增长的 4种主要机制 (a)
及冰霰自动转化和雹融化为霰的过程 (b)随时间的变化

Fig 3 Temporal evolution of four microphysical processes for graupel-forming graupel(a)
and the auto-conversion from ice to graupel and hail-melting-into-graupel process(b)

一机制, 而雨滴的蒸发是雨滴消耗的唯一机制。雨滴收集云水 (Ccr)和云雨自动转化 (Acr)几乎对降水没有贡献。在这个地区对流云降水中雨滴的形成是由于霰下落融化造成冷雨过程, 雨水集中在暖区。过冷云滴的总量在 24 min达到 336×10^6 kg, 40 min后过冷云滴消耗殆尽。降水过程由冷雨过程控制, 降水主要来自于霰、雹的融化。

冰晶是霰产生的主要来源, 冰霰自动转化 Aig是霰产生的最主要方式, 冰晶与霰的碰并 Cig又促进了霰的进一步增长。霰是云中过冷水消耗的主要因素, 云中在 40 min前有大量过冷云水, 过冷雨水几乎没有, 冰晶转化为霰后开始收集云水, 由于云滴尺度较小, 不仅云雨自动

转化量很小, 霰碰并云滴过程中由于冰晶繁生过程 Pci产生次生冰晶也很少。

由以上分析可以知道, 冰晶、云水及水汽条件对霰的生成影响很大。霰粒胚胎主要依靠冰霰自动转化, 从而启动霰对云水的收集过程。降雨主要是由于霰落入暖层的融化, 雨水的蒸发是雨水减少的主要机制。霰的生成又与冰晶密切相关。初始的霰粒主要由冰霰自动转化生成, 在此之后, 霰胚通过收集过冷云水及冰晶生长。冰晶的生成主要是由于自然冰核的核化, 因此, 自然冰核的数浓度对整个降水过程都有影响。由于当地自然冰核较平原地区少, 而在本底情况下, 过冷云水相对充足, 这就为人工播撒冰晶或成冰核, 引导降水云提高降水效率提供了可能。

2 3　催化实验

过冷云水区引入 AgI, AgI在云中播撒的时间和位置与风场、0 ℃层高度以及过冷云水的位置等都有关系。播撒时, 上升气流过大会导致新生长出来的霰粒来不及充分长大就被吹走。播撒的位置要能使冰晶在云内所走的路径较长, 以便能起到充分的催化作用, 同时要保证冰晶不会融化。如可播撒在 0 ℃层以上附近, 并在云中过冷水含量最大处偏下的位置。播撒的位置若位于上升气流辐合区, 将有助于催化剂的向上输送和扩散。因此, 播撒的位置很重要。另外, 播撒的时机也很重要, 播撒过早或过晚也不能达到增雨的目的。

该例中 40 m in以前都存在过冷云水, 播撒 AgI可以影响自然云的发展进程。云水总量在 21 m in达到最大, 中心在 5. 6 km, 温度为 - 17. 5 ℃, 此时云中有最多过冷云水可供利用。

取剂量为 8×10^6 个 /kg, 采用地面 AgI发生器, 在不同时间播撒相同剂量的 AgI, 在 12 m in的播撒达到了最大的降水和消雹效果 (表 2)。 15 m in时播撒有一些增加降水的效果, 18 m in以后基本没有增雨效果甚至还减少降水。在空中播撒 AgI, 以 18 m in时播撒效果为最好。以距离地面 3. 5km处播撒增雨效果最好 (即 z方向格点数 $k=5$处)。

表 2　2002年 9月 3日青海省河南县对流云催化降水模拟结果

Table 2　Calculated results of convective cloud seeding in Henan country, Qinghai province, Sept 3, 2002

	时间 /m in	剂量 /(个 /kg)	温度 /℃	x格点范围轴	y轴格点范围	次数	上升气流 /(m /s)	地面降水		格点降水	
								雨 /kt	霰 /kt	雨 /mm	霰 /mm
自然云							24	508. 5	18. 3	8. 9	1. 28
AgI播云	12	8×10^6	地面	30~ 32	32~ 34	2	24	673. 4	20. 8	11. 1	0. 66
	15	8×10^6	地面	30~ 32	32~ 34	2	24	579. 6	16. 7	9. 9	0. 52
	18	8×10^6	地面	30~ 32	32~ 34	2	24	506. 8	14. 2	9. 1	0. 53
	18	8×10^6	$k=5$	30~ 32	32~ 34	2	24	701. 3	16. 8	8. 8	0. 42
	21	8×10^6	$k=5$	30~ 32	32~ 34	2	24	536. 9	12. 8	8. 5	0. 37
	18	8×10^6	$k=4$	30~ 32	32~ 34	2	24	661. 6	15. 8	8. 8	0. 40

