

夏季催化对流云雷达回波特征对比分析

袁 野 冯静夷 蒋年冲 吴汪毅

(安徽省人工影响天气办公室,合肥 230061)

提 要:对“江淮地区对流云人工增雨外场试验”中3次催化作业过程,催化云和对比云新一代天气雷达回波特征的对比分析结果表明:催化云的平均维持时间对比对比云长51.2%,平均回波面积对比对比云多17%,催化云每个体扫的平均总液态含水量要高于对比云,整个维持时间的总液态含水量高出对比云46%。从而认为:催化作业可以达到增加回波面积,延长回波的持续时间,增加云中液态含水量的目的。并且,从其中一组对比中发现,对流云催化作业要掌握好催化时机,对于处在减弱期的对流云,催化作业达不到增加含水量、延长生命期的目的。

关键词:对流云 人工增雨 新一代天气雷达 物理检验 对比分析

Contrast Analysis on Echo Characteristics of Summer Seeded Cumulus Clouds

Yuan Ye Feng Jingyi Jiang Nianchong Wu Wangyi

(Anhui Weather Modification Office, Hefei 230061)

Abstract: Based upon 3 pairs of cumulus in the Jiang-huai area cumulus cloud-seeding experiment, a contrast analysis of echo characteristics of CINRAD between the target cloud and the reference cloud was performed. It was found that the average lasted time of the target cloud was 51.2% longer than that of the reference cloud and the average echo area of the target cloud was 17% larger than that of the reference. And the average water content of per volume scanning of the target cloud was larger than that of the reference, with a difference of 46% between the target cloud and the reference in the whole life time of clouds. It concluded that the seeded could increase the area of echo, prolong the lasting time of the echo, and increase the water content of clouds in its whole life. Besides, from one pair of cumulus, it was

资助项目:安徽省“十五”重点工程“安徽省空中云水资源开发利用工程”和安徽省气象局 KG200706 项目共同资助

收稿日期:2006年12月1日; 修定稿日期:2007年10月8日

found that the time of seeding was rather important for convective cloud. If the convective cloud is situated in its weakening phase, seeding could not increase the water content and couldn't prolong its life as well.

Key Words: cumulus Clouds seeding CINRAD physics checking contrast analysis

引 言

自 1946 年美国 Schaefer 和 Vonnegut 发现干冰和 AgI 在过冷雾中可产生大量冰晶,开创了人类科学地影响天气的新纪元以来,人工增雨工作已经成为人类开发空中水资源,改善生态环境的重要手段^[1-6]。许多国家为了验证人工增雨的效果,做了大量的工作。随机试验在统计检验中能提供令人信服的结论,以色列 1961—1967 年和 1969—1975 年两次随机试验以及我国古田水库人工增雨试验均采用随机化试验方案。但是由于随机增雨作业在目前国内以抗旱为主的增雨作业中,需要放弃一半的作业机会以及其它一些原因而难以实现。于是,物理检验成为人工增雨效果检验的又一种有效方法。美国高原试验(HIPLEX-I)和北达科他浓积云催化试验以及南非大陆浓积云催化试验均在物理检验方面取得了明显的效果。在国内,王以琳等^[7]通过 PMS 粒子探测系统对飞机播撒前后的云粒子分布和演变,证明了人工引晶的有效性。

在对流云人工增雨效果对比检验方面,刘耀宗^[8]等对湖南 1980 年代夏秋积云增雨试验获得的 28 块作业云和 20 块对比云的观测资料,通过雷达回波和降水参数的统计和双比分析,得出使作业积云总降水量增加 17%,雨量增加 28%,雨强增大 24%,降雨持续时间延长 7%,而催化作业对积云的顶高和面积无明显影响的结论。周勇等^[9]利用一次目标云和对比云 714C 雷达回波的对比分析,认为目标云从降水、生命期特征、回波垂

直特征参数变化等方面都表现出与对比云明显的差异。孙旭映^[10]利用 2004 年 6 月 12 日甘肃永登地区一组对流云 711 数字雷达资料,并结合地面雨量点观测资料,得出催化云在降水、生命期特征、回波垂直特征参数变化方面,表现出作业前后较对比云存在明显差异的结论。这些工作都证明人工增雨作业在雷达特征变化上有着明显的效果,但是这些工作都是建立在早期数字化雷达资料的基础上的,而有关新一代天气雷达在对流云对比检验方面的文献并不多见。

