

一次人工增雨作业中 CA-FCM 与其他 评估方案的比较研究

房彬¹ 肖辉² 班显秀¹ 宫蔚蔚³

(1. 辽宁省人工影响天气办公室, 辽宁 沈阳 110016; 2. 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029;
3. 沈阳市气象局, 辽宁 沈阳 110168)

摘要:根据2002年4月5日河南省人工催化增雨作业数据,分别采用作业区域趋势对比双比分析评估方案、区域趋势相关回归评估方案、区域趋势协变量多元回归评估方案、FCM(浮动对比区历史回归)评估方案、以降水量为协变量的CA-FCM评估方案和以降水量与整层大气可降水量为协变量的CA-FCM评估方案进行效果评估。结果表明:协变量由降水量和整层大气降水量2个组成的CA-FCM方法,由于引入了不受催化影响的物理协变量作为控制因子,以及采用了聚类分析提高了对比区和影响区相关性,其评估效果最好,显著水平高于0.05;其他评估方法评估效果较差。

关键词:CA-FCM;效果评估方案;聚类分析;统计检验;整层大气可降水量;人工增雨作业效果

中图分类号:P481 **文献标识码:**A **文章编号:**1673-503X(2008)04-0013-06

1 引言

客观、科学和定量地评价人工增雨效果是人工影响天气学科的重要组成部分。效果评估方法的研究不仅能促进人工影响天气学科的发展,而且也能增雨作业提供科学依据。几十年来,根据国内外所进行的大量外场试验研究,云物理工作者设计出2大类试验方案——随机试验和非随机化试验。

随机化试验^[1]不依赖于历史资料,对适于催化的云块、降水时段和降水过程通过随机抽样来决定是否作业,并根据随机抽样理论,定量的检验效果并指定其可靠程度,因而统计学家认为随机化试验是最可靠的检验播云效果的方法。但是,由于随机试验周期长,需要大量的样本,而且方法本身也难以避免少数极值的影响,难以排斥自然云本身的不确定因素,并且要求放弃一半的可作业机会,因此一般在作业中很少采用这种试验方案。这种方案主要用于研究工作中。

非随机化试验对业务作业来说是一种花费少、易获取增雨效果的方法,它已在世界范围广泛应用,并为播云有效性提供了一些证据。现有的各种非随机化实验都是在一定的假设前提下利用一定的控制变量(预报变量或协变量)估计作业区自然雨量,再与作业区实测雨量对比评估作业效果。但是现有的非随机化试验均存在作业范围广、作业目标区不固

定、作业区和对比区的选择存在主观性等问题^[2]。为了解决这个问题,国内外科学家提出了许多方法,如移动目标区方法^[3]、浮动控制法(FCM)^[4-6]和非固定目标区增雨评估法^[7]等。这些方法都在播云试验中得到了应用,并取得了一定的效果,但是仍然存在对比区和作业区相关性差、功效^[8-9]偏低等问题。本文提出一种新的评估方案——基于聚类的浮动对比区历史回归人工增雨效果统计检验方法(CA-FCM)^[10],并就一次增雨作业的评估结果分别与作业区域趋势对比双比分析评估方案、区域趋势相关回归评估方案、区域趋势协变量多元回归评估方案、FCM(浮动对比区历史回归)评估方案相比较,从而得出效果最好的评估方案。

2 资料和评估方案

2.1 资料选择及处理

选择2002年4月5日河南省人工催化增雨作业个例(表1)进行评估。在1971—1989年河南省降水

表1 2002年4月5日河南省人工增雨作业信息

作业开始时间	作业结束时间	飞行轨迹	催化剂名称
10:35:00	12:10:00	新郑—洛阳—焦作— 辉县—新乡—郑州	AgI溶液; 焰弹

资料中选取与2002年4月5日天气形势和降水云系条件相似的非催化单元作为历史统计资料,并对统

收稿日期:2008-01-11;修订日期:2008-03-25。

基金项目:国家自然科学基金(40333033)、国家自然科学基金(40175001)、国家“十五”科技攻关计划(2001BA610A-06-05)、“奥运科技”专项(2001BA904B09)和中国科学院大气物理研究所创新项目(8-4605)共同资助。

