

一次冰雹过程人工催化的 数值模拟试验

冯桂力 陈文选 刘 文

(山东省气象科学研究所, 济南 250031)

提 要

利用二维雹云模式模拟了济南地区 1996 年 7 月 24 日出现的一次冰雹过程, 模拟结果表明对雹云 26 个主要微物理过程双参数化能较细致地描述强对流过程的热、动力反馈和微物理特点。根据计算结果, 对该次冰雹过程进行了 AgI 催化试验, 结果得出在云发展初期对暖底雹云实施高浓度的冰晶催化, 可起到减少地面冰雹和增加地面降水的作用。

关键词: 冰雹过程 数值模拟 催化试验

前 言

人工防雹增雨作业技术水平的高低关键在于对雹云的预报能力和对雹云的演变及微物理结构的认识。数值模拟方法不仅能模拟雹云的详细结构, 而且能提供冰雹云的发生、发展和消亡的整个演变过程, 并成为当前人工影响天气学科中进行效果评价的一种有效手段。

结合山东省高炮增雨防雹作业及研究的需要, 本文利用胡志晋的雹云模式^[1,2]对 1996 年 7 月 24 日济南地区的一次冰雹降水过程进行了数值模拟, 根据计算结果对雹云作了人工引晶的催化试验, 并对催化结果作了初步分析。

1 模式简介

胡志晋、何观芳^[1,2](1987—1988 年)进行了积雨云微物理过程的数值模拟研究, 模式考虑了水汽、云滴、冰晶、霰、雹、雨 6 种水元间的 26 个微物理过程, 对风暴内湿过程有较强的模拟能力。其 26 种主要微物理过程分别为: 冰晶、雨滴、云滴、霰的凝结(华)和蒸发(Svi, Svr, Svc, Svg); 冰晶、霰、雹、雨滴对云

滴的碰并(Cci, Ccg, Cch, Ccr); 雨和冰碰并(Cir, Cri); 霰、雹对雨滴的碰并(Crg, Crh); 霰、雹碰并冰晶(Cig, Cih); 冰晶核化、增生(Pvi, Pci); 云雨自动转化(Acr); 冰霰转化(Aig); 霰雹转化(Agh); 雨冻结成霰(Mrg); 霰、雹、冰晶融化为雨(Mgr, Mhr, Mir); 冰晶相并(Cii); 雨滴相并(Crr); 雹的湿增长极限(Cwh)。这些过程用 3 个英文字母表示, 第一个字母指过程名称, 第二个字母是被消耗的相, 第三个字母是生成相或作用相。

模式所用的基本方程包括一个水平运动方程、垂直运动方程、位温方程、连续方程和 6 个水物质预报变量方程, 详见文献[3]。

模式的边界条件为:

底、顶边界: $w=0$ 允许有水平风($u \neq 0$)

侧边界: 采用辐射边界^[4]

模式采用有限差分方法求解方程组, 基本差分格式为蛙跃格式。初始环境风场、位温场和无量纲气压场水平均匀, 由探空资料确定; 为快速启动对流发展采用湿热泡扰动方案(见文献[5])。

2 天气背景

1996年7月24日山东省出现一次大范围的强降水过程,这次降水过程是地面冷锋和高空切变线共同作用的结果。24日08时500hPa形势图上(图略),副高脊线已北抬到 31°N ,西风带小槽在缓慢东移的过程中受到副高阻挡,蜕变为切变线,对应于地面,自东北平原至河套地区有一冷锋,随着地面冷锋的逐渐南下,自24日午后,一场伴随着雷雨大风和局地冰雹的强降水席卷山东省,18:00济南站开始降水,18:15—18:20降雹5分钟,观测到的最大雹块直径为8mm,18:00—19:00降水量为43.8mm,19:00—20:00降水为4.1mm,本站过程总降水量为47.9mm。