下面是 18 m in时向云中过冷水密集区播撒 AgI的模拟结果。播撒剂量为 8×10^6个 /kg, 播撒位置 $i=30$~ 32, $j=32$~ 34, $k=5$, 位于云中过冷水含量最大处偏下, 该位置环境温度为 - 5. 5℃, 上升速度达 24 m /s, 云体还在发展过程中播撒的 AgI迅速核化。由于本个例对流云几乎完全是冷雨过程, 降水的形成几乎完全来自霰粒的融化, 对比这一微物理过程的变化率可见, 播撒云的霰粒融化速率与自然云相比有很大提高 (图 4), 而霰量增加是由于播撒导致冰霰

自动转换过程增强。对降水消耗的主要机制雨滴的蒸发播撒云要多于自然云(图 5),雨强的峰值被推迟并有大幅度增加,后期的雨强基本上与自然云持平,降水的地面分布变化不大。

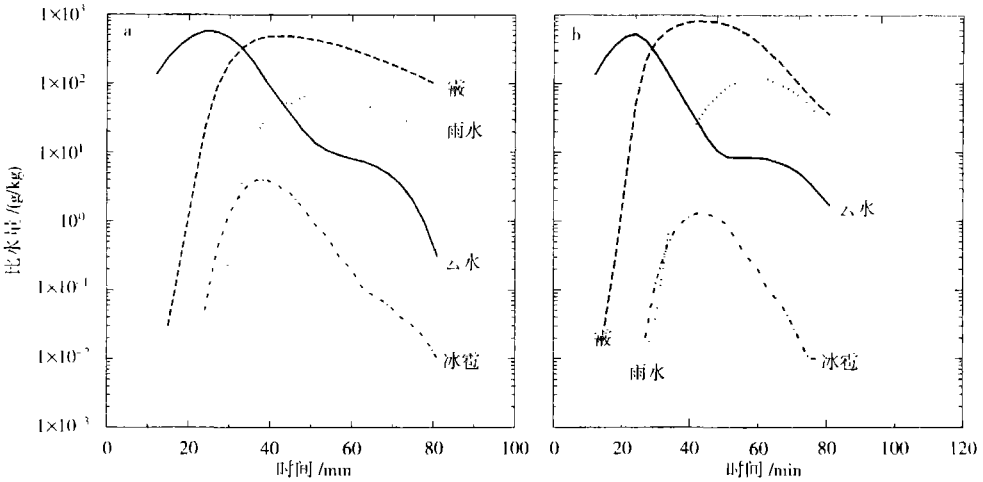

图 4 自然云(a)和催化云(b)中云水、雨水、霰、冰雹总量随时间的变化

Fig 4 Temporal evolution of the total amounts of cloud water, rainwater, graupel and hail in natural cloud(a) and seeded cloud(b)

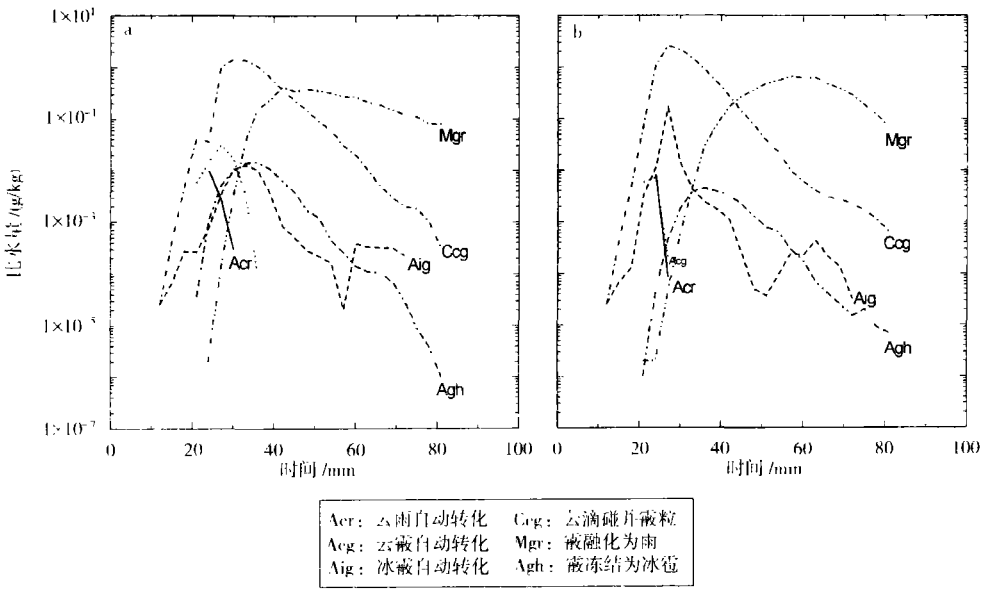

图 5 自然云(a)和催化云(b)中几种微物理过程随时间的变化

Fig 5 Temporal evolution of several microphysical processes in natural cloud(a) and seeded cloud(b)