作者简介:房彬,女,1977年生,工程师,主要从事人工增雨效果评估方面的研究。

计资料进行正态变换,取雨量的对数值和整层大气可降水量的立方值,然后利用柯尔莫哥洛夫定理对其进行正态分布的拟合度检验,得到其与正态分布函数差异不显著,正态分布性好。

2.2 评估方案选择

文献[10]提出了一种新的试验方案——基于聚类的浮动对比区历史回归人工增雨效果统计检验方法(CA-FCM方法)。这种方法采用了聚类分析和雨量网格插值,并引入物理协变量作为控制因子,从而对原有的非随机化试验进行了重要改进。为了研究这种新的评估方案是否优于其他评估方案,本文分别采用作业区域趋势对比双比分析评估方案、区域趋势相关回归分析方案、区域趋势协变量多元回归分析方案、浮动对比区历史回归分析方案(FCM)、以降水量为协变量的CA-FCM方法和以降水量和整层大气可降水量为协变量的CA-FCM方法6种评估方案对2002年4月5日河南省人工催化增雨作业个例进行效果评估。

3 CA-FCM等6种评估方案

3.1 以降水量为协变量的CA-FCM方法分析评估方案

3.1.1 聚类分析用于影响区和对比站点划分

CA-FCM方法是利用作业区域内各气象站的长期雨量资料,根据统计学中的聚类分析方法,将作业区域分成若干个副区,然后分别对每个副区进行效果评估。

总影响区。以飞机播撒路线上的700 hPa高空风3 h传输距离以内所覆盖的范围作为总影响区。

副影响区。总影响区与某副区相叠合的范围。

对比站点。选择上述副影响区所位于的副区中未受作业影响的站点和与副影响区所位于的副区相关性高的其他副区中的未受作业影响的站点作为对比站点。图1给出了2002年4月5日河南省增雨作业影响区和对比站点划分

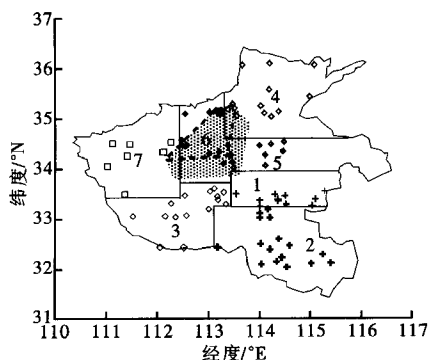


图1 2002年4月5日河南省增雨作业影响区和对比站点划分

业影响区和对比站点划分情况,其中1—7区为根据聚类分析方法划分的7个副区,阴影区即为总影响区,总影响区(阴影区)与标号为4的副区相重合的范围即为4号副影响区,位于4号副区且位于4号副影响区之外的站点为对比站点。

3.1.2 变量选择

选取非催化单元对比站点3 h累积降水量为自变量,副影响区3 h累积降水体积 $V^{(k)}$ 为因变量。副影响区3 h累积降水体积 $V^{(k)}$ 的计算方法:在副影响区上叠加上5 km×5 km网格,根据雨量站历史资料进行格点插值,计算出网格交叉点的雨量值。然后,根据公式:

$$V^{(k)} = 10^{-6} (S_e^{(k)} / n_e^{(k)}) \sum_{i=1}^{n_e} p_i^{(k)} \quad (1)$$

式(1)中, $S_e^{(k)}$ 和 $n_e^{(k)}$ 分别为副影响区的面积和格点个数; $p_i^{(k)}$ 为第*i*个格点的3 h累积降水量; k 为副区序号。求得副影响区的3 h累积降水体积 $V^{(k)}$ (km^3)。