本文利用 2003 年和 2004 年“江淮地区对流云人工增雨外场试验”中 3 次火箭增雨作业后,催化云与对比云新一代天气雷达回波特征的对比,对对流云的人工增雨催化效果做了初步的分析。

1 江淮地区对流云人工增雨外场试验

“江淮地区对流云人工增雨外场试验”,是由安徽省气象局组织实施的业务科研相结合的人工增雨外场试验项目,目的是研究江淮地区对流云发生发展消亡的规律,以及对流云人工增雨作业的指挥技术,初步评估对流云人工增雨作业的效果。

江淮地区对流云人工增雨外场试验于 2003 年 8 月份开始,外场试验观测内容以合肥、马鞍山双多普勒天气雷达同步观测为主,辅以自动雨量站、探空等观测。外场试验指挥基地设在滁州市,根据试验作业期间对流云移动路径,在影响区和过渡区布设了 3 套流动作业火箭车,根据业务和研究需求开展人工增雨作业。为了研究需要,规定当雷达

观测到对流云最大强度达到 30dBz, 水平尺度达到 200km^2 , VIL 达到 $1\sim 5\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$, 并且预计对流会继续发展时, 则实施催化作业, 对于同时出现的几块对流云则选择最早达到预定条件, 同时兼顾与作业车的距离和作业车可能达到的位置。

2003 年和 2004 年试验期间中共进行 11 次催化作业, 但由于是结合业务抗旱需求, 仅有 3 次作业有比较清晰的对流发展, 分别是 2004 年 7 月 31 日、2004 年 8 月 1 日、2004 年 8 月 3 日。本文选取这 3 次的外场试验催化云, 并在同一区域内选择一块对比云, 分别对它们的雷达回波特征进行对比分析。对比

云的选择主要依据: ①雷达回波开始出现的时间基本一致; ②都出现在试验区域, 这样下垫面基本一致; ③发展趋势基本一致。用于对比的雷达特征参量分别是: 回波维持时间, 5km 高度上的回波面积、30dBz 以上回波面积、50dBz 以上回波面积, 回波顶高大于 11km 的回波面积、大于 14km 的回波面积, 对流云的 VIL 等。

2 催化云和对比云生命期特征的对比

表 1 列出 3 对对流云反映各自生命期特征的参量。

表 1 催化云和对比云生命期特征对比表

云体	作业时间	初始回波			最大回波			结束时间	维持时间	
		高度/m	经、纬度	出现时间	强度/dBz	首次出现时间	发展时间			
0731 催化云	13:10	1230	117°33'E 32°38'N	11:24	10	12:12	48'	60	16:46	322'
0731 对比云	/	1560	118°09'E 32°32'N	12:19	10	13:03	44'	60	15:28	189'
0801 催化云	13:42	1380	117°41'E 32°41'N	12:41	10	13:26	45'	50	14:42	121'
0801 对比云	/	2090	117°50'E 33°03'N	12:52	10	13:47	55'	50	14:36	104'
0803 催化云	13:48	1510	118°09'E 32°30'N	11:43	10	12:44	61'	60	16:45	302'
0803 对比云	/	2000	118°00'E 32°56'N	12:19	10	13:20	61'	60	15:39	200'

从表 1 种可以看出, 每一组催化云和对比云不仅初始回波强度相同, 而且最大回波强度也相同。催化云和对比云最大回波的首次出现时间基本在催化作业以前, 表明此时云的发展还没有受催化的影响, 从初始回波发展到第一次最强回波所需的时间在 44 分钟到 61 分钟之间, 而且, 对于同一组催化云和对比云, 它们的发展时间差别在 10 分钟以内, 说明每一组催化云和对比云发展趋势是基本一致的。

以雷达第一次发现回波作为初始回波时间, 考虑到回波减弱后会呈现大片的弱回波, 不利于跟踪, 我们以最后出现 30dBz 以上的回波时刻为回波的结束时间, 这样计算出的回波维持时间见表 1。可以看出: 催化云的维持时间最大 322 分钟, 最小 121 分钟, 平均

