

唐仁茂, 李德俊, 袁正腾, 等. 2012. 对流云人工增雨雷达效果分析软件的应用 [J]. 气候与环境研究, 17 (6): 871-883, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.06.24. Tang Renmao, Li Dejun, Yuan Zhengteng, et al. 2012. Application of seeding effect analysis software for convective cloud rainfall enhancement with radar products [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17 (6): 871-883.

对流云人工增雨雷达效果分析软件的应用

唐仁茂¹ 李德俊² 袁正腾² 陈英英² 王慧娟² 向玉春³

1 湖北省人工影响天气办公室, 武汉 430074

2 湖北省气象服务中心, 武汉 430074

3 湖北省气象局, 武汉 430074

摘 要 根据雷达回波参量自动选取对比云并进行效果分析的方法, 研制了对流云人工增雨雷达效果分析软件。在此基础上, 对 2008 年湖北省 12 次对流云增雨试验进行了效果检验: 发现其中 10 个个例催化效果良好, 具体表现为增雨作业催化后, 目标云的物理参数发生了比较明显的变化, 回波强度、回波顶高、液态含水量、强回波面积等均增大, 约半小时内达到峰值, 而相应的对比云回波参量增长幅度比目标云小, 或者没有继续发展, 大部分对比云的生命史比目标云短。最后, 通过综合分析, 提出基层作业站点适宜开展人工增雨的催化指标, 在实际应用中取得了良好的效果。

关键词 对流云 人工增雨 效果分析 催化指标

文章编号 1006-9585 (2012) 06-0871-13

中图分类号 P481

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.06.24

Application of Seeding Effect Analysis Software for Convective Cloud Rainfall Enhancement with Radar Products

TANG Renmao¹, LI Dejun², YUAN Zhengteng², CHEN Yingying², WANG Huijuan²,
and XIANG Yuchun³

1 Weather Modification Office of Hubei Province, Wuhan 430074

2 Meteorological Service Center of Hubei Province, Wuhan 430074

3 Meteorological Bureau of Hubei Province, Wuhan 430074

Abstract Seeding effect analysis software for convective cloud rainfall enhancement with radar products has been designed and developed incorporating a method that selects the contrast cloud automatically and analyzes the seeding effect according to the radar echo parameters. Using this software, the effects of 12 pairs of convective precipitation enhancement operation experiments during 2008 in Hubei Province were evaluated. The results indicated that seeding had a good effect in ten cases. The relevant parameters of the seeded cloud changed obviously after the operation; the echo intensity, echo tops, vertically integrated liquid, and echo area increased, reaching a peak half an hour after operation. However, the contrast clouds increased less than the target cloud or stopped developing, and most of the contrast clouds had a shorter lifetime. Finally, the parameters of Doppler weather radar products applicable to precipitation enhancement for basic operation stations that were proven to be effective in practice were selected through comprehensive analysis.

Keywords Convective, Cloud precipitation enhancement, Effect analysis, Seeding index

收稿日期 2012-08-10 收到, 2012-09-28 收到修定稿

资助项目 业务开发项目 QJH2011-161, 湖北省气象局科技发展基金 2012Y03

作者简介 唐仁茂, 男, 1963 年出生, 学士, 主要从事人工影响天气技术研究管理。E-mail: tangrenmao2008@163.com

通讯作者 王慧娟, E-mail: narassa@sohu.com

1 引言

人工增雨作业效果的物理检验是人工增雨试验效果评估中很重要的一个环节,其主要目的是为评估人工增雨效果提供相应的物理学证据(王以琳和雷恒池, 2003; 赵震等, 2005; 雷恒池等, 2008)。由统计学方法得到的人工增雨效果只有在获得物理上的合理解释,并为观测到的物理效应所证实时,人工增雨效果的检验才是完整的和令人信服的。

应用雷达资料进行物理检验在我国许多省市已进行过一些探索(刘耀宗等, 1999; 陈进强和杨连英, 2002; 陈冰等, 2003; 孙旭映等, 2005; 赵瑞金等, 2005; 曹玲等, 2006; 蒋年冲等, 2008; 李红斌等, 2007; 袁野等, 2008),但未涉及应用雷达进行对比云自动选取方面的工作。所谓对比云自动选取,就是针对人影作业的目标云,在作业前从已生成的云中查找出回波参量及其变化特征与目标云最相似的云,从而在作业后对比它们回波参量变化情况以分析检验催化作业效果。唐仁茂等(2010)以多普勒雷达的数据产品为基础,在作业时存在的所有对流单体中,通过比较它们与目标云的生成时间和空间位置,并应用相似离度法判别从其初始生成到作业时的回波参量及其变化特征的相似程度,自动找出对比云,最后给出在整个生命期内目标云的回波参量随时间的变化情况,以及目标云和对比云回波参量在同一时刻和同一发展时期的比较结果。本文针对此方法的实现、在湖北省近几年人工增雨效果检验试验中的应用以及选择最佳作业时机等方面做一下简单介绍。

2 方法的实现

根据李开乐(1986)提出的相似离度原理,建立一套判定指标,实现对比云的自动选取,然后从下面两个方面进行催化效果分析:

(1) 目标云作业前后回波参量的变化: 目标云任一时刻组合反射率 (Composite Reflectivity, CR)、回波顶高 (Echo Top, ET)、垂直液态水含量 (Vertical Integrated Liquid water content, VIL) 和强回波面积 (echo area) 等回波参量值;

(2) 目标云与对比云回波参量的比较: 软件分

别对目标云和对比云整个生命期的回波参量在同一发展时期上进行比较。

2.1 相似离度原理

根据雷达资料来选取对比云,要比较目标云与待选云体的回波参量随时间变化曲线的相似程度。相似比较的数学衡量标准有很多,李开乐等(1986)在列举了其中的几种:如相似系数、海明距离、欧氏距离等,并对它们的优劣给予分析之后,提出描述相似比较完备的统计量——相似离度。它既能体现曲线之间的值差异,又能分析形相似程度,是一种比较全面的相似衡量标准。计算两条曲线的相似离度,其基本原理表述如下。

假定二维平面上有两条曲线*i*和*j*(如图1所示),对*X*取值*M*次,第*k*次*X*值为*X_k*,对应的曲线*i*的*Y*值为*Y_{ik}*,曲线*j*的*Y*值为*Y_{jk}*,则其相似离度*C_{ij}*可表示为:

$$C_{ij} = \frac{1}{2}(D_{ij} + S_{ij}), \quad (1)$$

其中,

$$D_{ij} = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M |Y_{ijk}|, \quad (2)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M |Y_{ijk} - E_{ij}|, \quad (3)$$

$$Y_{ijk} = Y_{ik} - Y_{jk}, \quad (4)$$

$$E_{ij} = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M Y_{ijk}, \quad (5)$$

其中,*Y_{ijk}*表示*X*为*X_k*时曲线*i*和*j*的*Y*值之差,而*E_{ij}*即是两曲线*i*和*j*的*Y*值之差的总平均。公式

(2)中*D_{ij}*是两曲线*Y*值之差绝对值的总平均,它反映出两条曲线在总平均数值上差异程度,称之为值系数,值越小,表明两曲线在数值上越接近;公式(3)中*S_{ij}*表示两曲线各个*Y*值之差*Y_{ijk}*对其总

