

一次对流降水过程增雨催化时机的模拟分析和雷达识别

王 斌¹ 向玉春² 张鸿雁³

(1. 中国气象局武汉暴雨研究所 430074;
2. 湖北省人工影响天气办公室; 3. 湖北省气象局业务处)

提 要: 为加深对对流云增雨催化机制的理解,避免催化指标的随意性,通过三维积云数值模拟和雷达加密探测资料分析相结合的方法,对发生在湖北省西北部多山地区的一次对流降水过程进行了增雨催化时机的分析和识别。首先运用三维积云模式,通过催化模拟敏感试验,得出对流云增雨催化存在时间窗,最佳的催化时机应该为对流云发展的早期,催化后关键是增加雨和冰晶冻结后碰并霰增长这一冰相微物理过程的产量。根据模式分析结果,结合雷达观测资料分析,发现对流回波在生成及发展上表现出一些规律性,可以作为通过雷达观测识别增雨催化的时机和潜力区域的指标。

关键词: 对流云 人工增雨 催化时机 三维云模式 雷达识别

A Case Simulation Analysis and Radar Detection on Seeding Opportunity of Rainfall Enhancement for Convective Cloud

Wang Bin¹ Xiang Yuchun² Zhang Hongyan³

(1. Institute of Heavy Rain, CMA, Wuhan 430074; 2. Weather Modification Office of Hubei Province;
3. Operational Office, Hubei Provincial Meteorological Bureau)

Abstract: Analysis and identification on seeding opportunity for enhancing rainfall in a convective precipitation case occurred in northwestern Hubei, a mountainous area, are introduced. Firstly, based on a fully elastic three-dimensional and dual-parameter cumulus cloud numerical model, a series of sensitive modeling tests on seeding AgI agent in a variety of time is conducted to analyze how various seeding time affects the result of precipitation enhancement and its precipitation physical mechanism. It is concluded that the appropriate seeding

资助项目: 科技部公益性研究专项“南方积云人工催化模型的研究”(2001DIB20105)

收稿日期: 2007年4月26日; 修定稿日期: 2007年10月8日

opportunity is at the early period when a convective cloud is developing after its original formation. According to the results of simulation analysis in this case and based on radar data, the method of detecting appropriate seeding opportunity is discussed by analyzing forming and developing characteristics of convective cell echoes in the entire precipitation process.

Key Words: convective cloud precipitation enhancement seeding opportunity three-dimension-cumulus model radar detection

引 言

对流云生命期短、演变迅速,如何准确快速地识别有利于人工增雨的催化时机,是提高增雨效果的关键之一。由于云和降水的发展受微观和宏观过程共同影响,因而,在不同的大气环境当中,微物理过程对降水的影响大不相同,相应的催化作业条件也必须具有针对性^[1]。不同地区在实际开展人工增雨作业中,也提出了各自的催化时机判别方法和指标,在应用中起到了良好作用^[2-4]。

以上研究多基于雷达、卫星宏观探测资料,较少讨论相应的对流云催化微物理响应机制。而云数值模式在对流云降水形成和增长机制、催化方案的设计和效果检验以及催化效应的理解等方面,得到了广泛应用。为加深对增雨催化机制的理解,避免催化指标的随意性,有必要更多地结合数值模式和探测资料,进行深入研究。本文利用三维双参数积云数值模式,对发生在湖北省西北部的一次对流降水过程进行了模拟,分析了产生降水的微物理机制,进行了催化时间敏感性试验,分析了整个降水过程中雷达回波发展特征,统计归纳出用于判断增雨催化时机的指标。

1 实际降水情况

该次对流降水过程发生时间为 2002 年 7

月 5 日,属于局地强对流降水,气象站记录当天 24 小时降水郧县 54mm、郧西 19.9mm,降雨主要时段从雷达观测资料中判断为 14:00—20:00,其中两个站的降水时间都为 1 小时左右。所使用的雷达为 C 波段常规天气雷达,观测到的回波最大强度为 50dBz,回波顶高 11km。如图 1(见彩页)所示。