248 分钟; 对比云维持时间介于 104 分钟和 200 分钟之间, 平均 164 分钟, 催化云平均维持时间对比云长 84 分钟, 增长了 51.2%。从云的维持时间上看, 3 组催化云和对比云中, 8 月 1 日这一组, 催化云的维持时间仅对比云长 17 分钟, 远低于 3 组的平均值, 说明这次作业效果并不明显。

3 催化云和对比云发展过程的对比

3.1 天气形势分析

2004 年 7 月 31 日至 8 月 3 日, 是较强冷空气南下, 副高明显减退的一次过程。7 月 31 日以前, 长江中下游地区受副热带高压控制, 天气晴热, 31 日起, 由于北方冷空气的南下, 副高减弱明显, 在大陆分裂成两环, 一

环在安徽西部及河南南部、湖北东部、江西北部一带,另一环在黄海南部到东海北部一带,试验区处在两环高压间的低值区内。以后,副高总体呈减弱趋势,588 线逐渐退出大陆,至 8 月 3 日,试验区处在低槽的前部(图略)。

3.2 2004 年 7 月 31 日试验对比

3.2.1 催化作业情况

2004 年 7 月 31 日,作业点位于凤阳县境内 $117^{\circ}32'E, 32^{\circ}42'N$,作业方向西北,仰角 60° ,用弹 2 枚,每枚火箭弹含 10 克 AgI 。对比云位于试验区明光市境内,对比云比催化云出现时间晚 55 分钟,与催化云相距 70km (图 1,见彩图)。

对催化云沿 16° 方向,从距离雷达 50km 到 140km 作垂直剖面(图 2,见彩页),在催化时刻(图 2b),催化部位上部有一个较强的回波中心,强度达到 55dBz,催化后 11 分钟内回波中心向下发展并及地(图 2c),催化后 16 分钟时,在催化部位,回波中心再度加强,强回波发展高度达到 9km 以上(图 2d),随后强回波中心向下发展,并在催化后 27 分钟及地(图 2f)。

3.2.2 雷达特征参量变化对比

为了反映对流云整体发展情况,选择 5km 高度上回波强度 $\geq 30dBz$ 的面积和 $\geq 50dBz$ 的面积分别代表较强回波和强回波的发展情况,面积的计算是根据雷达回波强度图的分辨率($1km \times 1km$)和相应强度所占像素的乘积获得。同时,为了反映对流云对流发展的整体情况,选择回波顶高 $\geq 11km$ 的面积和 $\geq 14km$ 的面积,分别代表对流发展较强和发展强盛的情况,回波顶高 $\geq 11km$ (或 $14km$)的面积的计算是根据雷达回波顶高观测图的分辨率($4km \times 4km$)和相应顶高所占像素的乘积获得。图 3 给出催化云和对比云较强回波和强回波面积时间演变图。

在 7 月 31 日较强回波和强回波面积时

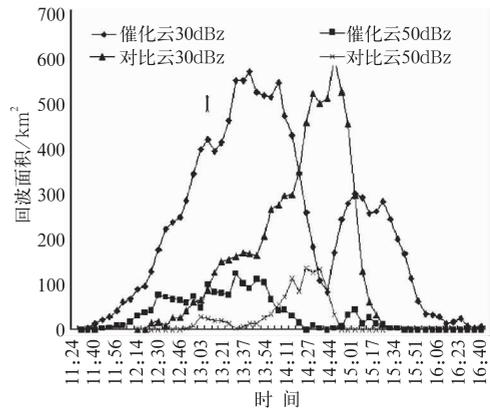


图 3 2004 年 7 月 31 日 5km 高度雷达较强回波和强回波面积时间演变图(图中火箭标示催化时刻)

间演变图上,对比云与催化云变化趋势基本一致,最大面积与催化云也基本相当,由于对比云比催化云晚出现 55 分钟,其演变也滞后 55 分钟左右,但对比云的较强回波和强回波面积减小的速度要比催化云快。对比云的较强回波和强回波面积的最大值与催化云相当,这可能是由于在其发展过程后期其东北部的另一块对流云与之合并,促使它发展更加旺盛的缘故(图 1c)。在回波顶高 $\geq 11km$ 面积和 $\geq 14km$ 面积的时间演变图上(图略),表现出的规律也基本相同。

