

唐仁茂,袁正腾,向玉春,等. 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[J]. 气象,2010,36(4):96-100.

# 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

唐仁茂 袁正腾 向玉春 叶建元 刘剑 高进

湖北省人工影响天气办公室, 武汉 430074

**提 要:** 针对对流云人工增雨作业效果的物理检验, 提出了一种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。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, 并应用相似高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。依据该方法, 研制了对流云人工增雨雷达效果分析软件。试验证明: 该方法实用性较强, 能够快速识别出对比云, 在一定程度上消除人为判别的误差, 提高对流云人工增雨作业效果分析的科学性。

**关键词:** 人工增雨, 催化效果, 多普勒雷达, 相似高度, 自动选取对比云

## A Method for Selecting Contrast Cloud Automatically Based on Radar Echo in Effectiveness Evaluation of Rain Enhancement

TANG Renmao YUAN Zhengteng XIANG Yuchun YE Jianyuan LIU Jian GAO Jin

Weather Modification Office of Hubei Province, Wuhan 430074

**Abstract:** A method of selecting contrast cloud automatically and analyzing the seeding effect according to radar echo parameters is brought forward, aiming at physical test of convective cloud precipitation enhancement. Based on the Doppler radar data products, the contrast cloud is selected automatically in all convective cells at the very time when seeding by comparing their beginning time, position and orientation with those of seeded cloud, and calculating the analog deviation of varying characteristics of echo parameters before seeding. Then, it is presented the variation of echo parameters of seeded cloud and comparison between echo parameters of seeded cloud and that of contrast cloud. In view of this method, a set of seeding effect analysis software of convective cloud rainfall enhancement with radar products has been designed and developed. The software has been used in the precipitation enhancement operation experiments in Hubei Province. The results show that this method can identify the contrast cloud in real-time, eliminate errors caused by man-made judging to some extent, and make the effect analysis on convective cloud rainfall enhancement more scientifically.

**Key words:** rainfall enhancement, seeding effect analysis, Doppler radar, analog deviation, automatic choice of contrast cloud

## 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<sup>[1]</sup>。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。

气象雷达是人工影响天气作业指挥、效果评估

及云和降水研究的重要手段。利用多普勒天气雷达对云和降水过程实施加密观测,获取云和降水过程发生、发展到消亡全过程的多普勒气象雷达体积扫描和 RHI 资料,进一步得到回波强度、回波顶高、径向速度、降水强度和液态含水量等资料,这些资料为研究人工催化增雨的物理响应证据提供了基础数据。

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<sup>[2-9]</sup>,但未有应用雷达进行对比云自动选取方面的研究。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。相似离度法<sup>[10]</sup>能从样本曲线之间的距离(数值差异)和形状两个方面去全面比较两个样本之间的相似程度,已被广泛地应用于气象领域,如降水预报、台风路径预报、冰雹、沙尘暴天气的入型判别和预报等<sup>[11-14]</sup>。本文针对对流云人工增雨作业效果的物理检验,提出一种基于相似离度原理,根据雷达回波参量自动选取对比云的方法。

### 1 相似离度原理

根据雷达回波参量来选取对比云,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若干种,李开乐<sup>[10]</sup>在列举几种描述相似的统计量,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。相似离度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),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:

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

其中:

$$D_{ij} = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M |Y_{ijk}| \tag{2}$$

$$S_{ij} = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M |Y_{ijk} - E_{ij}| \tag{3}$$

$$Y_{ijk} = Y_{ik} - Y_{jk} \tag{4}$$

$$E_{ij} = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M Y_{ijk} \tag{5}$$