3.1.3 建立副影响区自然降水体积 $\hat{V}^{(k)}$ 的多元回归预报方程

副影响区的自然降水体积 $\hat{V}^{(k)}$ 的多元预报回归方程:

$$\hat{V}^{(k)} = d^{(k)} + \sum_{i=1}^{n_1} a_i R_i^{(k)} + \sum_{j=1}^{n_2} a_j R_j^{(k)} \quad (2)$$

式(2)中, $R_i^{(k)}$ 和 $n_1^{(k)}$ 分别为副影响区所位于的副区内的对比站点的降水量和对比站点的个数; $R_j^{(k)}$ 和 $n_2^{(k)}$ 分别为与副影响区所位于的副区相关性高的副区中的对比站点的降水量、对比站点的个数; k 为副区序号。

3.1.4 作业期总影响区自然雨量的估计值

式(2)作为副影响区自然降水体积的预报方程,将催化单元作业时段对比站点的各个物理量代入方程,得出每个副影响区的自然降水体积期望值 $\hat{V}^{(k)}$ 。然后,根据所有副影响区的自然降水体积期望值的和,得出总影响区的自然降水体积期望值 \hat{V} ,绝对增雨量 $\Delta V = V - \hat{V}$ 或相对增雨率 $R = \Delta V / \hat{V}$ 。

3.2 以降水量和整层大气可降水量为协变量的CA-FCM方法分析评估方案

3.2.1 物理协变量

本方案比前一种方案增加了一个物理协变量,整层大气可降水量 $W_i^{(k)}$ 。整层大气可降水量用如下的经验公式^[11-12]:

$$W_i = \exp(b'_0 + b'_1 t_d) \quad (3)$$

式(3)中, $W_i^{(k)}$ 为测站上空整层大气的可降水量; t_d 为地面露点温度; b'_0 和 b'_1 为经验系数。

3.2.2 建立副影响区自然降水体积 $\hat{V}^{(k)}$ 的多元回归预报方程

副影响区的自然降水体积 $\hat{V}^{(k)}$ 的多元预报回归方程:

$$\hat{V}^{(k)} = d^{(k)} + \sum_{i=1}^{n_1} a_i R_i^{(k)} + \sum_{j=1}^{n_2} a_j R_j^{(k)} + \sum_{i=1}^{n_1} b_i W_i^{(k)} + \sum_{j=1}^{n_2} b_j W_j^{(k)} \quad (4)$$

式(4)中, $R_i^{(k)}$ 、 $W_i^{(k)}$ 和 $n_1^{(k)}$ 分别为副影响区所位于的副区内的对比站点的降水量、整层大气可降水量和对比站点的个数; $R_j^{(k)}$ 、 $W_j^{(k)}$ 和 $n_2^{(k)}$ 分别为与副影响区所位于的副区相关性高的副区中的对比站点的降水量、整层大气可降水量和对比站点的个数; k 为副区序号。

3.2.3 作业期总影响区自然雨量的估计值

总影响区的自然降水体积期望值 \hat{V} 的计算同以降水量为协变量的 CA-FCM 方法分析评估方案。

绝对增雨量 $\Delta V = V - \hat{V}$, 相对增雨率 $R = \Delta V / \hat{V}$ 。

3.3 作业区域趋势对比双比分析评估方案

分别收集作业区和对比区的作业时段雨量 Y_2 和 X_2 , 以及作业前时段相应的雨量 Y_1 和 X_1 , 在自然情况下假定对比区作业期前后时段的雨量比 $\frac{X_2}{X_1}$ 是与作业区作业期前后时段的对应比值 $\frac{Y_2}{Y_1}$ 相同的, 这意味着假定对比区与作业区处于降水系统的同一发展阶段, 所以对比区以选择雷达回波结构及其演变趋势与作业期大体相似的侧风向为宜。则有双比值:

$$R = \frac{Y_2/Y_1}{X_2/X_1} \quad (5)$$

如果 $R > 1$, 则为正效果; $R < 1$, 则为负效果。

3.4 区域趋势相关回归分析评估方案

选取每个催化单元作业前对比区 3 h 降水量 X_1 、作业区 3 h 降水量 Y_1 和作业时段对比区 3 h 降水量 X_2 、作业区 3 h 降水量 Y_2 作为统计变量。