为反映催化云和对比云液态水含量的差别,我们将 7 月 31 日这一组对流云雷达观测到的各像素元垂直液态积分水(VIL)值与所占像素的乘积代表整块云的总积分含水量,表征对流云的液态水含量。

在 2004 年 7 月 31 日催化云和对比云的总积分含水量随时间的演变图(图 4)上,对比云变化趋势与催化云基本一致,在其他对流云合并的情况下,其最大值甚至高于催化云,但是它减少也很迅速,从表 1 中可以知道它的维持时间小于催化云,而且,在后文的统计中也将看到,其平均值是小于催化云的。

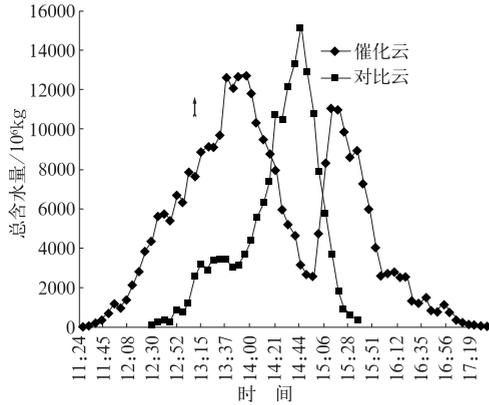


图 4 2004 年 7 月 31 日催化云和对比云总积分含水量时间演变图(图中火箭标示催化时刻)

3.3 2004 年 8 月 1 日试验对比

3.3.1 催化作业情况

2004 年 8 月 1 日的作业点位于试验区凤阳境内出现对流回波,13:42 实施作业,作业仰角 50° ,用弹量 2 枚,每枚火箭弹含 10 克 AgI,对比云位于五河县境内,两块云相距 40km 左右(图 5,见彩页)。

3.3.2 雷达特征参量变化对比

按照同样的方法比较这一组对流云的较强回波和强回波面积的变化,催化云在催化后并没有回波面积增大的情况出现,继续持续减小,对比云在达到最大面积后,也持续减小,两者的发展趋势相同。由于这一组对流云的回波顶高均没有达到 11km,以最大回波顶高来说明其顶高的演变,两者顶高的演变趋势没有明显的区别,它们的最大回波顶高都在 9km,大部分时间维持在 6~8km。

在这一组总积分含水量的时间演变上看,催化云在催化后总积分含水量并没有增长,反而呈下降趋势,而对比云则在增长。结合回波面积变化和最大顶高的演变,这次催化作业并没有起到增大回波面积,增加云的总含水量的目的,对流发展也不明显,无催化效果存在。分析原因,主要是这次作业时机选择的不好,在实施催化作业时,催化云已经

处于减弱阶段(图 5b),这时候作业达不到促使对流云发展和增加云中含水量的目的。

3.4 2004 年 8 月 3 日试验对比

3.4.1 催化作业情况

2004 年 8 月 3 日作业点位于明光境内 $118^\circ 13'E, 32^\circ 28'N$,催化时间在 13:48,作业仰角 60° ,方向东北,用弹 2 枚,每枚火箭弹含 AgI10g。对比云位于催化云北部,两者相距约 50km(图 6,见彩图)。

对催化云沿 52° 方向,从距离雷达 60km 到 150km 作垂直剖面(图 7,见彩页),在催化时刻前 4 分钟(图 7e),催化部位上部有一个较强的回波中心,强度达到 55dBz,催化后 20 分钟回波中心向下发展并及地(图 7f),催化后 28 分钟时,在催化部位前部又发展起来一个较强的回波中心,强度达到 60dBz,强回波发展高度达到 9km 以上(图 7g),随后强回波中心逐渐减弱并向下发展。