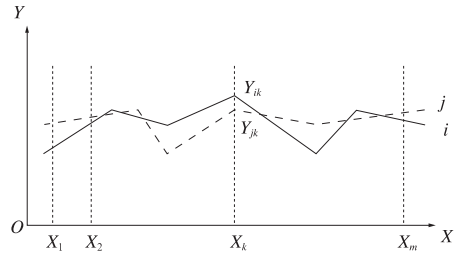


图 1 二维平面上曲线  $i$  和  $j$

Fig. 1 Curves  $i$  and  $j$  on 2D plane

在此, $Y_{ijk}$ 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。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;式(3)中  $S_{ij}$  表示两曲线各个  $Y$  值之差  $Y_{ijk}$  对其总平均  $E_{ij}$  的离散程度,反映出两曲线的形相似程度,称之为行系数,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 对比云自动选取方法

气象雷达可以详细地给出云的回波参量(回波顶高、回波厚度、回波强度、径向速度场等),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。

#### 2.1 建立选取对比云的指标

建立选取对比云的指标:生成时间差  $T$ 、空间位置  $P$ 、强回波面积差  $A$ 、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。

$|T| \leq 60$  分钟,  $|T|$  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。

$|A| \leq 10 \text{ km}^2$ ,  $|C| \leq 5 \text{ dBz}$ ,  $|E| \leq 2 \text{ km}$ ,  $|V| \leq 2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ,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<sup>[2-8]</sup>,因而把它们作为对比云判别的指标是非常有必要的。对流单体的雷达回波参量随时间变化其值的差异有时会很很大,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 确定对流单体的生命期

多普勒雷达的二次产品数据每 6 分钟一次,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。

## 2.3 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四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 方法的实现与应用

### 3.1 实现

按照自动选取对比云的方法,研制了对流云人工增雨雷达效果分析软件,界面如图 2 所示。软件主要包括数据转换、雷达产品查询显示、对比云选取和效果分析四个功能模块。软件设计了设置对比云判别参数的对话框,供用户根据实际情况订正指标。

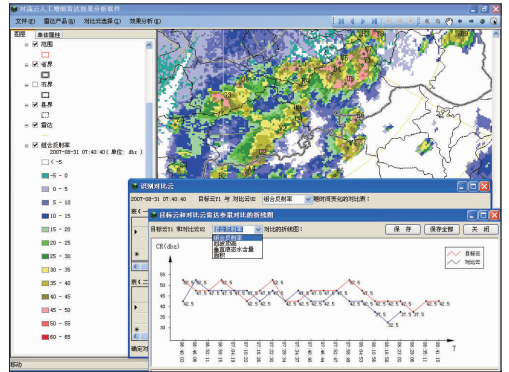


图 2 对流云人工增雨雷达效果分析软件  
Fig. 2 Software of seeding effect analysis

选定对比云后,用户可以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:软件给出目标云从生成到消亡整个生命期的强回波面积、组合反射率、回波顶高和垂直液态水含量等回波参量值,并绘制其随时间变化的折线图;(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时刻和同一发展时期上进行比较,并绘制对比的折线图。

### 3.2 应用

该软件在 2007 年湖北省东部地区人工增雨效果检验外场试验中进行了应用<sup>[15]</sup>,对 3 次对流云试验个例都能方便快速地找出对比云(见表 1)。

下面具体分析 8 月 31 日 07:49(世界时,下同)湖北阳新地面火箭作业的个例,目标云 Y1,软件自动选取对比云为 E6。Y1 与 E6 生成时间分别为 06:40 和 07:34(相差 56 分钟),分属两块不同的主体回波,相距约 35 km,且 E6 在 Y1 移向的垂直方向上,不会相互影响。各发展阶段的强回波面积、组合反射率、回波强度和垂直液态水含量比较接近。

表 1 目标云和选定的对比云

Table 1 Three samples of seeded clouds and contrast clouds

序号	试验日期	作业时间	目标云			对比云		
			编号	生成时间	消亡时间	编号	生成时间	消亡时间
1	8月3日	03:58	J8	02:37:07	04:50:20	X9	02:49:13	04:13:54
2	8月3日	06:03	V7	05:56:53	06:27:06	K6	05:38:45	06:08:56
3	8月31日	07:49	Y1	06:40:03	08:41:15	E6	07:34:37	09:05:30

