祝晓芸，姚展予，2017. 江西省对流云火箭增雨作业个例分析[J]. 气象，43(2)：221-231.

江西省对流云火箭增雨作业个例分析*

祝晓芸　姚展予

中国气象局云雾物理重点实验室，中国气象科学研究院，北京 100081

提　要： 利用基于日雨量和小时雨量资料的区域历史回归分析方法和基于雷达探测的作业云体单元和对比云体单元的时间序列对比分析方法对江西省两次对流云火箭增雨作业个例进行综合分析，结果表明：两次增雨作业的区域历史回归分析结果均为正效果，且均通过显著性水平检验，但使用日雨量资料和小时雨量资料分析得到的增雨效果差异较大，原因可能是两种雨量资料的时空分布差异较大，火箭作业期间两种雨量资料包含的时间长度不一致；利用雷达探测资料，基于相似理论找出与作业云体单元最相似的对比云体单元，对比分析作业云体单元和对比云体单元在作业前后雷达探测的 5 个物理量的时间序列变化发现，两次增雨作业中，作业云体单元的 5 个雷达探测物理量相对于对比云体单元出现了明显的正偏离现象，其中作业云体单元回波体积增加趋势最为突出，增雨效果的物理证据明显。两次对流云火箭增雨作业的雨量区域历史回归分析的正效果与雷达探测的作业云体单元和对比云体单元作业前后时间序列变化的正偏离现象互为印证，较好地展示了对流云火箭作业的增雨效果。

关键词： 火箭增雨，效果检验，区域历史回归，雷达探测，时间序列变化

中图分类号： P448　　　**文献标志码：** A　　　**DOI：** 10.7519/j.issn.1000-0526.2017.02.010

Analysis of Convective Cloud Seeding Cases by Rockets in Jiangxi Province

ZHU Xiaoyun　YAO Zhanyu

Key Laboratory for Cloud Physics of CMA, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

Abstract: The effect of two rocket precipitation enhancement cases for convective cloud in Jiangxi Province is evaluated using the methods of historical regression analysis and time-series comparison and analysis for cloud units, which are based on regional rainfall data and radar data, respectively. The results show that the consequences about the effect of the two cases are positive deviations, and both precipitation effects have passed the significance test. The reason for the precipitation enhancement effect difference between the daily precipitation data and hourly rainfall data may be that the gap of the two kinds of data is larger in spatial and temporal distribution, and the selected operation periods of the two kinds of rainfall data are not in the same length. Through comparing physical parameters between the seeded cloud units and the unseeded cloud units, which are similar to those seeded detected by radar before and after the operation, an obvious positive deviation is found. So, the radar detection evidence of precipitation enhancement is provided. The radar detection results are consistent with the regional historical regression results in the two cases. The variation trends of the two cases are consistent and both of the two cases have positive deviations.

Key words: artificial precipitation by rockets, effect testing, regional historical regression, radar detection, time series variation

* 国家自然科学基金面上项目(41375135)和公益性行业(气象)科研专项(GYHY201406033)共同资助
2016 年 1 月 19 日收稿；　2016 年 12 月 4 日收修定稿
第一作者：祝晓芸，从事云降水与人工影响天气研究. Email：zhuxiaoyunouc@126.com
通信作者：姚展予，从事云降水与人工影响天气研究. Email：yaozy@camscma.cn

引 言

人工增雨是调节干旱地区干旱缺水的重要途径之一。江西省具有春秋短、夏冬长、雨热同季的气候特点；自然降水分配不均匀，每年的7—8月为高温伏旱季，9—11月为秋旱季（马巨贤等，1985；李玉林等，2003a；2003b；2004；2010）。为了应对干旱这一主要自然灾害，人工增雨抗旱已被江西省人民政府列入农业抗旱减灾的重要技术措施和手段，而对增雨效果进行科学合理的评估是推动人工影响天气工作进一步发展的一个关键问题。

目前我国进行的人工增雨作业大多属于应急性抗旱作业，选择作业影响区和对比区时，事先并没有通过严格的设计，是一种事后检验的模式（周德平等，2006）。作业之后根据实际作业影响区域分析划定相应的对比区，使用的分析方法为非随机化检验方法。目前常用的非随机化人工增雨效果评估的检验方案主要有序列分析、区域对比分析、双比分析和区域历史回归分析。其中，区域历史回归分析方案作为一种经典的效果评估方案经常被采用，刘晴和姚展予（2013）曾利用区域历史回归方法对古巴2006年在东部奥尔金省实施的对流云人工增雨作业进行效果评估，得到相对增雨39.74%的结果。贾烁和姚展予（2016）利用区域历史回归分析对江淮地区夏季对流云进行增雨效果分析，得到65.18%的相对增雨率。曾光平等（1991；1994；1997）采用区域雨量回归分析方法使用3 h区域面积加权平均雨量的四次方根作为统计变量对福建古田水库地区随机试验效果进行分析，得到29.49%的相对增雨效果。