3.4.2 雷达特征参量变化对比

同样比较这一组对流云的较强回波和强回波面积的变化,催化云和对比云没有明显的差别,仅仅是对比云的维持时间要小于催化云,这主要是由于对比云在催化云催化时刻后,东北方向和东南方向有其他对流云与之接近(图 6b、c),激发对比云发展造成的。在回波顶高 $\geq 11\text{km}$ 面积和 $\geq 14\text{km}$ 面积的时间演变上看,则有催化云在催化后 $\geq 11\text{km}$ 面积持续增大的现象,而 $\geq 14\text{km}$ 的面积则没有这种迹象。同样,在总积分含水量演变趋势上催化云和对比云的差别也不明显,只是生命期存在差别。

4 雷达特征参量的统计对比分析

为了进一步说明催化云和对比云在回波面积、对流发展和含水量之间的差异,将 3 次催化作业的催化云及其对应的对比云 5km

高度上 ≥ 30 dBz 回波的平均面积、5km 高度上 ≥ 50 dBz 回波的平均面积、整块云回波的平均面积及对应出现的体扫次数列于表 2,

将回波顶高 ≥ 11 km 的平均面积和 ≥ 14 km 的平均面积及出现的体扫次数,以及平均总积分含水量列于表 3。

表 2 催化云和对比云回波面积对比表

云体	≥ 30 dBz 平均回波面积/ km^2	≥ 30 dBz 出现体扫数	≥ 50 dBz 平均回波面积/ km^2	≥ 50 dBz 出现体扫数	平均回波面积/ km^2
0731 催化云	220.0	58	42.6	43	517.3
0731 对比云	199.4	36	45.4	23	406.2
0801 催化云	15.8	19	3.0	1	71.3
0801 对比云	29.4	18	2.5	2	110.4
0803 催化云	182.8	39	28.9	33	381.2
0803 对比云	198.5	31	42.7	24	311.2
催化云平均	139.5	38.7	24.8	25.7	323.3
对比云平均	142.4	28.3	30.2	16.3	275.9

从表 2 中可以看出,3 次催化过程催化云强回波(≥ 50 dBz)平均面积为 24.8km^2 ,小于对比云 18%,平均出现 25.7 次,高出对比云 58%;较强回波(≥ 30 dBz)平均面积,催化云为 139.5km^2 ,小于对比云 2%,平均出现

38.7 次,高出对比云 37%;平均回波面积 323.3km^2 ,高出对比云 17%。可见,催化作业对于回波面积以及较强回波、强回波出现的体扫次数有较好的正效果,而对于较强回波和强回波面积增大的效果则不明显。

表 3 催化云和对比云强(较强)对流面积及平均总积分含水量对比表

	≥ 11 km 平均回波面积/ km^2	≥ 11 km 出现体扫数	≥ 14 km 平均回波面积/ km^2	≥ 14 km 出现体扫数	平均总积分含水量/ 10^6kg	含水量统计体扫数
0731 催化云	318.0	40	47.2	19	4915	65
0731 对比云	301.9	31	219.2	10	4786	34
0801 催化云	/	/	/	/	220	18
0801 对比云	/	/	/	/	365	20
0803 催化云	324.6	30	45.5	13	3448	36
0803 对比云	297.9	23	52.6	14	3177	30
催化云平均	321.3	35.0	46.4	16.0	2861	39.7
对比云平均	299.9	27.0	135.9	12.0	2776	28.0

从表 3 可以看出,2004 年 7 月 31 日和 8 月 3 日两次过程,出现较高顶高(≥ 11 km)的回波平均面积,催化云基本上大于对比云,而且出现的体扫次数要多于对比云;对于顶高 ≥ 14 km 的回波平均面积,催化云均小于对比云,出现的体扫次数相当或高于对比云;平均总液态含水量值,催化云对比比云都要高,而且统计的体扫次数也要多于对比云。

除 2004 年 8 月 1 日外,回波顶高 \geq

11km 的平均回波面积,催化云为 321.3km^2 ,高出对比云 7%,出现的次数平均为 35.0,高出对比云 30%;回波顶高 ≥ 14 km 的平均回波面积,催化云 46.4km^2 ,小于对比云 66%,平均出现 16 次,高出对比云 33%。3 次催化过程,每块云每个体扫的平均总液态含水量,催化云为 $2861 \times 10^6\text{kg}$,略高于对比云的 $2776 \times 10^6\text{kg}$,而统计的体扫次数,催化云平均出现 39.7 次,高出对比云 42%,3 组