分别计算 X_1 与 X_2 的统计相关系数 r_{X_1, X_2} 和 X_1 与 Y_1 的统计相关系数 r_{X_1, Y_1} , 如果 r_{X_1, X_2} 和 r_{X_1, Y_1} 显著水平均高于 0.01, 则建立一元回归方程:

$$Y_1 = a + bX_1$$

假定作业时段作业区的自然降水量 Y_2 和作业

时段对比区的降水量 X_2 的相关关系与作业前两区 3 h 的降水量相关关系相似, 则作业区作业时段的自然降水量估计值 \hat{Y}_2 可用下式表示:

$$\hat{Y}_2 = a + bX_2 \quad (7)$$

可得到绝对增雨量 $\Delta Y = Y - \hat{Y}$ 或相对增雨率 $R = \Delta Y / \hat{Y}_2$ 。

3.5 区域趋势多元回归分析评估方案

取影响区 3 h 降水量 Y 为因变量, 对比区 3 h 降水量 X_1 、整层大气可降水量 W_1 和影响区的整层大气可降水量 W_2 为自变量, 进行逐步回归剔除不显著的自变量。采用 F 检验的概率作为变量引入模型或从模型剔除的判据, 当变量的显著度 $\alpha \leq 0.05$ 时, 该变量被引入回归方程; 当变量的显著度 $\alpha > 0.05$ 时, 该变量从回归方程剔除, 即可得到影响区 3 h 估计值 \hat{Y}_2 的多元回归预报方程:

$$\hat{Y} = a + b_1 X_1 - b_2 W_1 \quad (8)$$

并得到绝对增雨量 $\Delta Y = Y - \hat{Y}$ 或相对增雨率 $R = \Delta Y / \hat{Y}$ 。

3.6 浮动对比区历史回归(FCM)分析评估方案

3.6.1 影响区和对比站点选择

3.6.1.1 影响区

根据每一次飞机作业播撒路线和播撒物质的传输特点, 对作业影响区站点和对比区站点进行划分。其中, 将播撒路线上的 700 hPa 高空风(风向和风速由探空资料获得)3 h 传输距离以内的范围作为影响区。

3.6.1.2 对比站点

根据作业期的 700 hPa 高空盛行风向, 选择在影响区上风向或垂直风向的侧面未受作业影响, 地形和面积与影响区大体相仿, 降水云系与影响区相似的区域为对比区。位于对比区内的站点即为对比站点。

3.6.2 建立影响区自然降水体积 \hat{V}_2 与对比站点的历史降水量的多元逐步回归方程

取每个非催化单元影响区总的 3 h 降水体积 V 为因变量, 对比站点的 3 h 降水量 R_i 为自变量。然后, 进行逐步回归剔除不显著的站点降水量 R_i 。采用 F 检验的概率作为变量引入模型或从模型剔除的判据, 当变量的显著度 $\alpha \leq 0.05$ 时, 该变量被引入回归方程; 当变量的显著度 $\alpha > 0.05$ 时, 该变量从回归方程剔除, 最后得到自然降水体积 \hat{V} 的多元预报回归方程:

$$\hat{V} = \sum_{i=1}^{n_1} a_i R_i + c \quad (9)$$

式(9)中, R_i 为对比站点的降水量; n_1 为对比站点的个数; a_i 和 c 为回归系数。

绝对增雨量 $\Delta V = V - \hat{V}$ 或相对增雨率 $R = \Delta V / \hat{V}$ 。

4 作业结果比较分析

4.1 影响区与对比区雨强比较

催化作业后影响区雨强是否有变化是衡量作业是否有效的一个重要的物理量。图2给出了催化作

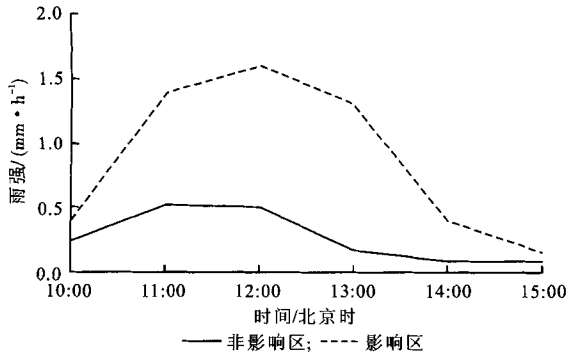
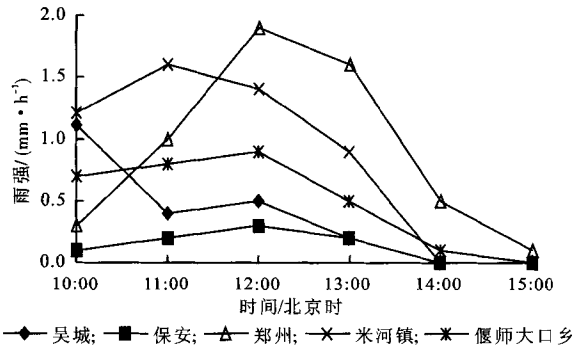


图2 2002年4月5日10:00—15:00影响区和非影响区平均雨强变化曲线

业后,非影响区共6个站点平均雨强和影响区共3个站点平均雨强变化曲线。影响区和非影响区的平均雨强在10:00均较低,而在11:00—13:00影响区平均雨强远远大于非影响区平均雨强,并出现了峰值,非影响区雨强变化平稳,14:00以后影响区和非影响区的平均雨强均开始降低并且相差不大。影响区平均雨强的峰值与催化时间是相对应的,刚好滞后于

催化时间1—2 h。

将位于影响区的站点郑州、米河镇、偃师大口乡和位于非影响区的站点吴城、保安10:00—15:00雨强变化绘成图3。由图3可见,位于影响区的3个站



点雨强变化较大,在10:00(即没进行催化时)3站雨强均较小,1—2 h之后,3站相继出现了雨强的峰值,峰值过后雨强迅速降低。如郑州,10:00雨强仅为0.2 mm/h,但12:00出现了雨强峰值1.9 mm/h,峰值后迅速减小,这是因为郑州位于作业区下风向,当上风向10:35进行催化作业时,下风向要经过大约1.0—1.5 h才会有催化效果,所以12:00郑州才达到最大雨强,峰值过后,雨强迅速减小。而米河镇和偃师大口乡由于距离作业区较近,所以较早出现催化效果,达到雨强峰值,然后雨强迅速减小。位于非影响区的站点吴城、保安雨强变化平缓,不受催化的影响。以上对影响区和非影响区雨强变化曲线的分析表明,催化作业明显改变了影响区雨强,作业有效。

4.2 6种评估方案结果

表2 6种方案评估结果

评估方法	绝对增雨量	相对增雨率/(%)	相关系数	统计量 t	t -检验显著度水平 α
区域趋势对比双比分析方案	-	75	-	-	-
区域趋势相关回归分析方案	1.3 mm/3 h	19	0.729	1.269	$\alpha > 0.10$
区域趋势多元回归分析方案	1.4 mm/3 h	23	0.774	1.402	$0.10 > \alpha > 0.05$
FCM方法	$0.213 \times 10^9 \text{ m}^3$	19	0.827	1.695	$0.10 > \alpha > 0.05$
以降水量为协变量的CA-FCM方法	$0.137 \times 10^9 \text{ m}^3$	21	0.832	1.705	$\alpha < 0.05$
以降水量和整层大气可降水量为协变量的CA-FCM方法	$0.197 \times 10^9 \text{ m}^3$	26	0.867	1.792	$\alpha < 0.05$