从该日08时探空的温度-对数压力图上可看出(图略),大气层结呈现很强的不稳定性, SI 指数小于 -3°C ,对于形成冰雹云降雹十分有利。

从GMS卫星云图上也可看出冰雹云的演变特征:16:00华北沿海地区上空有3个强云团,自西向东分别位于山西、河北、河南三省交界处、鲁北地区(中心位于惠民)和半岛北部(图1)。云团在缓慢的东偏南移动过

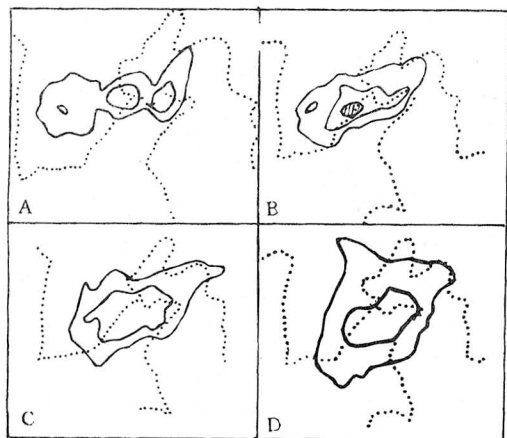


图1 雹云的卫星云图演变特征

外圈为云团轮廓,内圈表示云顶辐射亮温 $<-60^{\circ}\text{C}$,阴影表示 $<-70^{\circ}\text{C}$;A. 16:32, B. 18:26, C. 19:32, D. 21:32

程中,受地形强迫抬升作用,云团逐渐增强,至18:00 3个云团合并,强中心在济南地区,云顶辐射亮温小于 -70°C ,云顶反演高度为16.7km,19:00强中心移过济南向鲁中山区移动,21:00维持少变。从水汽图像来看,西南气流的水汽输送比较明显。

3 数值模拟结果

模式选用济南08时探空资料作初始场(见图2)。由于强对流出现在下午,边界层受到太阳辐射加热,我们对云底以下温度层结调整为干绝热层结。

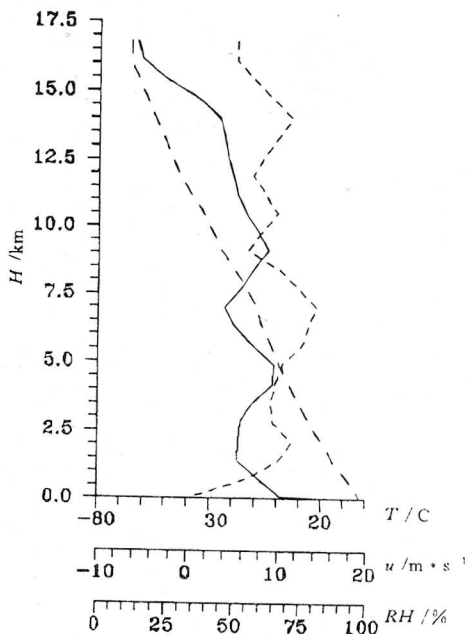


图2 1996年7月24日08时济南大气层结和风分量图

点划线为温度 T ,虚线为风分量 u ,实线为相对湿度 RH

该云为单泡对流,初始阶段云体直立发展迅速。模拟云底高度为1km,跟实测云底高度900m非常接近(见图3),15分钟云顶发展到9.8km,至21分钟云顶达13.5km。12分钟时云由水滴组成,为暖积云特征。12分钟后云雨自动转化过程开始启动并产生雨滴。随着云顶温度的降低,云内冰核活化产生

冰晶,18分钟云内开始出现大量冰晶,24分钟时云顶冰核活化率最高达 4.43×10^6 个 $\cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,冰晶质量含量为 $0.30 \text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,然后冰晶主要通过凝华、碰并过程增长。繁生过程比较弱,最大繁生率为 4.25×10^3 个 $\cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,该过程从18分钟开始,一直持续到云开始消散。冰晶碰并雨滴和雨滴的冻结是形成霰的主要过程,冰晶向霰粒的自动转化作用很小。霰粒通过碰并云滴和雨滴迅速猛增,至24分钟时霰的含量达 $43.13 \text{g} \cdot$