2 自然降水模拟

数值模拟采用的积云模式为中国科学院大气所发展的三维双参数积云模式^[5]。该模式动力框架采用完全弹性大气运动方程组进行积分,微物理过程模拟了液相和冰相质粒的比含水量和浓度时空分布。水物质分为水汽、云水、雨水、冰晶、雪、霰和雹 7 类。模式模拟了凝结(华)、碰并、核化、繁生、融化、融化蒸发和自动转换等共 46 个微物理过程,包括 3 种碘化银粒子的成核机制过程。在计算时,模式水平网格距 1000m,垂直网格距 500m,水平模拟范围 30×30 格点,垂直范围根据实际探空资料的 100hPa 高度确定,模拟积云发展时间 60 分钟。探空资料使用距离鄂西北最近的安康探空站的 08 时探空资料。图 2(见彩页)为模式积分 20 分钟时的云中水成物总比含水量分布的垂直剖面图。

由图 2(见彩页)可知,模拟结果与雷达观测结果比较一致,模拟的对流云顶高(12km)、强中心的高度(4km)与雷达回波比较相似,模拟的地面降雨 13 分钟开始,60 分

钟降雨总量为 1729 千吨,最大单点降水为 23mm,与气象站记录的实际降水量接近。对流云发展初期主要由暖云过程启动,其中雨水粒子碰并收集云水粒子过程(以 CLcr 标记)为主要的雨水粒子增长过程,其峰值时间为 12 分钟。其后,暖雨过程中产生的雨水除了少量降落及地外,大量的粒子在上升气流的携带下,进入云中冻结层,成为过冷水,参与冰相微物理过程。这与雷达回波发展特征相似,即回波底很快接地,降雨生成,随后回波增强发展,回波顶伸展到 0℃ 层以上。17 分钟后,产生雨水的冰相微物理过程出现,其中霰粒子融化成雨水粒子过程(以 MIgr 标记)为主要的产生雨水粒子过程,其峰值时间为 29 分钟(图 3)。地面降水峰值出现时间为 29 至 34 分钟,正是 MIgr 处于峰值时间,可见地面降雨主要由冰相微物理过程产生的雨水降落形成,因此该对流云适合使用冷云催化机制增加地面降雨。

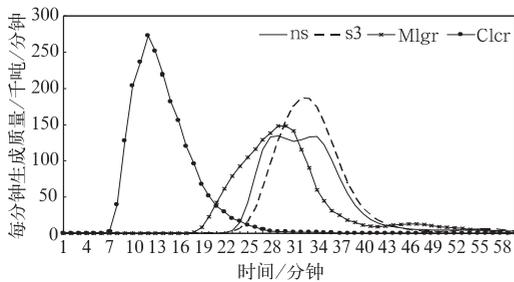


图 3 模式模拟的每分钟地面降雨量、霰融化成雨和雨水碰并云水粒子增长过程的生成量随时间变化曲线。实线为未催化降水,虚线为催化降水,MIgr 为霰融化成雨,CLcr 为雨水碰并云水。

3 催化时机敏感试验

为分析不同的催化时机对增雨效果的影响,进行了不同时间单次播撒碘化银粒子催化增雨的敏感试验。每次试验个例播撒碘化

银粒子的时间依次从模式 8 分钟至 34 分钟,每次相差 2 分钟,每次试验播撒催化剂浓度为 $0.3 \times 10^{-10} \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,播撒高度 5~6km。表 1 为催化敏感试验结果。

表 1 催化时间敏感试验结果

试验个例	催化时间/分钟	总降雨量/千吨	增雨率/%
S1	8	1825	5.6
S2	10	1883	8.9
S3	12	1895	9.6
S4	14	1845	6.7
S5	16	1780	2.9
S6	18	1751	1.3
S7	20	1750	1.2
S8	22	1753	1.4
S9	24	1757	1.6
S10	26	1756	1.6
S11	28	1745	0.9
S12	30	1733	0.2
S13	32	1728	-0.1
S14	34	1728	-0.1

由表 1 可知,比较催化效果,在 12 分钟催化的效果最好,增雨率达 9.6%,在此时间前后 2 分钟催化的效果也比较好;但是当在 16 分钟催化时,增雨率即减小很多,并且催化时间越迟则效果越差,在 32、34 分钟催化甚至出现了负效果。由此可见,在该对流云进行催化时,增雨效果的好坏与催化时机有着紧密的关系,在对流云发展早期催化效果较好,催化时间越迟,效果越差。