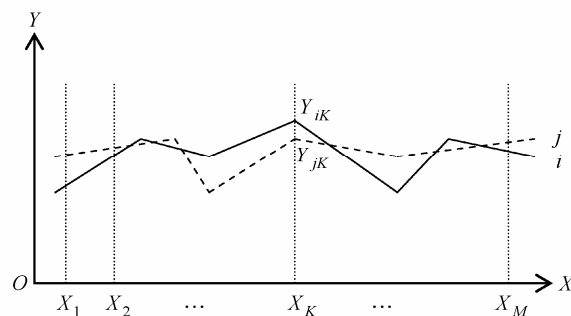


图1 二维平面上曲线*i*和

Fig. 1 Curves *i* and *j* on 2-D plane

平均 E_{ij} 的离散程度, 反映出两曲线的形相似程度, 称之为形系数, 值越小, 表明两曲线的形状越相似。综上所述, 相似离度 C_{ij} 由 D_{ij} 和 S_{ij} 共同决定, 为简便起见 C_{ij} 取两者的平均值。

2.2 对比云自动选取方法

气象雷达详细地给出各个时刻云的回波参量值(回波强度、回波顶高、垂直液态水含量等), 通过建立目标云作业前后这些参量的演变或目标云与对比云的回波参量的差异来分析人工增雨催化的效果。选择对比云, 需要一定的条件控制。

2.2.1 建立选取对比云的指标

建立选取对比云的指标: 生成时间之差 T 、空间距离 D 、强回波面积之差 A 、组合反射率之差 C 、回波顶高之差 E 、垂直液态水含量之差 V 和风向。

$|T| \leq 60 \text{ min}$, $|T|$ 越小, 目标云和对比云的相似性越好。通过目标云和对比云的空间位置(X 、 Y 坐标)可以得到两者距离 D , $25 \text{ km} \leq D \leq 100 \text{ km}$, 目标云和对比云之间的距离不能太近也不宜太远。太近, 对比云可能受到催化影响; 太远, 相似性不好。结合风向, 对比云不能处于目标云的下风向。

另外, $|A| \leq 10 \text{ km}^2$, $|C| \leq 5 \text{ dBZ}$, $|E| \leq 2 \text{ km}$, $|V| \leq 2 \text{ kg m}^{-2}$, 强回波面积、组合反射率、回波顶高和垂直液态水含量作为人工增雨效果的物理检验参数已得到广泛的认同(陈进强和杨连英, 2002; 陈冰等, 2003; 赵震等, 2005; 曹玲等, 2006; 蒋年冲等, 2008; 雷恒池等, 2008), 因而把它们作为对比云判别的指标是非常有必要的。有时, 对流单体的雷达回波参量随时间变化值差异很大, 在实际应用中, 可以根据具体情况对指标进行修改订正。

2.2.2 确定对流单体的生命期

多普勒雷达的二次产品数据每 6 min 一次, 数据时次间隔比较均匀。在作业开始前的时刻, 根据风暴追踪信息产品记录的该时刻的对流单体的编号和位置等信息, 得到当时已经生成的所有对流单体。依据编号向前回溯, 可以找到各个单体生成的时刻; 向后, 则可以找到单体消亡的时刻。

这样, 就可以得到当时所有对流单体的生命期和在生命期内各时刻的强回波面积、组合反射率、回波顶高和垂直液态水含量等回波参量, 以及这些参量随时间变化的曲线。

2.2.3 计算回波参量的相似离度

对生成时间、位置和方向符合条件的对流单

体, 计算它们与目标云在作业前的回波参量变化曲线的相似离度。由于目标云与待选单体的生成时间不尽相同, 且目标云作业前的生命期长度与待选单体的也不定相等, 所以计算前需进行两方面考虑:

(1) 不以时间作为 X 轴, 而是以数据时次作为 X 轴。将目标云和待选单体的生成时间看成数据时次 1, 它们各自的后一个数据时次作为数据时次 2, 再后一个数据时次作为数据时次 3, 以此类推, 直到作业前的数据时次。

(2) 目标云与待选单体两者中在作业前数据时次少的一方, 其作业前最后一个数据时次记为数据时次 M 。

计算目标云与待选单体的强回波面积、组合反射率、回波顶高和垂直液态水含量的相似离度, 得到 $C_{ij}(A)$ 、 $C_{ij}(C)$ 、 $C_{ij}(E)$ 和 $C_{ij}(V)$ 。在计算值系数 D_{ij} 时, 通过判别指标 A 、 C 、 E 和 V 进行剔除, 排除掉部分待选单体。各个参量的 D_{ij} 须符合指标条件: $D_{ij}(A) \leq 10$, $D_{ij}(C) \leq 5$, $D_{ij}(E) \leq 2$, $D_{ij}(V) \leq 2$ 。符合条件的对流单体作为选取的对比云集合。

最后, 将目标云与待选单体的 4 个回波参量的相似离度作算术平均, 得到综合的相似离度 C_{ij} :

$$C_{ij} = \frac{1}{4} [C_{ij}(A) + C_{ij}(C) + C_{ij}(E) + C_{ij}(V)], \quad (6)$$

C_{ij} 最小的即为最佳的对比云。

3 人工增雨效果检验的应用

选取了 2008 年湖北省十堰市夏季 12 个针对对流云人工增雨催化作业的个例, 作业信息如表 1 所示, 利用研制的对流云雷达跟踪监测及效果分析软件对所有个例进行了效果检验方面的分析。可以看出, 在单纯以增雨为目的的前提下, 个例 1 至个例 10 效果较好, 下面对此进行重点分析。

组合反射率反映的是雷达体扫垂直气柱中所有回波强度进行比较在对应格点上显示最大反射率因子值。由图 2 组合反射率 CR 可以看出, 作业时组合反射率最大值都大于 40 dBZ, 回波较强, 是由于夏季针对对流云作业除少量个例为单纯增雨作业外, 多以防雹为目的, 但其周围相对较弱的对流云区仍有一定的增雨潜力, 并且在成雹阶段之前以人工激发阵雨的形式冲刷云中水分, 使云全部或部分地消散, 也是人工影响强积云防止其降雹的可能途径。作业前半小时内组合反射率呈现持续增

表 1 对流云人工增雨催化作业信息表
Table 1 The artificial precipitation information of seeded convective clouds

个例	作业日期	作业开始时间	作业结束时间	作业类型	作业点	作业前天气	作业后天气
1	2008-06-01	14:50	14:55	增雨、防雹	十堰大柳	对流云	中雨
2	2008-06-01	17:45	17:50	增雨、防雹	十堰牌楼	对流云	阵雨
3	2008-06-12	12:50	13:00	增雨、防雹	十堰双台	对流云	阵雨
4	2008-06-12	14:20	14:30	增雨、防雹	十堰楼台	对流云	阵雨
5	2008-06-12	12:47	12:57	增雨、防雹	十堰蒿坪河	对流云	阵雨
6	2008-06-27	18:45	18:50	增雨、防雹	十堰蒿坪河	对流云	阵雨
7	2008-07-04	15:57	16:08	增雨	十堰习家店	零星小雨	阵雨
8	2008-07-04	16:25	16:26	增雨	十堰丁家营	零星小雨	阵雨
9	2008-07-04	23:46	23:50	增雨	十堰习家店	阵雨	强雷阵雨
10	2008-07-11	17:30	17:33	增雨、防雹	十堰双台	对流云	雷阵雨
11	2008-06-01	17:20	17:30	增雨、防雹	十堰楼台	对流云	雹云消失
12	2008-06-01	17:10	17:20	增雨、防雹	十堰大庙	对流云	雹云消失