kg^{-1} ,为冰雹提供了大量的雹胚。霰、雹自动转化在24分钟达 $0.21 \text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,雹通过碰并雨滴(最大速率为 $2.80 \times 10^{-2} \text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)和碰并云滴(最大速率为 $1.50 \times 10^{-2} \text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)继续长大,雹、霰在下落过程中部分融化为雨,部分降落至地面形成雹和霰。27分钟前雨水质量主要通过暖雨过程,至30分钟霰、雹的融化作用超过暖雨过程,36分钟时后融化过程(Mgr、Mhr)产生的雨水比暖雨过程(Ccr)高一个量级之多。

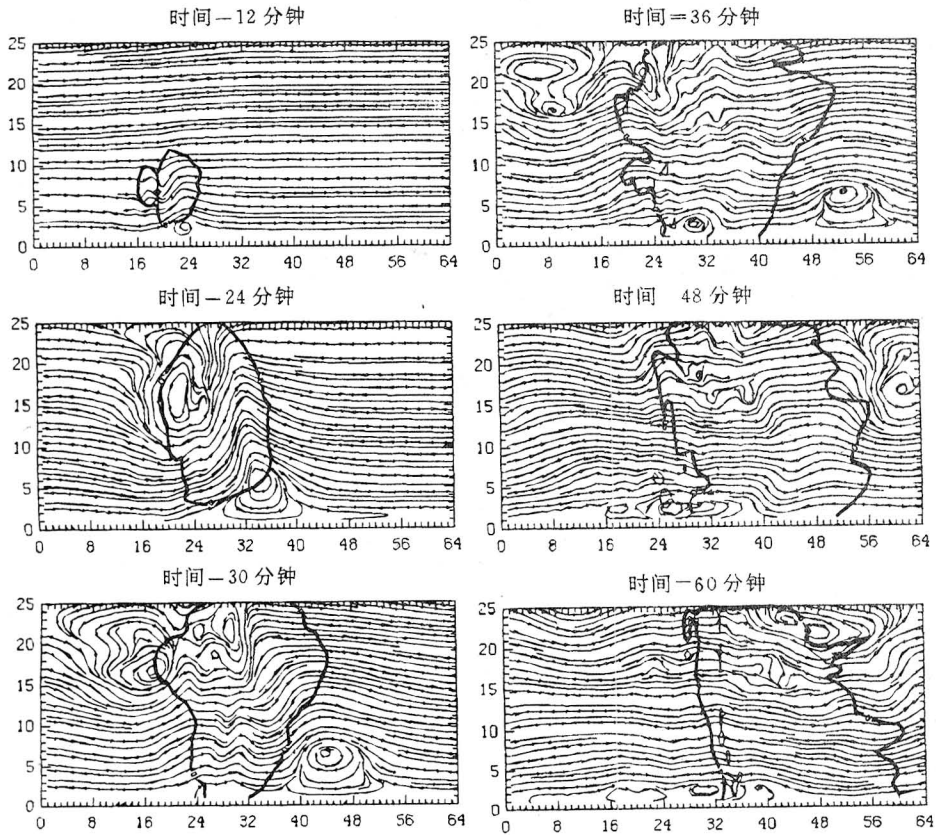


图3 模拟雹云流场和云外部廓线($Q_c + Q_g + Q_r + Q_i + Q_h > 0.01 \text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)的时间演变
水平格距为1.2km,垂直格距为0.7km

从图3中的流场分布可以看出,30分钟时雹云中心下部因降水作用下沉气流开始出现,而两侧仍然有辐合维持,雹云上部为强上升气流,高层的辐散气流已战胜环境风,形成

向两侧扩展的云砧,云砧由冰晶和霰粒组成。36分钟时,上层冷空气下达地面,形成“雷暴高压”。模拟至48分钟时云体前方上部有下沉气流,向前伸展的云砧开始消散,雹云内以