对流云总积分含水量,催化云平均达到 $114 \times 10^9 \text{ kg}$,对比云为 $78 \times 10^9 \text{ kg}$,催化云高出对比云 46%,可见催化对于对流云总含水量的增加还是明显的。

5 结论

通过对对流云人工增雨外场试验催化作业中,催化云和对比云雷达特征对比分析,认为:对流云人工增雨催化作业应该掌握好催化的时机,对于已经处在减弱阶段的对流云,人工催化作业达不到增加含水量、延长生命期的目的。

文中统计的3次催化作业,催化云的维持时间平均对比比云长84分钟,高出对比云51.2%。催化云和对比云相比,较强回波的平均面积相当,催化云对比比云略小,而较强回波和强回波出现的体扫次数均高于对比云,分别高出对比云37%和58%;催化云平均回波面积达到 323.3 km^2 ,高出对比云17%。反映对流发展程度的回波顶高,发展较为旺盛($\geq 11 \text{ km}$)的对流平均回波面积,催化云高出对比云7%,出现的体扫次数则对比比云多30%。

从强回波平均面积和回波顶高 $\geq 14 \text{ km}$ 的平均回波面积两个方面看,催化云反而小于对比云,只是出现强回波的时间要长于对比云,看来催化作用,只能增大较强回波的发展,而不能促进强回波的发展。

催化云和对比云相比,催化云每个体扫平均的积分含水量要略高于对比云,而出现的体扫次数则高出对比云42%,在整个维持时间中,催化云总的积分含水量则高出对比云46%。

从3次催化过程上对比分析看,催化作业可以延长催化云的强回波和较强回波的持续时间,增大云的回波面积,以及可以增加云的积分含水量,但对于强回波和较强回波发展则没有明显增强的效果,这与前期研究结果[8]是相似的。随着新一代天气雷达应用的不断深入,利用新一代天气雷达开展人工增雨的物理检验将会成为人工增雨效果检验的重要手段,我们还将在今后的外场试验中去进一步证实人工增雨的物理效果。

参考文献

- [1] 蒋年冲,吴林林,曾光平. 抗旱型火箭人工增雨效果检验方法初步研究[J]. 气象,2006,32(8):54-58.
- [2] 唐林,王治平,丁岳强,等. 湖南省柘溪水库流域空中水汽资源特征及人工增雨潜力[J]. 气象,2006,32(5):29-34.
- [3] 朱龙彪,何彩芬,黄思源. 宁波新一代天气雷达在人工增雨中的应用[J]. 气象,2005,31(7):59-61.
- [4] 陈冰,张深寿,冯晋勤. 新一代天气雷达产品在人工增雨作业中的应用[J]. 气象,2003,29(1):23-26.
- [5] 迟竹萍,陈金敏,朱平盛. 利用数字化雷达回波参数分析人工增雨播云条件[J]. 气象,2000,26(4):46-49+53.
- [6] 赵习方,张蕾,秦长学. 实施飞机人工增雨对密云水库水质中 Ag^+ 影响研究[J]. 气象,2006,32(5):46-51.
- [7] 王以琳,雷恒池. 冷云飞机人工引晶检验[J]. 大气科学,2003,(5):929-938.
- [8] 刘耀宗,王治平,陈历舒. 湖南单块积云高炮增雨随机化试验效果的分析[J]. 气象,1999,25(8):16-21.
- [9] 周勇,王斌,唐仁茂,等. 对流云增雨作业效果回波对比分析[J]. 应用气象学报,2001,12(增刊):158-163.
- [10] 孙旭映,王劲松,王静. 火箭增雨效果雷达回波分析[J]. 干旱气象,2005,(9):39-41.