表2列出了6种评估方案的评估结果。应用上述6种评估方案分别对2002年4月5日河南省人工催化增雨作业个例进行效果评估。其评估效果表明:

(1)区域趋势对比双比分析方案得到0.75的相对增雨量,可信度不高,评估效果最差。这是由于此方案既不依靠历史资料,又仅是对单个例分析试

验,所以难以检验评估值的统计可信度。

(2)区域趋势相关回归分析方案由于利用了历史资料,比区域趋势对比双比分析评估方案效果略好,但是此方案由于区域相关性较差以及没有引入物理协变量,导致相关系数仅为0.729,统计量 t 为1.269, t -检验显著度水平 $\alpha > 0.10$,评估效果较差。

(3)区域趋势多元回归分析方案比区域趋势对比双比分析方案和区域趋势相关回归分析方案效果好。原因是此方案引入了物理协变量作为控制因子,提高了相关系数,使统计量 t 达到 1.402, t -检验显著性水平 $\alpha < 0.1$ 。但此方案由于对比区为事先确定好的,对比区和作业区相关性不高,从而在一定程度上影响了最后的增雨评估效果, t -检验显著水平 α 仍大于 0.05。

(4)FCM 方法由于选取了浮动对比区代替固定对比区,使对比区的选择更为灵活,在一定程度上提高了对比区和作业区的相关性,使得相关系数为 0.827,统计量 t 为 1.695, t -检验显著性水平 $\alpha < 0.10$ 。本方案虽然选取了浮动对比区提高了相关性,但还是没有进行聚类分析对相关性提高的程度大,并且也没有引入物理协变量作为控制因子, t -检验显著水平 α 仍大于 0.05。

(5)以降水量为协变量的 CA-FCM 方法采用聚类分析改进了浮动对比区的分区方案,提高了对比区和影响区相关性,采用网格插值技术提高了雨量的计算准确度,使得相关系数达到 0.832,统计量 t 达到 1.705, t -检验显著水平 $\alpha < 0.05$ 。但是,此方案由于没有引入物理协变量作为控制因子,使得相关系数和统计量 t 均小于协变量由降水量和整层大气降水量两个组成的 CA-FCM 方法。

(6)协变量由降水量和整层大气降水量 2 个组成的 CA-FCM 方法比以降水量为协变量的 CA-FCM 方法增加了一个物理协变量作为控制因子,使得相关系数为 0.867,统计量 t 为 1.779, t -检验显著水平 $\alpha < 0.05$,评估效果最好。

(7)6 种评估方案按照评估效果由好到差排列,依次为以降水量和整层大气可降水量为协变量的 CA-FCM 方法、以降水量为协变量的 CA-FCM 方法、FCM 方法、区域趋势多元回归分析方案、区域趋势相关回归分析方案、区域趋势双比分析评估方案。这一排列顺序与相关系数和统计量 t 的排列顺序相一致,可见在增雨效果和样本数一定的情况,随着相关系数的提高,统计量 t 的增大,评估效果提高。

5 结论与讨论

(1)采用聚类分析可以提高对比区和影响区的相关系数,提高 t -检验显著度水平,从而提高增雨评估效果。FCM 方法 t -检验显著度水平 $0.10 > \alpha > 0.05$,而采用了聚类的 CA-FCM 方法 t -检验显著度水平 $\alpha < 0.05$,显著度水平提高。

(2)引入有效的物理协变量可以提高自然降水估计值的精度,提高 t -检验显著度水平,从而提高增雨评估效果。引入有效的物理协变量的 CA-FCM 方法统计量 t 值比没有引入协变量的 CA-FCM 方法统计量 t 值大,显著水平高。