下沉气流为主,地面为明显的高压出流,随着中层干冷入流的加强,云体处于缓慢消亡阶段,至60分钟云上部基本由固态粒子组成,虽然地面仍有降水,但强度很小。

降水情况:模拟至27分钟时地面开始出现降水,一直持续到90分钟,60分钟降水量为47.42mm,90分钟降水量为48.52mm。地面降雹从36分钟开始至48分钟结束,共降雹12分钟,地面最大降雹量为7.39mm,采用整体水微物理参数化方案不能预报最大冰雹直径,只能给出平均直径,36分钟时计算平均直径为8.2mm,48分钟时平均直径为6.2mm,说明大冰雹出现在降雹初期,跟实测结果也一致。

模拟降水量跟实测值相当(实测地面雨量47.9mm),降雹时间偏长(实测降雹5分钟),降雹量没有实测值,无法进行比较,冰雹直径模拟与实测也基本相当。但就总的情况而言本次过程的模拟结果是令人满意的。

4 对比分析

自然云模拟结果,在15分钟时过冷水在 $-7\text{---}14\text{C}$ 范围内已经非常丰富,为冰雹提供了良好的生长环境。在自然云的基础上,不作任何改变,只是在云发展至15分钟时,在云中的 $-7\text{---}14\text{C}$ 区域人工引进浓度为 10^6 个 $\cdot\text{kg}^{-1}$ 的冰晶胚胎,其平均质量为 10^{-9}g ,谱分布同自然冰晶相似,以此来模拟催化过程。

播入云中的人工冰核很快活化形成冰晶胚胎,模式考虑该过程瞬时完成。冰晶与雨滴碰并形成大量的霰粒,自然云中Cri在18分钟时最大值为 $1.73\times 10^{-2}\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$,催化云此时(催化后3分钟)为 $1.75\times 10^{-1}\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$,增加了一个量级之多。虽然冰晶胚胎碰并雨滴量增多,但并没有减少雨水含量,这是由于液水向固态水转化的过程中放出了大量的潜热,使云内的浮力加强,云中最大上升气流增加了 $2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 之多,水汽凝结(Svc)相应增加约一倍,雨滴碰并云滴(Ccr)

也大于自然云。

人工引晶所处高度较低,水汽丰富,凝华增长迅速,部分人工冰晶尺度超过阈值提前转化为霰粒(Aig)。21分钟时(即催化后6分钟),催化云最大上升气流速度达 $45.7\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,而自然云为 $41.13\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。此时冰晶、霰粒、冰雹的凝华过程都跟云滴争夺水汽资源,水汽凝结(Svc)迅速减少,再加上Ccg、Ccr等过程也消耗大量的云水,此时催化云中云水含量小于自然云,但霰粒质量含量却高出自然云2倍,冰雹、冰晶、雨水质量含量有所增加。催化后霰粒直径变小,雨滴直径略微偏小,云中冰雹直径的最大值(D_{hmax})由自然云的9.34mm减少为7.60mm,直径减少18.63%。30分钟时与自然云相比催化云最大上升气流速度大大减少,云中过冷云水和雨水均有所减少,霰粒增加,冰晶和冰雹质量含量减少。相应暖区霰融化为雨水的量Mgr比自然云大,雹融化为雨Mhr却低于自然云。

图4为云中微物理转化率总量随时间的演变,a、b为自然云,a'、b'为催化云。从图可以看出,催化后云水自动转化减弱,这是由于冰晶和霰粒的增多,消耗的云水也较多的缘故。从整个催化过程来看,冰晶碰并雨滴的过程(Sri)得到加强,冰晶向霰的自动转化时间提前,冰雹碰并云滴和冰雹融化成雨过程均减少一半左右,霰向雹的自动转化也有较大的减少,但霰粒融化过程得到加强。

模拟结果表明,催化前后冰晶尺度变化不大,但霰粒尺度变化显著。从图5可以看出催化后云中心轴霰粒尺度较催化前明显减少,这是由于人工引晶碰冻雨滴及冰晶长大结凇转化产生的大量霰粒得不到充足的液水供给而造成的。从图4中也可明显看出霰粒碰并云滴与自然云相似,但催化后霰粒浓度大增,单个直径就比较小,使霰粒向冰雹的自动转化明显减少。