注：时间均为北京时间。

长或间断性起伏变化。

一般而言，对流的强弱在一定程度上和回波伸展的高度有关，所以 ET 产品可用来分析估计雷达探测范围内不同地区的对流发展与否，以及对流相对强弱的情况。由图 3 回波顶高 ET 图像产品可以看出，选择催化的目标云对流发展较为旺盛，云顶高度呈逐渐增高或维持状态。作业时有 80%的回波顶高在 8 km 以上，20%的回波顶高 5~8 km 之间，说明 8 km 以上的高度区间最适宜进行人工增雨催化作业。

VIL 产品是反映降水云体中，在某一确定的底面积（一般为 1 km×1 km、2 km×2 km 和 4 km×4 km 3 种，单位为 kg m⁻²）的垂直柱体内液态水总量的分布图像产品。它是判别强降水及其降水潜力、强对流天气造成的暴雨、暴雪和冰雹等灾害性天气的有效工具之一。由图 4 垂直积分液态含水量可以看出，作业前绝大多数目标云的垂直积分液态水含量在 7.5~27.5 kg m⁻²，平均值为 18.5 kg m⁻²，即云中已累积了一定量的水成物。作业后 30 min 内会迅速增长，证明催化处于发展阶段的对流云，可促使云体进一步发展，云水含量增加。

区别于以上几个参量变化，强回波面积（大于 45 dBZ）在半小时内可呈现显著增长变化，如图 5 强回波面积所示，且不同个例间的回波面积也有显著不同，如以上个例作业时的强回波面积就在 5~264 km² 间不等，究其缘由，有的对流云作业时并未发展到 45 dBZ，而有的对流云发展较强，并

且计算强回波面积时有可能合并有周围其他的对流云。强回波面积为两个或多个单体面积的叠加，分析时应结合组合反射率产品的演变加以区别对待。

总之，由表 1 与利用对流云人工增雨方法对增雨作业效果分析来看，所选个例从增雨的催化效果角度可以分为两组，其中个例 1 至个例 10 有良好的催化效果，而个例 11、12 催化效果不好。良好的催化效果体现在：催化后，目标云发生了比较明显的变化，回波强度、强回波面积、回波顶高、液态含水量等催化后均增大，约 30 min 内都能达到最强，云顶黑体亮温降低；而相应的对比云增大率比目标云小，或者没有增大，大部分的生命期比目标云短。

以个例 2 至个例 4 为例对良好的催化效果进行详细说明，如表 2 所示：催化后，回波强度在 18~24 min 内达到最大，增大了 10 dBZ，增大率为 20% 左右；回波顶高 6~42 min 内达到最高，最大增高 4.5 km，增大率在 13%~53%之间；液态水含量在 9~25 min 内达到最大，最大增大了 35 kg m⁻²，增大率在 44%~280%之间；强回波面积在 18~36 min 内达到最大，增大率在 6%~166%之间。上述统计的 4 个特征量在催化后约 30 min 左右都能达到最强。另外，3 个个例目标云的生命史分别为 78、114、60 min，远大于对比云的 36、60、30 min，说明作业后对流云的生命史延长，使增加降水的效果更为显著。

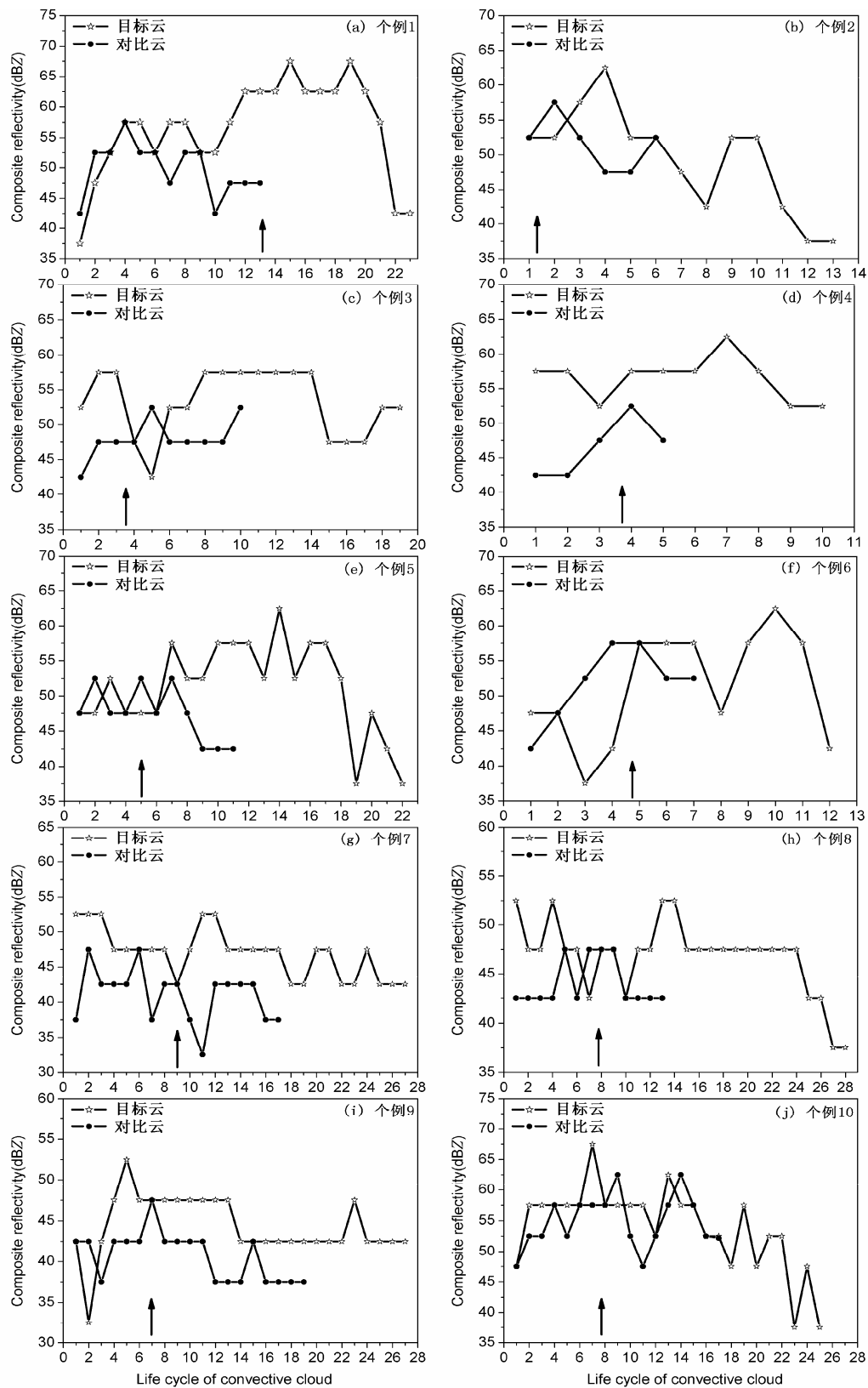


图2 个例1至个例10作业前后组合反射率的演变(横坐标表示对流云生命周期,每6 min取1次;图中箭头表示增雨作业开始时间)