表 2 为各试验个例与未催化个例的雨、霰、冰晶质量生成之差的比较,其中 Rain 表示雨水粒子总产量,CLcr 和 MIgr 如前所述,Tg 表示霰总产量,Clrig 表示雨水在冰晶表面冻结后碰并霰增长过程的产量,Txsi 表示由于播撒人工冰核后增加的冰晶总产量。由表 2 可知,催化后雨水产量都有增加,增雨率最高的个例 3 生成的雨水最多。催化后暖雨过程的产量在第 1 至第 5 试验中都减少,并且催化越早,减少越多,而在 20 分钟后催化

表 2 催化与未催化试验个例雨、霰、冰晶质量生成之差(单位:千吨)

试验个例	Rain	Clcr	MIgr	Tg	Clrig	Txsi
S1	42	-282	339	206	139	1.4
S2	118	-233	514	237	242	2.9
S3	279	-128	617	223	419	4.2
S4	178	-63	374	174	296	4.4
S5	94	-11	163	132	149	3.5
S6	47	0	47	114	48	3.1
S7	40	1	22	112	12	2.9
S8	56	2	37	128	4	2.8
S9	65	3	48	124	1	2.7
S10	69	2	53	115	0	2.5
S11	66	3	51	105	1	2.1
S12	54	3	41	80	0	1.7
S13	40	2	31	59	0	1.2
S14	22	0	17	34	0	0.7

则基本不变。虽然暖雨产量减小,但最终地面降雨增加,这是因为 MIgr 在催化后都有增加,并且增雨率越高,MIgr 增加越多。MIgr 的增加意味着霰的产量也增加,由于霰的生成与冰晶的增长关系密切^[6],由表 2 也可知,增雨率越高,Clrig 的总量也越大,与此对应的是 Txsi 的总量也越高。由此可见,在恰当的时机播撒碘化银催化剂,将促使云中生成更多的冰晶,同时使得暖云过程缩短,暖雨产量减少,冰相微物理过程更早启动,通过冰晶—霰—雨的相互转化过程,促使霰的增加以及霰融化成雨的产量增加,最终使得地面降雨增加。若催化时间过早,虽然同样增加了冰相粒子的产量,但是由于过分抑制了暖雨过程,使得云中过冷水减少过多,减少了人工冰晶的生成,导致霰的生成相对增加不多,最终也减弱了增雨效果。若催化时间太晚,过冷水已经大部分消耗,使得冰晶—雨—霰相互转化的微物理过程减弱,虽然冰晶和霰的产量都有增加,但这时的霰主要为碰并冰晶增长,位于云中上层,导致霰融化成雨的产量相对减少很多,最终也使得的地面降雨增加很少,甚至减雨。可见,该次降水过

程的增雨机制可以归结为以下催化响应链:播撒催化剂—减少暖雨生成—增加冰晶生成—促进雨和冰晶冻结后碰并霰增长—增加霰融化成雨的总量—形成更多的雨水—产生更多的地面降雨,其中增加雨和冰晶冻结后碰并霰增长这一过程的产量是催化增雨机制的关键。

4 增雨催化时机的雷达回波识别

在实际对流云人工增雨作业中,一般是通过常规天气雷达观测对流云回波的发生发展,识别和判断对流云最佳催化时机,指挥人工增雨作业。根据上文模拟分析的结果,该次对流降水过程最佳催化时机为对流云发展的早期至地面降水刚刚开始的时候,在 C 波段天气雷达回波强度图像上,此时段对应的是新生对流回波发展的初期。开展对流云高炮、火箭增雨作业,需要有一定的提前量来进行作业参数的计算和播撒催化剂准备,因此如果可以更早、更快地发现新生对流回波的出现时间、方位及其发展趋势,就能够帮助作业点提前做好更充分的准备,有利于提高增雨作业效果。

4.1 新生对流回波生成及发展的时间特征

该次对流降水回波为多单体回波,由午后多个对流单体发展合并形成,在 13:33 回波主体形状呈东西走向的多对流中心带状回波,并由西北向东南移动发展,至 20:21 回波基本消散,雷达每 10 分钟 1 次扫描记录回波 PPI 和 RHI 图像。在整个多单体回波移动及演变过程中,雷达共观测到 15 块新生回波单体生成,经统计,80% 的新生单体对流较强,其最大回波强度大于 40dBz,最大回波顶高大于 9km,而另外 20% 的回波单体较弱。