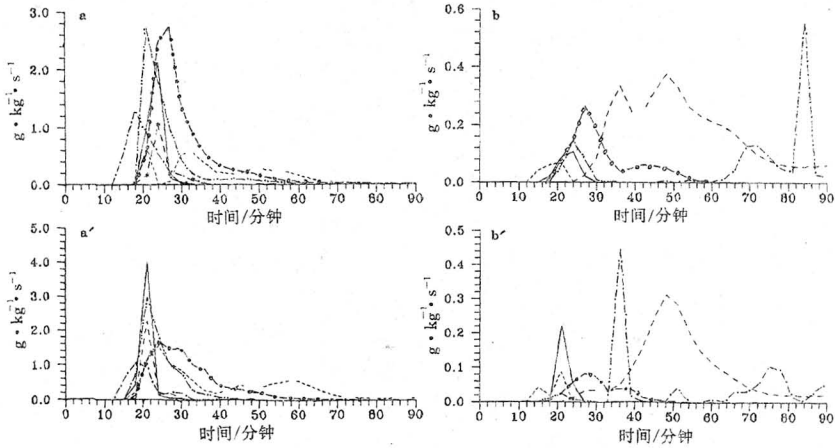


图4 云中每种微物理过程转化率总量随时间的演变

a、b表示自然云，a'、b'表示催化云，在a、a'图中实线为SCri，点划线为SCcr，细虚线为SMgr，粗虚线为SCrg，圈划线为SAgh，双点划线为SCcg；在b、b'图实线为SMrg，点划线为SAig，细虚线为SAcr，粗虚线为SMhr，双点划线为SCRh，圈划线为SCch

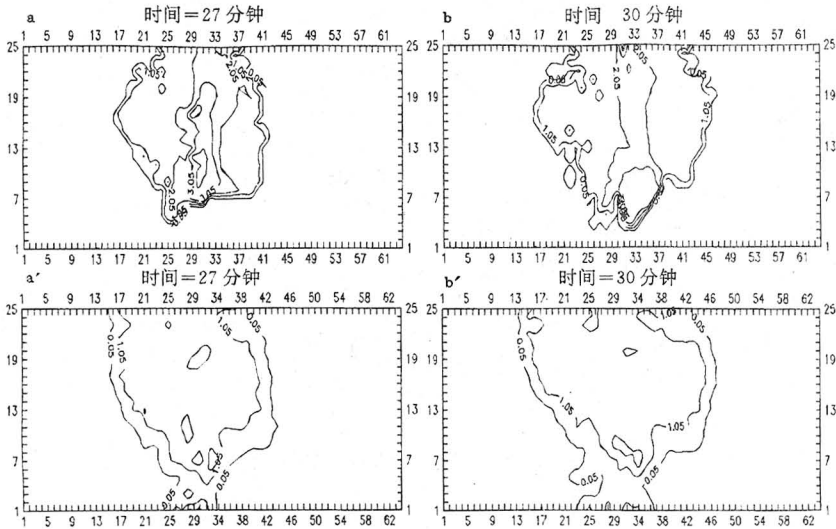


图5 自然云(a、b)和催化云(a'、b')中霰粒直径分布

等值线间隔为1mm,其它说明同图3

催化后地面降水的变化:

催化后地面降水比自然云提前3分钟，总雨量增加21.5%，总降雪量减少67.0%，最大点降水量由47.42mm增为57.62mm，最大点降雪量由7.39mm降为2.46mm。

从微物理过程来看，由于催化后，冰晶浓度大大增加，迅速碰并雨水产生大量的霰粒，

霰粒继续碰并云滴和雨滴长大，霰粒在下落过程中又融化为雨水，在24分钟最大融化速率为 $0.36\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ，30分钟时仍保持在 $0.10\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上。24分钟时雨水质量为 $57.75\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，雨水质量的迅速生产和积累对上升气流的削弱作用比催化云提前，致使地面27分钟开始出现降水。30分钟时地