Fig. 2 Comparison of composite reflectivity between seeded cloud and contrast cloud for case 1 to case 10 (x-axis means life cycle of convective cloud which is read every six min; diagram arrow stands for operation starting time)

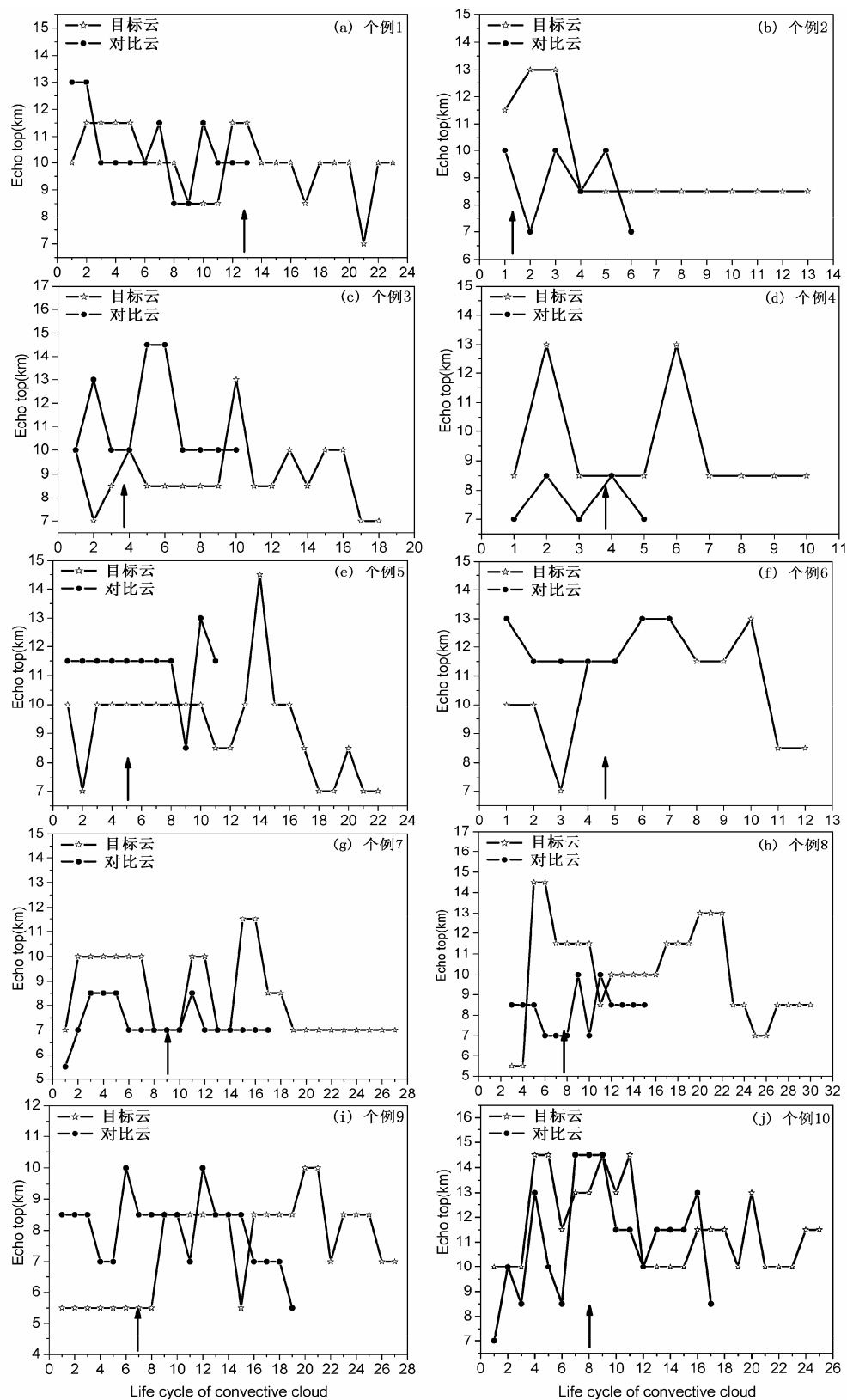


图3 个例1至个例10作业前后目标云与对比云雷达回波顶高的演变(横坐标表示对流云生命周期,每6 min取1次;图中箭头表示增雨作业开始时间)

Fig. 3 Comparison of echo top between seeded cloud and contrast cloud for case 1 to case10 (x-axis means life cycle of convective cloud which is read every six min; diagram arrow stands for operation starting time)