袁野等：夏季催化对流云雷达回波特征对比分析

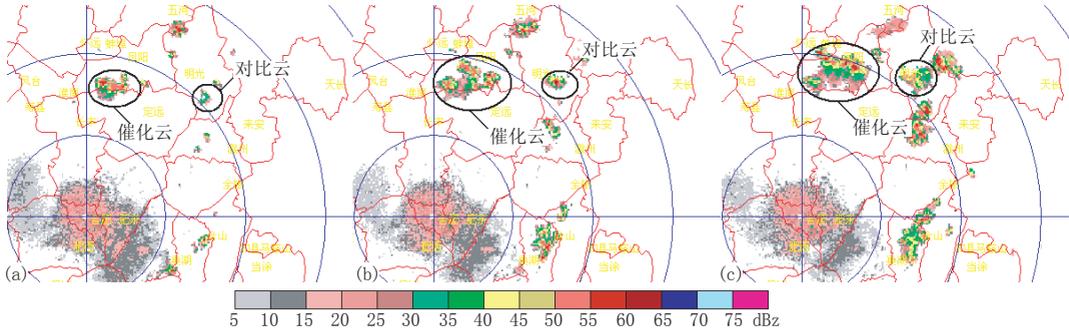


图1 2004年7月31日催化云和两块对比云相对位置及演变图
a: 12:40, b: 13:09, c:13:33, 距离圈间隔为50km

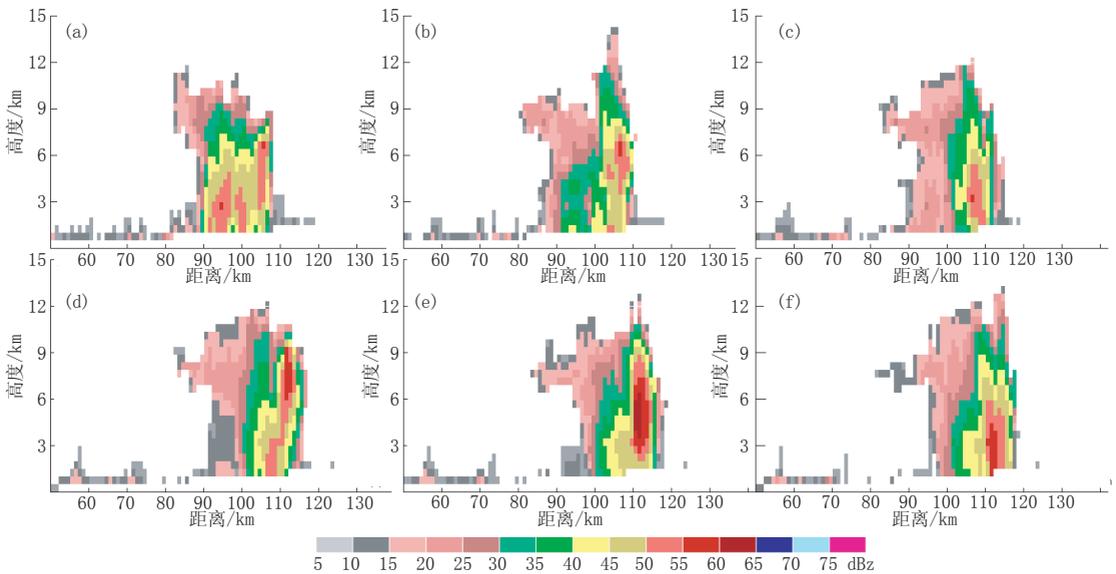


图2 2004年7月31日催化云垂直剖面演变图
a: 12:58, b:13:09, c:13:21, d:13:26, e:13:31, f:13:37, 剖面角度16°, 距离50~140km