目标云作业前后强回波面积、组合反射率、回波顶高和垂直液态水含量随时间变化的折线图(图 3)显示:(1)强回波面积在作业前后分别出现高数值; (2)组合反射率和垂直液态水含量在作业前波动较大,作业后 9 分钟(07:49—07:58)再次达到最大值;

(3)回波顶高在作业前 9 分钟达到最大值,作业后维持最高值约 26 分钟(07:49—08:16),之后逐渐减小。

目标云与对比云的强回波面积、组合反射率、回波顶高和垂直液态水含量对比的折线图(图4)显示:

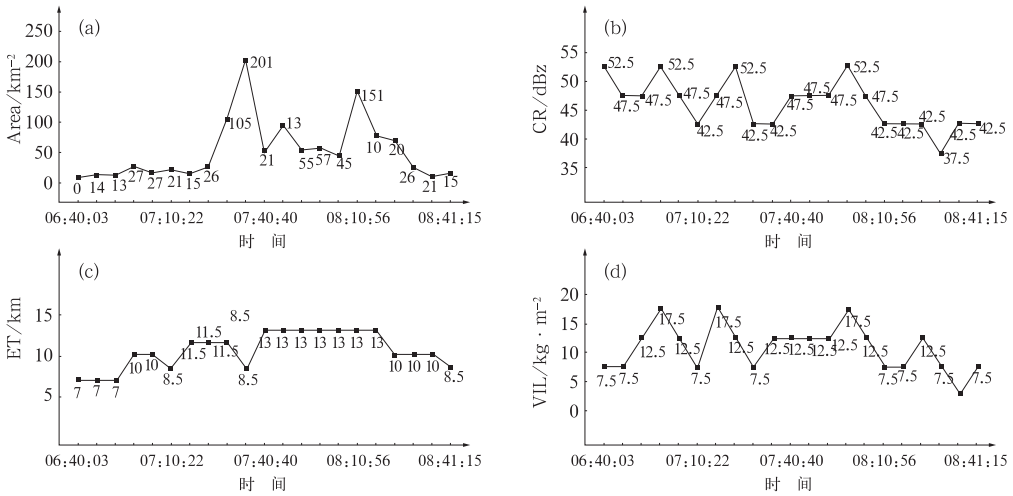


图 3 目标云回波参量随时间的变化

(a) 目标云强回波面积随时间的变化; (b) 目标云组合反射率随时间的变化; (c) 目标云回波顶高随时间的变化; (d) 目标云垂直液态水含量随时间的变化

Fig. 3 Changes in echo parameters' of seeded clouds

(a) echo area, (b) composite reflectivity, (c) echo top, (d) vertically integrated liquid water content

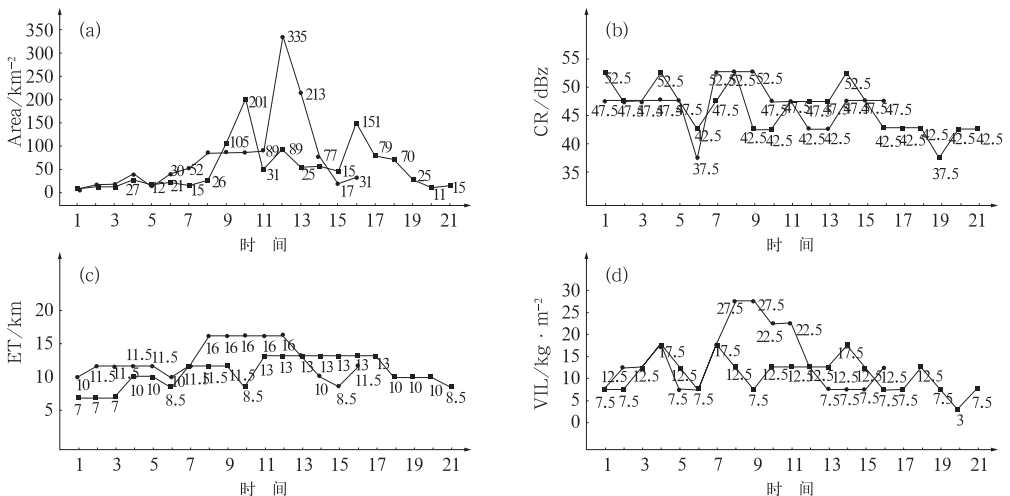


图 4 目标云和对比云回波参量的对比

(a) 目标云和对比云的强回波面积随时间的变化; (b) 目标云和对比云的组合反射率随时间的变化; (c) 目标云和对比云的回波顶高随时间的变化; (d) 目标云和对比云的垂直液态水含量随时间的变化