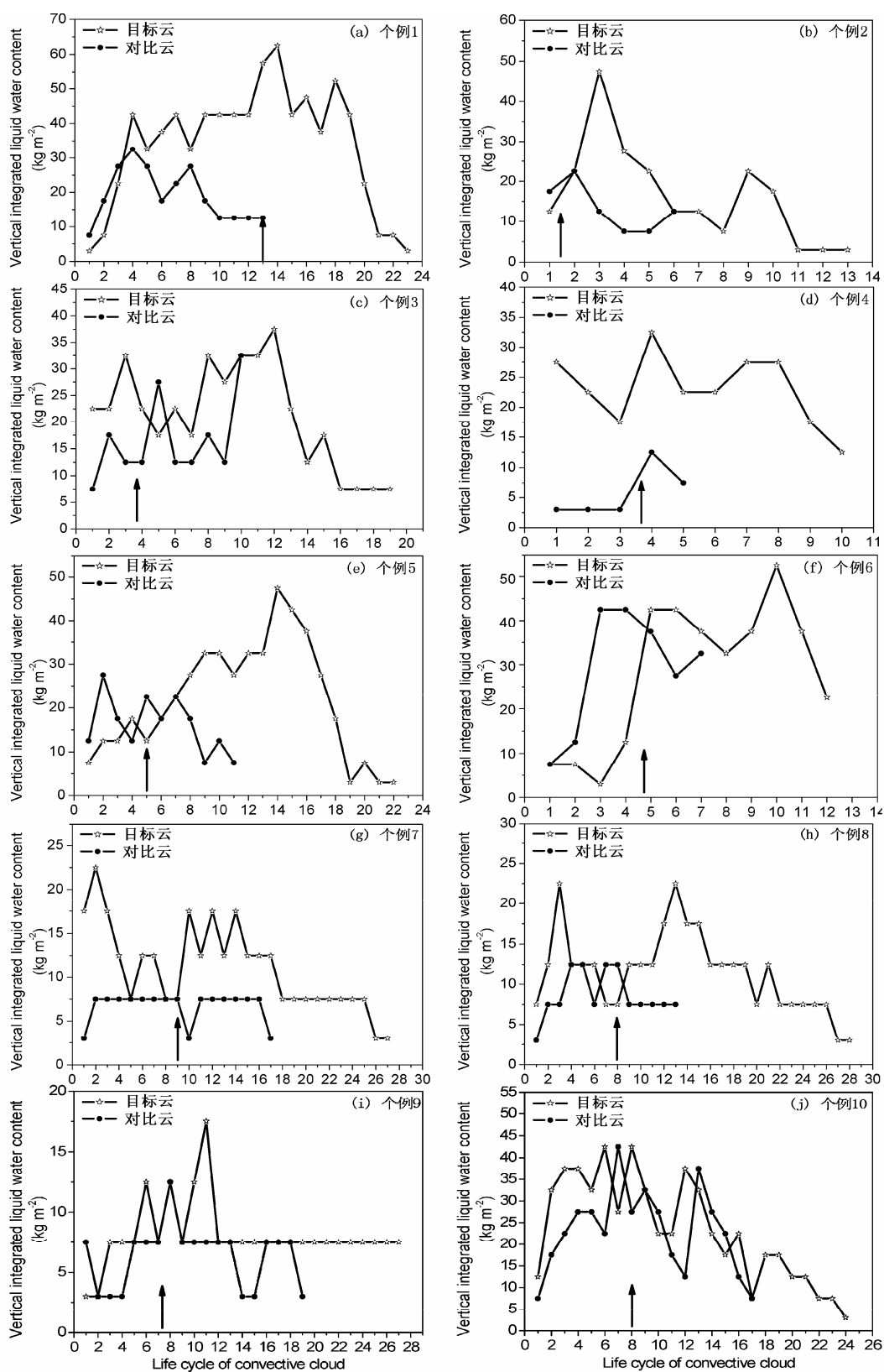


图4 个例1至个例10作业前后垂直积分液态水含量的演变(横坐标表示对流云生命周期,每6 min取1次;图中箭头表示增雨作业开始时间)

Fig. 4 Comparison of vertically integrated liquid between seeded cloud and contrast cloud for case 1 to case 10 (x-axis means life cycle of convective cloud which is read every six min; diagram arrow stands for operation starting time)

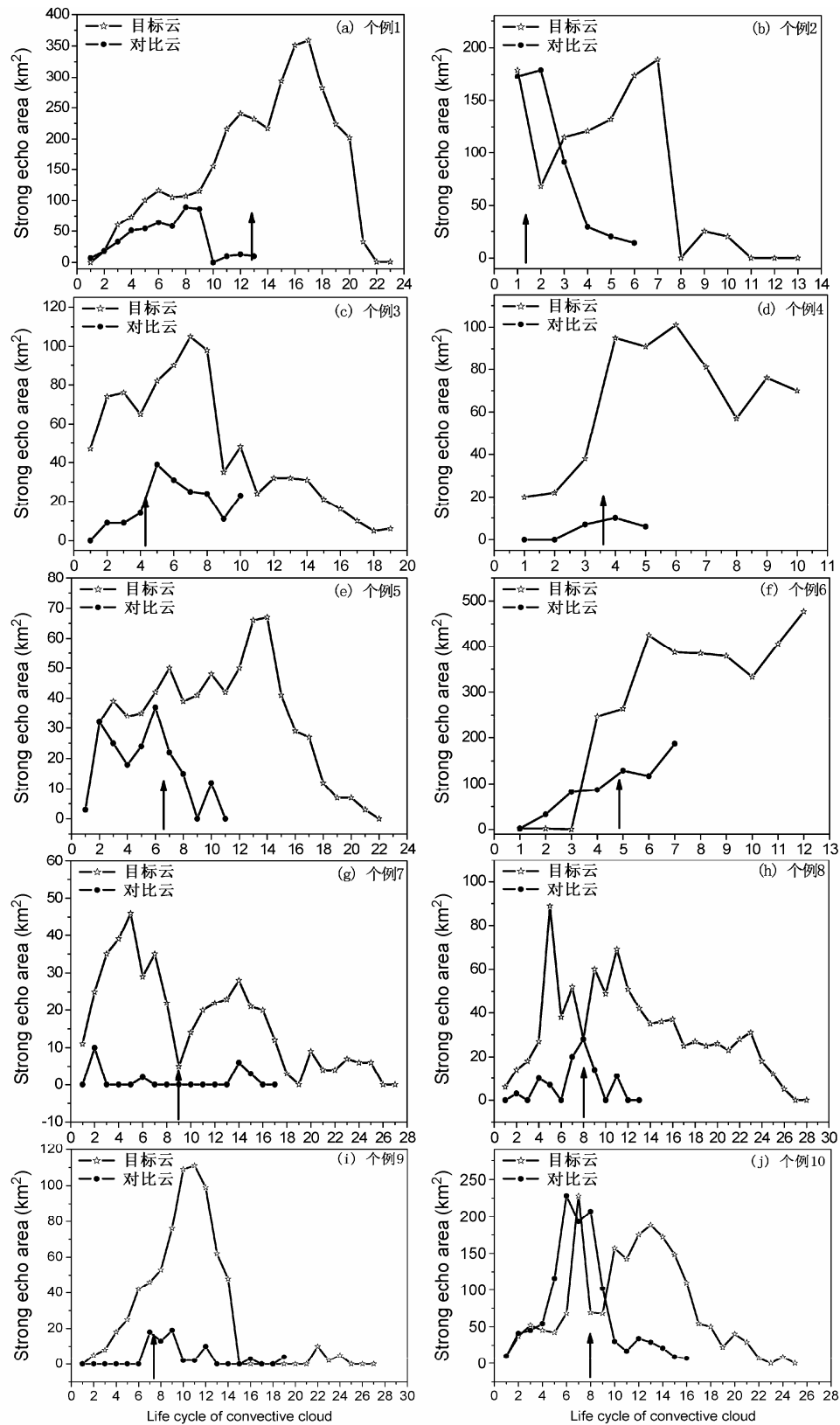


图5 个例1至个例10作业前后强回波面积的演变(横坐标表示对流云生命周期,每6 min取1次;图中箭头表示增雨作业开始时间)

Fig. 5 Comparison of strong echo area between seeded cloud and contrast cloud for case 1 to case 10 (x-axis means life cycle of convective cloud which is read every six min; diagram arrow stands for operation starting time)

表 2 个例 2 至个例 4 目标云、对比云回波参数变化

Table 2 The echo parameters' changes of seeded clouds and contrast clouds among case 2 to case 4

个例	分析对象	强度			回波顶高			液态水含量			>45dBZ 回波面积		
		时间 (min)	增大值 (dBZ)	增大率	时间 (min)	增大值 (km)	增大率	时间 (min)	增大值 (kg m ⁻²)	增大率	时间 (min)	增大值 (km ²)	增大率
2	目标云	18	10	19%	6	1.5	13%	12	35	280%	36	10	6%
	对比云	6	5	10%		维持		6	5	40%	6	6	3%
3	目标云	24	10	21%	42	4.5	53%	24	10	44%	18	40	62%
	对比云	6	5	11%	12	4.5	45%	6	15	120%	6	25	179%
4	目标云	24	10	19%	18	4.5	53%	6	15	86%	18	63	166%
	对比云	6	5	11%	6	1.5	21%	6	9.5	317%	6	3	43%

注：目标云时间表示催化后各参数达到最强所经历的时间；对比云时间是指与目标云催化时同一发展阶段之后达到最强所经历的时间。增大率为增大值与催化时刻参数值的比值百分数。

4 最佳作业条件分析

通过上述应用对流云人工增雨效果分析，发现有个别个例作业效果不太理想，是什么因素导致催化效果的差异？这里主要从作业前目标云的雷达回波特征入手，分析总结了有利的对流云人工作业条件，确定作业指标。虽然个例 11、个例 12 增雨作业效果不理想，但有明显的防雹作用，如图 6 所示，在作业之后 30 min 内，CR、ET、VIL 都呈现迅速减小的变化特征，分析可能是发展旺盛的单个雹云单体，催化作业以后雹云迅速减弱消散。