新生对流回波最大强度发展到 10dBz 所需时间平均为 10 分钟,较强单体发展到 40dBz 所需时间平均为 18 分钟,整个生命时间平均为 77 分钟,回波最大顶高平均为 9.2km,回波强中心最大高度平均 4.3km。由此可见,新生对流回波的发展比较迅速,即从发现初生回波($\leq 10\text{dBz}$)到发展为比较成熟回波(40dBz)只需 18 分钟左右。这段时间属于比较理想的催化时机,由于稍纵即逝,所以要求雷达观测时要尽可能早的发现新生对流回波,密切注意其发展趋势,更好地捕捉催化时机。另外,由于对流回波生命期早期发展迅速,也对雷达观测提出更高要求,如果在指挥人工增雨作业时,能够实现 5 分钟的扫描间隔,无疑将十分有利于催化时机的观测和识别。

4.2 新生对流回波生成方式及与成熟回波的相互作用

在整个降水过程中,新生对流回波的生成方式具有明显的相似规律,这主要表现在以下两个方面:

(1) 新生成的单体通常在回波带整体移动的前方、强回波单体对流发展旺盛一侧前方、两个(或多个)较强回波单体之间等三种方位出现。如图 4(见彩页)所示,a、b 图为在一成熟多单体带状回波移动前方生成新生单体,此时成熟回波最大强度 45dBz,回波顶高 11.2km,强中心($\geq 45\text{dBz}$)最大垂直高度 5.8km。新生回波最大强度 7dBz,11 分钟之后发展为最大强度 42dBz,顶高 6.2km,22 分钟后达到最大顶高 9km。c、d 图为在两个相对成熟回波之间生成新生单体,此时成熟回波最大强度 43dBz,回波顶高 9.1km。新生回波 23dBz,10 分钟后增强到 36dBz。

(2) 对流回波的生成具有类似波动传播

性质,即部分新生回波出现位置并不与相对成熟的回波相连,而是相隔一定距离,平均为 11km。如图 4 所示,两个新生回波出现位置与成熟回波距离分别为 10.8km、8.5km。新生回波发展成熟后,又在其回波扩展、强度增强的方向或在与相对成熟回波之间的空间内生成新的对流单体,同样相隔一定距离,相距在 6km 左右。如图 4b、d 所示,在新生回波与成熟回波之间又有单体生成。

新生回波生成后的发展与相对成熟回波有着密切关系。一方面新生对流回波经常在靠近相对成熟回波一侧发展增强,使得两者距离逐渐靠近。另一方面,当两者相距很近的时候,新生回波往往能够促进相对成熟回波重新发展,强度增大,范围扩展。当两者合并后,也会出现合并回波强度增大、对流增强的现象。

由以上分析可知,新生对流回波单体的生成和发展具有一定的规律性,当进行人工增雨作业时,可以通过雷达观测来提前判断新生回波的生成位置和发展趋势,一旦火箭(或者高炮)增雨作业点正好位于新生回波的生成及发展区域附近,就可以提前做好作业准备,迅速捕捉催化时机,正确播撒催化剂,从而获得更好的增雨效果。

5 结 论

(1) 通过催化模拟敏感试验,可知对流云增雨催化存在时间窗,最佳的催化时机应该为对流云发展的早期,如果催化过早或过晚,都会减弱增雨效果,甚至会出现减雨的负效果。催化后关键是增加雨和冰晶冻结后碰并霰增长这一冰相微物理过程的产量。

(2) 使用常规天气雷达识别和判断合适的对流云增雨催化时机,就是尽可能早地、快

速地识别新生对流回波的生成和发展的时间、方位以及趋势,而对流回波在生成及发展上表现出一些规律性,如类似波动传播的生成特征,新生回波发展趋势特征及与成熟回波的相互作用特征等,也使得通过雷达观测相对提前判断增雨催化的时机和潜力区域成为可能。

(3) 在成熟回波带(或较强回波单体)发展移动的方向上,或者多个成熟回波相互靠近时,在与之相距十多 km 的区域内,对流回波容易生成并发展增强,一旦火箭(或者高炮)增雨作业点正好位于此区域附近,就可以提前做好作业准备,迅速捕捉催化时机,正确播撒催化剂,从而获得更好的增雨效果。