面开始降雹,比自然云提前3分钟,但降雹强度和雹块直径都小于自然云。同时由于播云作用大量云水和液水冻结及冰晶的凝华增长释放的潜热使云中的9.5—11.5km处风速增强,21分钟最大上升气流速度比自然云高 $4.61\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,这对增加降水量具有决定性的作用。

模拟结果得出,对暖云底的较强雹云,云发展初期在过冷水区一次引进较大数量的人工冰晶,使云上部形成较大数量的霰粒,霰粒的尺度小,阻碍了向雹的转化,减少了地面降雹;由于催化的“动力效应”,使地面降水量有了较大的增长。这与何观芳等人^[5]模拟结果相似。

根据模拟结果,只要作 10^6 个 $\cdot\text{kg}^{-1}$ 的单个催化就可以达到抑雹增雨的效果。这种浓度相当于每升播撒500个冰晶。若取Y方向和X方向的播云范围相同,则播云体积为 70km^3 ,共需冰核 3.5×10^{16} 个,按现有AgI的成核率(-10°C 时 10^{14} 个 $\cdot\text{g}^{-1}$)^[6]计算,是完全能够实现的。

5 结语

(1)本模式模拟的雹云的宏观特征和云降水特征基本与实测资料相符,说明所用模式对强对流云有一定的模拟能力,能较真实地模拟出雹云发展演变的微物理过程,对冰雹的预报具有重要的参考价值。

(2)在雹云中降水过程的主要环节是:

Svc、Acr、Ccr、Mrg、Pvi、Cri、Ccg、Crg、Agh、Cch、Crh、Mgr、Mhr等过程,暖云底雹云的促发机制为暖雨过程,后来冷云降水过程发挥着重要的作用。

(3)对对流云发展初期在 -7 — -14°C 高度范围内引入高浓度的人工冰核,通过碰并云滴形成大量的冰晶胚胎,进而通过Cri、Aig过程产生大量的小霰粒,它们争食云水,从而起到抑雹作用。

(4)该强对流云云底温度较高(21°C),属暖云底强雹云,对其实行高浓度冰晶催化,由于液水向固态水转化的过程中放出了大量的潜热,增加了云内的浮力,起到一定的动力催化效应,使云体增大,结果不仅减少冰雹,而且地面降水也得到增加,这是实施催化较理想的结果。

参考文献

- 1 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).
- 2 胡志晋,何观芳.积雨中微物理过程的数值模拟(二)降雨、冰雹、暴雨的个例研究.气象学报,1988,46(2).
- 3 毛玉华,胡志晋.强对流云人工增雨和防雹原理的二维数值研究.气象学报,1993,51(2).
- 4 Klemp, J. B., and R. B. wilhelmson. The simulation of three - dimensional convective storm dynamics. J. Atmos. Sci. 1978, 35:1070-1096.
- 5 何观芳,胡志晋.不同云底温度雹云成雹机制及其引晶催化的数值模拟研究.第十二次云降水物理和人工影响天气科学讨论会文集.北京,1996年10月.
- 6 鄯大雄.燃烧AgI丙酮溶液产生冰核气溶胶.气象,1991,23(3).

The Physical Analysis and Numerical Simulation of Artificial Modification of A Hail Event

Feng Guili Chen Wenxuan Liu Wen

(Shandong Research Institute of Meteorological Science, Jinan 250031)

Abstract

The physical analysis and numerical simulation of a hail event in Jinan on July 24, 1996 was made with a two-dimension hail cloud model. The simulation results show that the model can describe in detail the character of feedback of thermodynamic and dynamic processes and microphysical processes in the hail cloud. Based on the computed results, the silver iodide seeding experiment is conducted in the hail event, and it is concluded theoretically that cloud seeding with high concentration of artificial ice crystal at forming period of cloud may decrease surface hail and increase surface precipitation.

Key Words: hail cloud numerical simulation seeding experiment