3 结 论

冰晶是霰产生的主要来源,而且也是霰生长的主要因素。冰霰自动转化是霰产生的最主要方式,冰晶与霰的碰并又促进了霰的进一步生长,霰是云中过冷水消耗的主要因素,云中在 40 min前有大量过冷云水,过冷雨水几乎没有,冰晶转化为霰后开始收集云水,由于云滴尺度比较小,不仅云雨自动转化率很小,霰碰并云滴过程中由于冰晶繁生过程(Pci)产生次生冰晶

也很少数量最大约 10^2个 /s, 而冰核活化过程中产生的冰晶数量在 35 min 为 10^3个 /s, 45 min 达到最大为 10^6个 /s, 所以播撒冰晶必须在冰核活化过程大量开始以前, 否则云内自然产生大量冰晶, 人工冰核将很难起作用。

参考文献:

[1] 李仑格, 德力格尔. 黄河上游人工增雨技术 (1)气候背景分析 [C] //青海省人工影响天气办公室编著. 青海省黄河上游人工增雨文集. 西宁: 2001: 34-38.

[2] 张国庆, 德力格尔, 张加昆, 等. 黄河上游地区边界层特征及地面碘化银催化条件及时机的研究分析 [C] //青海省人工影响天气办公室编著. 青海省黄河上游人工增雨文集. 西宁: 2001: 48-55.

[3] 张加昆, 德力格尔, 张国庆, 等. 黄河上游地面点源催化剂的扩散 [C] //青海省人工影响天气办公室编著. 青海省黄河上游人工增雨文集. 西宁: 2001: 56-60.

[4] 黄河上游和渭北地区强对流云特征的模拟及对比分析 [C]. 第十三次全国云降水物理和人工影响天气科学讨论会论文集. 西安: 2000: 257-258.

[5] 于达维, 何观芳, 周　勇, 等. 三维对流云催化模式及其外场应用 [J]. 应用气象学报. 2001: 12(增刊): 122-132.

[6] 洪延超. 三维冰雹云催化数值模式 [J]. 气象学报, 1998, 56(6): 641-653.

[7] 洪延超. 冰雹云形成机制和催化防雹机制研究 [J]. 气象学报, 1999, 57(1): 30-44.

[8] 周　玲, 陈宝君, 李子华, 等. 冰雹云中类积区和冰雹形成的数值模拟研究 [J]. 大气科学, 2001, 25(4): 536-550.

[9] 洪延超, 肖　辉, 李宏宇, 等. 冰雹云中微物理过程研究 [J]. 大气科学, 2002, 26(3): 421-432.

[10] HessW N. 人工影响天气和气候 [M]. 北京: 科学出版社, 1985: 284-289.

[11] 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 [J]. 气象学报, 1987, 45(4): 465-484.

[12] 刘诗军. 碘化银核化过程的数值研究 [J]. 气象学报, 2005, 63(1): 30-40.

Simulation Study on the Precipitation and Seeding Process of Convective-cloud in Qinghai with a 3D Cloud Model

FANG Wen[1,2], ZHENG Guo-Guang[2], HE Guan-Fang[2]

(1. Department of Atmospheric Sciences, NUIST, Nanjing 210044, China;
2. Chinese Academy of Meteorological Science, Beijing 100081, China)

Abstract: On the basis of the sound data obtained from the autumn field experiment in 2002 in Henan country of Qinghai province, and in terms of the 3D cloud-model of CAMS, the paper studies the natural cloud development and simulates the effect of seeding time, seeding position and seeding amount on precipitation enhancement. The study shows that the precipitation in the experiment area is dominated by cold cloud precipitation processes and the ice crystal is the main source of grauple, which is produced by the auto-conversion from ice crystal to grauple and then grows through collecting ice crystals. AgI-seeding should be done before the activation of most ice nuclei start, so as to enhance rainfall through increasing ice crystals content, and deleting super-cooled cloud water. Otherwise, there will be large amount ice crystals grew in natural clouds, artificial nuclei would be useless.

Key words: 3D cloud model; convective-cloud; numerical simulation