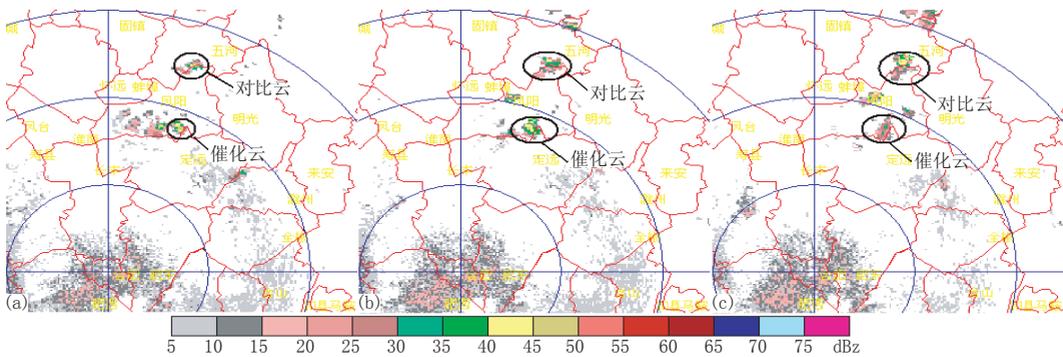


图5 2004年8月1日催化云和对比云相对位置及演变图
a: 13:20, b: 13:41, c:13:58, 距离圈间隔为50km

袁野等：夏季催化对流云雷达回波特征对比分析

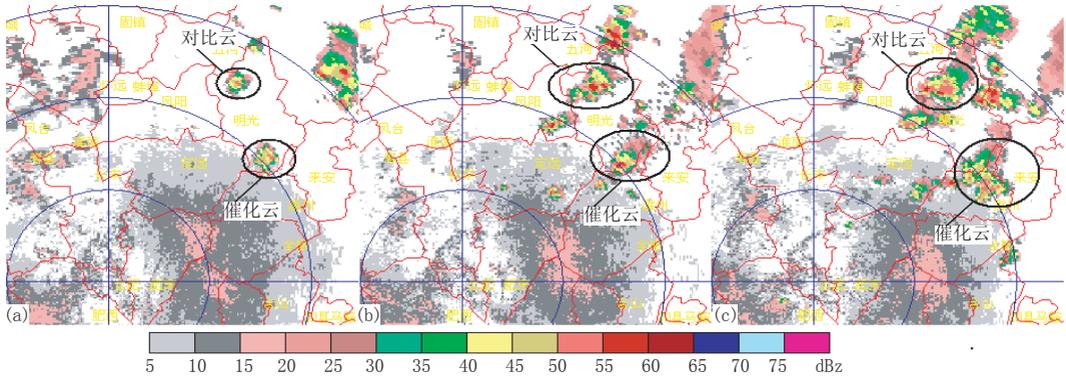


图6 2004年8月3日催化云和对比云相对位置及演变图

a: 13:08, b: 13:50, c:14:33, 距离圈间隔为50km

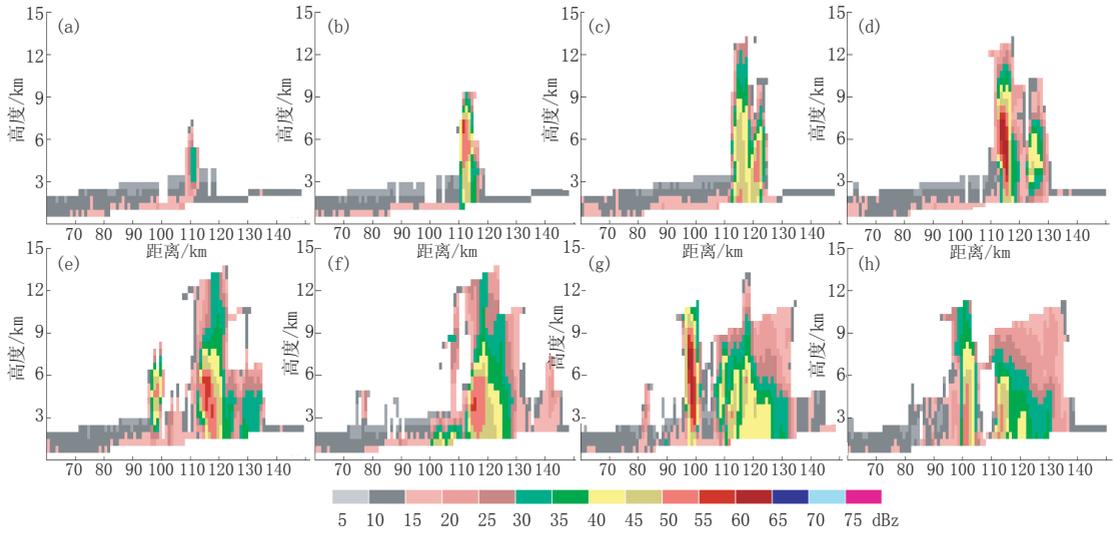


图7 2004年8月3日催化云垂直剖面演变图

a: 12:19, b: 12:38, c: 13:08, d: 13:26, e: 13:44, f: 14:08, g: 14:26 h: 14:39