参考文献

- [1] 廖菲,洪延超,郑国光. 影响云和降水的动力、热力和微物理因素的研究概述[J]. 气象,2006,32(11):3-11.
- [2] 李红斌,周德平,濮文耀. 火箭增雨作业部位和催化剂量的确定[J]. 气象,2005,31(10):42-46.
- [3] 张晰莹,金凤岭. 卫星云图、雷达回波在人工增雨时机选择中的应用[J]. 气象,2003,29(8):52-54.
- [4] 胡玲,靳瑞军. 新一代天气雷达产品在增雨作业时机判别中的应用[J]. 气象科技,2005,33(增刊):61-65.
- [5] 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化[J]. 大气科学,1990,14(4):441-453.
- [6] Cotton W. R., Anthes R. A. 著. 叶家东,范蓓芬,程麟生等译. 风暴和云动力学[M]. 北京:气象出版社,1993:112-125.
- [1] 廖菲,洪延超,郑国光. 影响云和降水的动力、热力和

王斌等：一次对流降水过程增雨催化时机的模拟分析和雷达识别

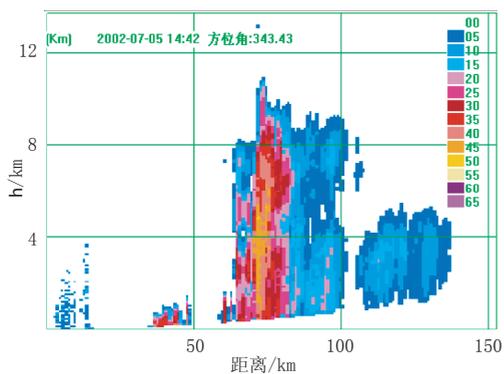


图1 雷达观测的对流回波RHI图像

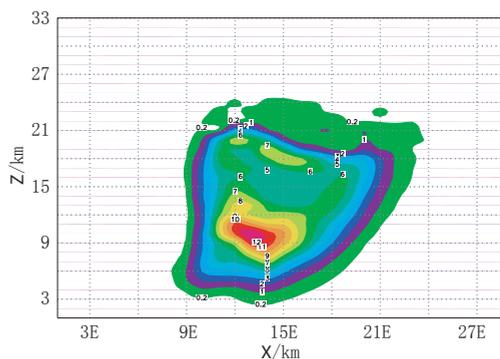


图2 模式积分20分钟时的云中水物质比含水量分布的垂直剖面图

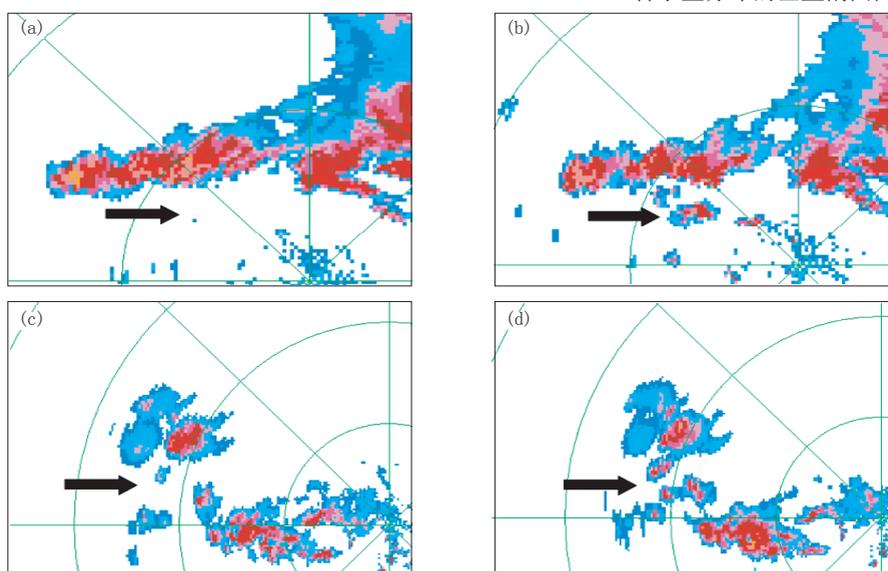


图4 新生对流回波（箭头所指位置）生成发展特点示例图

- a. 16:40回波带前方新生回波单体; b. 16:51新生单体最大回波强度42dBz; c. 18:01多个成熟单体之间新生对流回波; d. 18:11新生单体最大回波强度36dBz, 且在其周围又有新回波单体生成