表 3、表 4 给出了对流云人工增雨效果显著的 10 次典型个例分析作业前期半小时内雷达产品参量（组合反射率、回波顶高、回波面积、垂直积分累积含水量）变化特征，可以看出，作业前半小时内组合反射率呈现持续增长或间断性起伏变化，云中需已累积了一定量的水成物，云顶高度呈逐渐增高或维持状态，回波面积在 30 min 内可呈现显著增长变化，但不同个例间的回波面积也有显著不同。

表 3 作业前雷达回波参量数值范围统计

Table 3 The value range of echo parameters' statistics before seeding

组合反射率		回波顶高		垂直积分液态水	
数值范围 (dBZ)	所占 比率	数值范围 (km)	所占 比率	数值范围 (kg m ⁻²)	所占 比率
[30~40)	0	<5	0	<5	0
[40~50)	60%	[5~8)	20%	[5~10)	30%
≥50	40%	≥8	80%	≥10	70%

表 4 作业前雷达回波参量状态变化统计

Table 4 The changes of echo parameters' state before seeding

	组合反射率	回波顶高	垂直积分液态水
作业前增长	50%	40%	70%
维持大值	50%	60%	30%

通过对上述各个图表的综合分析可以得到适宜进行催化作业的条件：

（1）回波中心位于云体中上部，回波顶部反射率梯度大且向上增长，作业前 30 min 内处于不断增长或上下小幅波动维持大值阶段，是火箭增雨作业的最佳时机。组合反射率要大于 40 dBZ，超过 50 dBZ 的强对流云要以防雹作业为主，小于 30 dBZ 增雨效果不明显。

（2）对流发展较为旺盛，云顶高度呈逐渐增高或维持状态。雷达回波顶高在 8 km 以上，至少达到 5 km。

（3）云中需累积一定量的水成物，最大垂直积分液态水含量要达到 10 kg m⁻² 或以上，作业前 30 min 内处于增长阶段。催化这种处于发展阶段的对流云，可促使云体进一步发展，云水含量增加。

（4）不同对流云的强回波（大于 45 dBZ）面积大小差异较大，无法确定催化作业的具体量化指标，分析时应结合组合反射率产品的演变加以区别对待，但作业前半小时内均应呈现增长变化。

若积云回波发展达到如上指标并向作业点作业范围内移动发展，可选择为具有作业潜力的对象，进入射程随时作业。

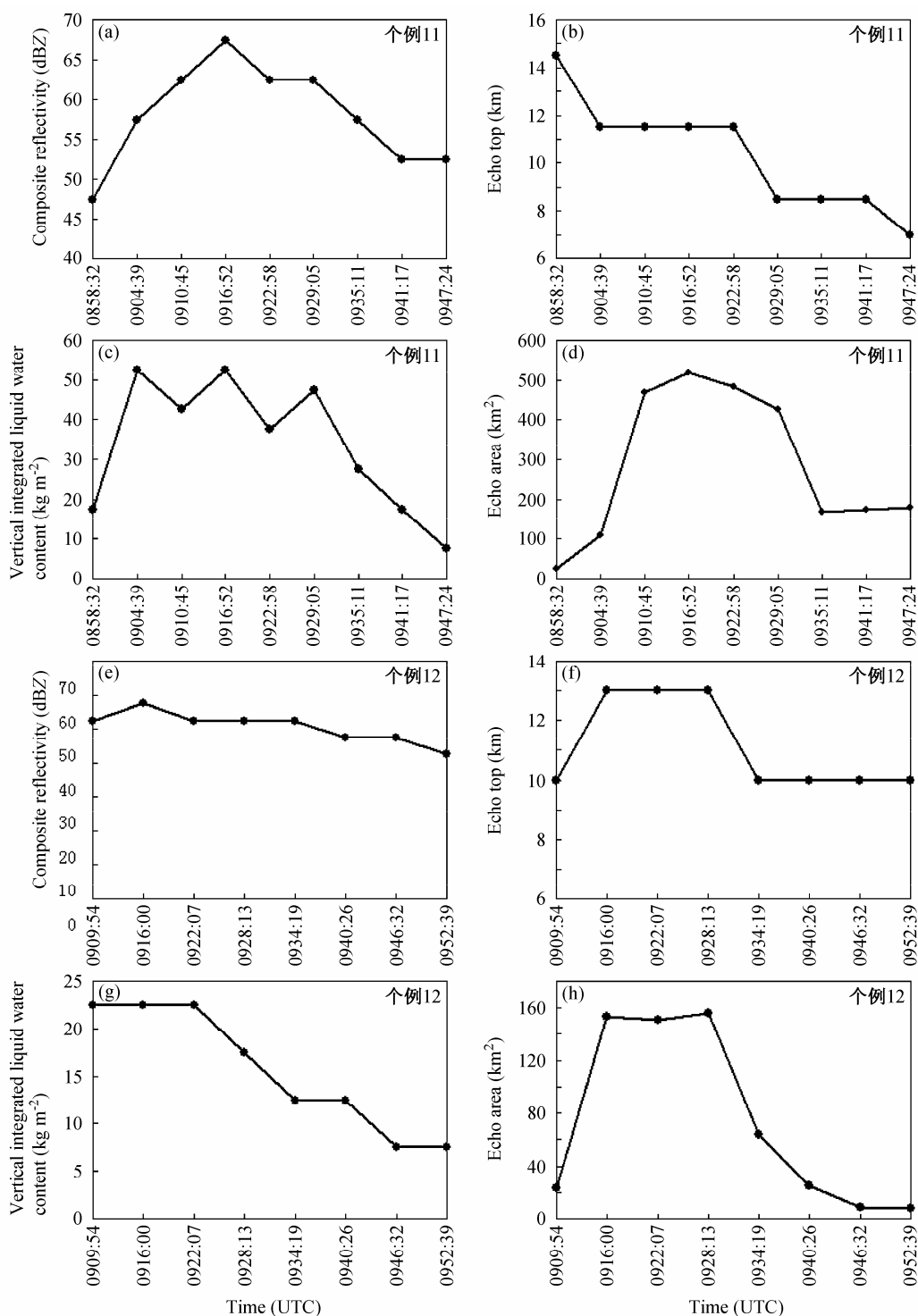


图6 个例11、个例12作业前后回波参量随时间的演变: (a、e) 组合反射率; (b、f) 回波顶高; (c、g) 垂直积分液态水含量; (d、h) 强回波面积

Fig. 6 Evolution of echo parameters with time for case 11 and case 12: (a, e) Composite reflectivity; (b, f) echo top; (c, g) vertical integrated liquid water content; (d, h) echo area