Fig. 4 Comparison of echo parameters between seeded clouds and contrast clouds

(a) echo area, (b) composite reflectivity, (c) echo top, (d) vertically integrated liquid water content

(1)目标云的生命期比对比云的长约 30 分钟;(2)目标云的强回波面积在作业前后分别出现高峰值,而对比云仅有一个高峰值;(3)目标云与对比云的组合反射率和垂直液态水含量的变化曲线相似;(4)目标云的回波顶高在作业后维持最高值约 26 分钟,而对比云的回波顶高最高值持续时间比目标云的短。从此个例的对比分析看,催化作业对延长目标云寿命和最大回波顶高的持续时间,增大云的强回波面积起了一定的积极作用。

## 4 结 语

(1) 基于相似离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) 对于某些试验个例,判别对比云的指标过于苛刻,找不到对比云。笔者考虑可以对判别指标进行分级。比如,组合反射率之差 $|C| \leq 5$  dBz 为一级, $5 < |C| \leq 10$  dBz 为二级, $10 < |C| \leq 15$  dBz 为三级。

(3) 应用结果表明,找出的对比云在前期发展趋势与目标云相似,而目标云的生命期比对比云的长,强回波面积多一个峰值,回波顶高极值持续时间长,说明催化效果明显。

**致谢:** 在此对中国气象局人工影响天气中心郭学良研究员、汪晓滨副研究员的指导和帮助深表感谢!

## 参考文献

- [1] 中国气象局科技发展司. 人工影响天气岗位培训教材[M]. 北京:气象出版社,2003:233-235.
- [2] 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.
- [3] 陈进强,杨连英. 多普勒天气雷达在人工影响天气中的应用[J]. 气象科技,2002,30(4):186-190.
- [4] 陈冰,张深寿,冯晋勤,等. 新一代天气雷达在人工增雨作业中的应用[J]. 气象,2003,29(1):23-26.
- [5] 曹玲,李国昌,郭建华,等. 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]. 高原气象,2006,24(2):39-44.
- [6] 李红斌,何玉科,周德平,等. 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,2007,35(2):269-273.
- [7] 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.
- [8] 张瑞波,刘丽君,钟小英,等. 利用新一代天气雷达资料分析飞机人工增雨作业效果[J]. 气象,2010,36(2):70-75.
- [9] 袁野,冯静夷,蒋年冲,等. 夏季催化对流云雷达回波特征对比分析[J]. 气象,2008,34(1):41-47.
- [10] 李开乐. 相似离度及其使用技术[J]. 气象学报,1986,44(2):174-183.
- [11] 刘爱梅,王金霞,卓鸿. 相似离度法在逐日降水概率预报中的应用[J]. 湖北气象,2002,(3):31-33.
- [12] 张丰启,崔晶,王仁胜. 相似离度在入型判别和定时定点定量预报中的应用[J]. 气象,2002,(9):44-48.
- [13] 王遂缠,王锡稳,李栋梁,等. 相似离度在甘肃省冬春季强沙尘暴天气入型判别和预报中的应用研究[J]. 中国沙漠,2004,(6):26-30.
- [14] 刘勇,吴必文,王东勇. 一种台风路径相似检索的算法研究[J]. 气象,2006,32(7):18-24.
- [15] 唐仁茂,向玉春,叶建元,等. 多种探测资料在人工增雨作业效果物理检验中的应用[J]. 气象,2009,35(8):70-75.