(3)影响增雨评估效果的因子有增雨效果、样本数、相关系数。在增雨效果和样本数一定的情况下,相关系数是影响增雨效果显著度的重要因素。这表明以后的评估方案按照这样的思路,选择更为合理的影响区和对比区,不断改进或引入新的更有效的协变量,提高相关系数,就可以极大地提高催化作业的效果评估效率。

参考文献

- [1] 严采繁,陈万奎. 统计评估人工增雨效果的一些问题研究[J]. 应用气象学报,2001,12(增刊):81-87.
- [2] 叶家东,李铁林. 区域趋势控制回归变量回归分析效果评估方法研究[J]. 气象科学,2001,21(1):64-72.
- [3] 夏彭年. 内蒙古地区层状云催化的条件和效果—介绍“移动目标区”人工增雨效果评估方法[M]. 北京:气象出版社,1998:33-40.
- [4] Shipilov O I, Koloskov B P, Abbas A. Statistical evaluation of cloud seeding operation in Syria (1991—1993) [C]. 6th WMO Scientific Conference on Weather Modification. Paestrum, Italy, 1994:341-344.
- [5] Abbas A, Mustafa A. Syrian rain enhancement project (1991—1998) [C]. 7th WMO Scientific Conference on Weather Modification. Chiang Mai, Thailand, 1999:118-120.
- [6] Koloskov B P, Melnichuk Y V, Abbas A. Statistical estimation of cloud seeding operations in Syria(1991—1996) [C]. 7th WMO Scientific Conference on Weather Modification. Chiang Mai, Thailand, 1999:161-164.
- [7] 段英,赵亚民,赵利品,飞机人工增雨非固定目标作业效果评估方法[M]. 北京:气象出版社,1998:76-79.
- [8] 王永亮,田广元,房彬,等. 多普勒雷达资料检验增雨催化效果的个例分析[J]. 辽宁气象,2004(4):31-32.
- [9] 苟阿宁,顾松山,骆兴江,等. 一次海面降雪的双线偏振多普勒雷达回波特征分析[J]. 辽宁气象,2007(6):6-10.
- [10] 房彬,肖辉. 聚类分析在人工增雨效果检验中的应用[J]. 南京气象学院学报,2005,28(6):739-745.
- [11] 杨景梅,邱金桓. 我国可降水量同地面水汽压关系的经验表达式[J]. 大气科学,1996,20(5):620-626.
- [12] 杨景梅,邱金桓. 地面湿度参数计算我国整层大气可降水量及有效水汽含量方法的研究[J]. 大气科学,2002,26(1):19-22.

Comparison between CA – FCM and other precipitation enhancement effect evaluation methods on cloud seeding operation

FANG Bin¹ XIAO Hui² BAN Xian-xiu¹ GONG Wei-wei³

(1. Liaoning Weather Modification Office, Shenyang 110016, China; 2. Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 3. Shenyang Meteorological Bureau, Shenyang 110168, China)

Abstract: Based on cloud seeding data on April 5, 2002 in Henan province, cloud seeding effects were evaluated by six methods, i. e. double contrast method of regional rainfall tendency control, regression analysis method of regional tendency correlation, multiple regression analysis method of regional tendency covariant, floating control historical regression method (FCM), cluster-analysis-based floating control historical regression method (CA – FCM) using rainfall as a covariant and CA – FCM using rainfall and atmospheric perceivable water as covariants. The results indicate that the effect of CA – FCM using rainfall and atmospheric perceivable water as covariants is better, for the physical covariant that is not influenced by catalyze is used as controlling factor and cluster analysis method is employed. The significant is more than 0.05. The effects of other methods are worse.

Key words: CA – FCM; Effect evaluation method; Cluster analysis; Statistical test; Atmospheric perceivable water; Cloud seeding effect