在2011年湖北省冬春连旱时期,各地利用这些指标来选择最佳作业时机,取得了很好的作业效果。如2011年5月21日21:15至21:20期间,咸宁

龙潭炮点附近组合反射率为42.5 dBZ,回波顶高为7~8.5 km,液态水含量达3~5 kg m⁻²,满足适宜增雨作业条件,于是开展增雨作业。利用对流云

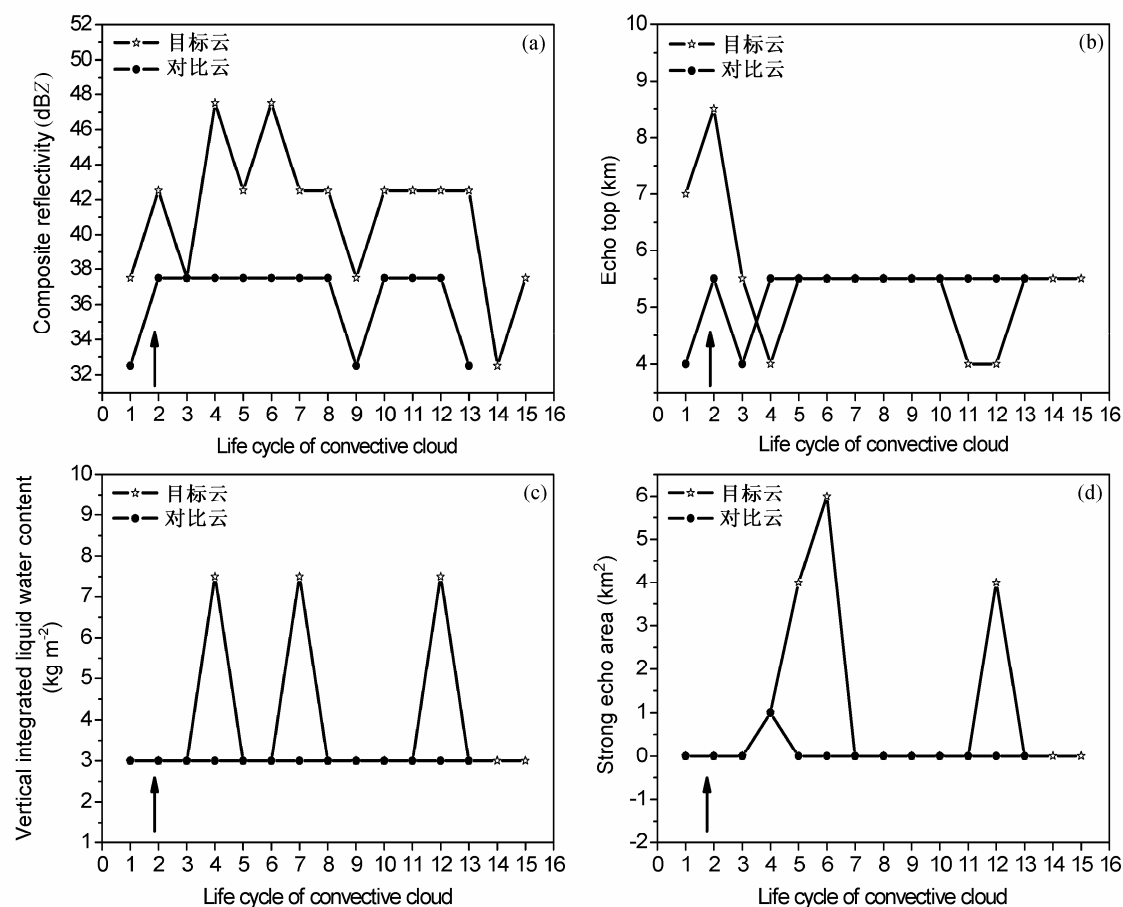


图7 目标云与对比云回波参量随时间的变化(横坐标表示对流云生命周期,每6 min取1次;图中箭头表示增雨作业开始时间): (a) 组合反射率; (b) 回波顶高; (c) 垂直积分液态水含量; (d) 强回波面积

Fig. 7 The echo parameters changes of seeded cloud and contrast cloud (x-axis means life cycle of convective cloud which is read every six min; diagram arrow stands for operation starting time): (a) Composite reflectivity; (b) echo top; (c) vertically integrated liquid water content; (d) strong echo area

人工增雨效果分析方法发现,催化作业后目标云发生了比较明显的变化,回波强度、强回波面积、回波顶高、液态含水量等催化后均有不同的增大(图7)。

同时还发现催化作业后10 min内,距离炮点下风方10.8 km的激光雨滴谱开始显示有毛毛雨0.005 mm,40 min以后显示累积雨量为1.53 mm,6 h累积雨量为16.81 mm。从图8咸宁雨滴谱监测信息可以看出,作业前雨滴谱较窄,雨滴数较少,作业后1 h雨滴谱变宽,出现了3 mm的大粒子,粒子数量级增加了2个级别,降雨强度逐渐增大。

5 结论

(1) 基于相似高度原理设计的依据雷达回波

自动选取对比云的方法能实时快速识别出对比云,追踪目标云与对比云在整个生命期内的回波参量特征,并以图表形式给出目标云自身变化特征和对比结果。它在一定程度上能够消除人为判别的误差,提高效果分析的科学性。

(2) 对2008年12次增雨作业个例分析,发现10个个例均有良好的催化效果,而仅个例11、个例12催化效果不好,良好的催化效果体现在:增雨作业催化后,目标云发生了比较明显的变化,回波强度、强回波面积、回波顶高、液态含水量等催化后均增大,约30 min内都能达到最强;而相应的对比云增大率比目标云小,或者没有增大,大部分的生命期比目标云短。

(3) 通过综合分析,找出了基层作业站点开展人工增雨的几个适宜催化条件,在实际应用中取得了不错的效果。

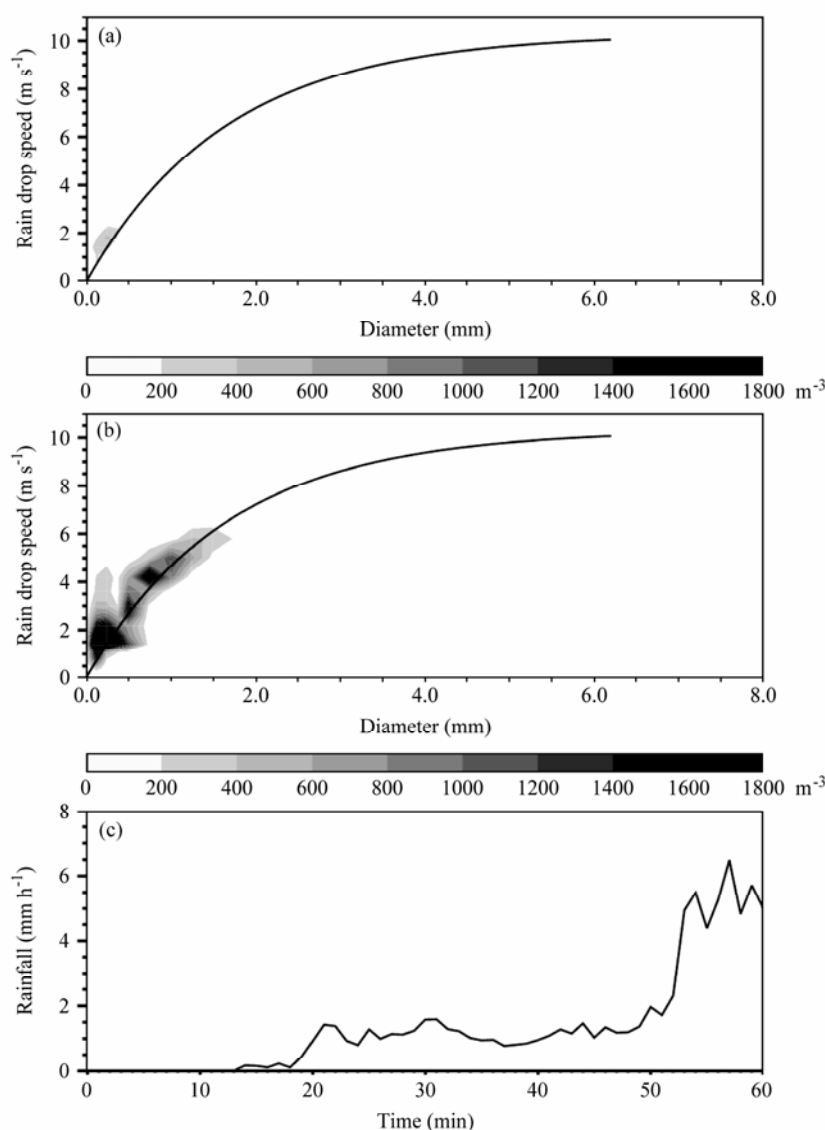


图8 作业前后咸宁雨滴谱的监测信息: (a) 20:15 至 21:15、(b) 21:15 至 22:15 谱分布 (阴影, 单位: m^{-3}), 曲线表示速度与粒径的拟合关系; (c) 21:15 至 22:15 分钟雨强

Fig. 8 Observation of laser precipitation monitor before and after the operation at Xianning: (a) 20:15 LST to 21:15 LST and (b) 21:15 LST to 22:15 LST spectral distribution (shaded, units: m^{-3}), curves show the fitting relationship between speed and size; (c) 21:15 LST to 22:15 LST 1-min rainfall intensity

参考文献 (References)

- 陈冰, 张深寿, 冯晋勤, 等. 2003. 新一代天气雷达在人工增雨作业中的应用 [J]. 气象, 29 (1): 23–26. Chen Bing, Zhang Shenshou, Feng Jinle, et al. 2003. Application of CINRAD data to artificial precipitation enhancement in the west of Fujian [J]. Journal of Meteorological Monthly (in Chinese), 29 (1): 23–26.
- 陈进强, 杨连英. 2002. 多普勒天气雷达在人工影响天气中的应用 [J]. 气象科技, 30 (2): 127–128. Chen Jinqiang, Yang Lianying. 2002. Application of doppler radar to weather modification [J]. Journal of Meteorological Science and Technology (in Chinese), 30 (2): 127–128.
- 曹玲, 李国昌, 郭建华, 等. 2006. 多普勒雷达产品在祁连山区一次人工增雨作业中的应用分析 [J]. 干旱气象, 24 (2): 39–44. Cao Ling, Li Guochang, Guo Jianhua, et al. 2006. Application analysis of Doppler radar products in an artificial rain enhancement operation in Qilian mountain area [J]. Journal of Arid Meteorology (in Chinese), 24 (2): 39–44.
- 蒋年冲, 曾光平, 袁野, 等. 2008. 夏季对流云人工增雨效果评价方法初探 [J]. 气象科学, 28 (1): 100–104. Jiang Nianchong, Zeng Guangping, Yuan Ye, et al. 2008. Preliminary study on effect test methods of artificial rainfall enhancement in summer convective clouds [J]. Journal of Meteorological Sciences (in Chinese), 28 (1): 100–104.
- 雷恒池, 洪延超, 赵震, 等. 2008. 近年来云降水物理和人工影响天气研究进展 [J]. 大气科学, 32 (4): 967–974. Lei Hengchi, Hong Yanchao, Zhao Zhen, et al. 2008. Advances in cloud and precipitation physics and weather modification in recent years [J]. Chinese Journal Atmospheric Sciences (in Chinese), 32 (4): 967–974.

- 李红斌, 何玉科, 周德平, 等. 2007. 多普勒雷达数值产品在火箭增雨效果分析中的应用 [J]. 气象科技, 35 (2): 269–273. Li Hongbin, He Yuke, Zhou Deping, et al. 2007. Application of doppler radar numerical products to effectiveness analysis of precipitation enhancement [J]. Journal of Meteorological Science and Technology (in Chinese), 35 (2): 269–273.
- 李开乐. 1986. 相似离度及其使用技术 [J]. 气象学报, 44 (2): 174–183. Li Kaile. 1986. A new similarity parameter and its application [J]. Journal of Meteorological Sciences (in Chinese), 44 (2): 174–183.
- 刘耀宗, 王治平, 陈历舒. 1999. 湖南单块积云高炮增雨随机化试验效果的分析 [J]. 气象, 25 (8): 16–21. Liu Yaozong, Wang Zhiping, Chen Lishu. 1999. Effect analysis on rain enhancement of single cumulus randomized seeding experiment in Hunan Province [J]. Journal of Meteorological Monthly (in Chinese), 25 (8): 16–21.
- 孙旭映, 王劲松, 王静. 2005. 火箭增雨效果雷达回波分析 [J]. 干旱气象, 23 (3): 39–41. Sun Xuying, Wang Jinsong, Wang Jing. 2005. Analysis of radar echoes on effects of rain enhancement by AgI-loading rockets [J]. Journal of Arid Meteorology (in Chinese), 23 (3): 39–41.
- 唐仁茂, 袁正腾, 向玉春, 等. 2010. 依据雷达回波自动选取对比云进行人工增雨效果检验的方法. 气象, 36 (4): 96–100. Tang Renmao, Yuan Zhengteng, Xiang Yuchun, et al. 2010. A method for selecting contrast cloud automatically based on radar echo in effectiveness evaluation of rain enhancement [J]. Journal of Meteorological Monthly (in Chinese), 36 (4): 96–100.
- 王以琳, 雷恒池. 2003. 冷云飞机人工引晶检验 [J]. 大气科学, 27 (5): 929–938. Wang Yilin, Lei Hengchi. 2003. Test of cold cloud seeding [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 27 (5): 929–938.
- 袁野, 冯静夷, 蒋年冲, 等. 2008. 夏季催化对流云雷达回波特征对比分析 [J]. 气象, 34 (1): 41–47. Yuan Ye, Feng Jingyi, Jiang Nianchong, et al. 2008. Contrast analysis on echo characteristics of summer seeded cumulus clouds [J]. Journal of Meteorological Monthly (in Chinese), 34 (1): 41–47.
- 赵瑞金, 杨保东, 李江波. 2005. 多普勒雷达产品在人工增雨效果检验中的应用 [J]. 气象科技, 33 (增刊): 57–65. Zhao Ruijin, Yang Baodong, Li Jiangbo. 2005. Application of doppler weather radar to effectiveness evaluation of precipitation enhancement [J]. Journal of Meteorological Science and Technology (in Chinese), 33 (Suppl.): 57–65.
- 赵震, 雷恒池, 吴玉霞. 2005. MM5 中新显式云物理方案的建立和数值模拟 [J]. 大气科学, 29 (4): 609–619. Zhao Zhen, Lei Hengchi, Wu Yuxia. 2005. A new explicit microphysical scheme in MM5 and numerical simulation [J]. Chinese Journal Atmospheric Science (in Chinese), 29 (4): 609–619.