雷达探测资料能够为人工增雨作业的效果提供物理证据，越来越受到重视（陈冰等，2003）。美国得克萨斯州西部早期试验通过分析雷达探测资料获得增雨效果（Woodley and Rosenfeld，2004；Rosenfeld and Woodley，1993）。蒋年冲等（2006；2008）对夏季对流云人工增雨效果进行研究，通过对催化云前后雷达特征量和地面雨量变化分析及催化云与非催化云自身对比分析和双比分析得出了此次对单个对流云催化有明显效果，效果在100%以上。白卡娃等（2005）分析南京周边地区夏季对流云降水的雷达回波特征发现南京及周边地区夏季对流云大部分发展旺盛、负温区比较深厚，是人工作业比较理想的云。袁野等（2008）分析江淮地区对流云人工增雨作业的雷达回波特征，发现催化作业可以达到增加回波面积，延长回波持续时间和增加云中液态水含量的目的。张瑞波等（2010）利用雷达资料分析广西一次飞机增雨作业，发现对过冷云进行催化作业后，雷达基本反射率增强，且比非催化云层更快达到回波峰值且持续较长时间。

本文选取江西省两次对流云火箭增雨作业个例，收集整理作业地区历史上的降水资料和作业期的雷达探测资料，分别采用基于日雨量和小时雨量资料的区域历史回归分析方法和基于雷达探测的作业云体单元和对比云体单元的时间序列对比分析方法，对两个个例进行分析研究，给出了个例的区域历史回归分析结果，并给出了雷达探测的时间序列变化证据。

1 资料和技术方法

本文区域历史回归分析方法所用资料为江西省2400多个区域级自动站2007—2014年的小时雨量数据和90个国家级自动站1951—2014年的日雨量数据。本文时间序列对比分析方法选用南昌SA雷达提供的基数据，该雷达位于28.59°N、115.90°E。

区域历史回归分析方法（叶家东和范培芬，1982）利用作业影响区和对比区历史样本建立回归方程，通过回归方程估算作业期作业影响区的自然降水量，与实测降水量对比，从而得出增雨效果，用t-检验法计算显著度。王婉和姚展予（2009）曾对四种统计方案的功效进行了归纳分析，结果表明在相同条件下，区域历史回归分析较其他方案评估结果准确度最高。

使用区域历史回归分析方法进行火箭增雨作业个例分析的具体步骤如下：

（1）通过分析作业点周围地形和作业期天气形势选择作业影响区和其对应的对比区。确定作业影响区和对比区的范围是进行个例分析的基础。作业影响区是指受到催化作业影响的区域；对比区的选择应遵循下面几个原则：①不受催化作业的影响；②地形和面积与作业影响区大体相仿；③作业期两区所受的天气系统影响相同，两地的降雨类型相似；④作业影响区与对比区历史雨量相关性较好。

（2）确定要进行统计的历史期时段，对作业影响区和对比区数据进行正态拟合度检验以满足统计

学要求。分布函数中的参数用样本资料估计之后，其理论模式是否符合实际分布，必须利用理论计算频数与相应的实际频数之差，进行分布适度性检验，称为拟合效果检验。常用的方法有两种：χ^2 检验、柯尔莫哥洛夫分布函数拟合度检验。本文选择柯氏检验的原因如下：χ^2 检验法只检验了相邻两个样本的差值等于概率这点是否为真，而并未真正的去检验总体的分布是否符合经验分布。柯氏检验并不是用分区来考虑假设的理论分布概率和相应的样本分布概率之差，而是对每一个观测值都考虑它们的偏差，即对应于所有的样本观测值的经验分布函数值和所假设的理论分布函数值之间的最大偏差值（上确界）的大小来判断分布函数是否为总体的分布。所以，后一种方法比前一种方法更优。通过对历史数据进行对数或方根等形式变换使数据通过柯氏检验。

柯氏检验在判定正态拟合标准中，当正态拟合的置信度水平 α 选取 0.05，对应的 K 值为 1.36（洪光等，1995；鹿翠华，2010）。如果选取的作业影响区域和对比区域的历史数据做变量变换后的柯氏值＞1.36 时，得出样本不服从正态分布的结论，需重新进行变量变换，若进行变量变换无法通过柯氏检验，可以考虑调整作业影响区和对比区及相关历史数据。

（3）计算相关系数，建立作业影响区和对比区的回归方程。相关系数是用以反映变量之间相关关系密切程度的统计指标，能确切地表明两个变量之间相关的程度。计算相关系数，样本容量要有一个最低限值，一般要求样本容量＞30。

计算相关系数的公式为：作业影响区与对比区雨量指标的协方差比上作业影响区、对比区雨量指标的标准差，即：

$$r=\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\overline{x})(y_i-\overline{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\overline{x})^2\sum_{i=1}^{n}(y_i-\overline{y})^2}} \tag{1}$$

式中，分子为协方差 $S_{xy}=\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i-\overline{x})(y_i-\overline{y})$，分母为标准差 $S_x=\sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i-\overline{x})^2}$ 与 $S_y=\sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(y_i-\overline{y})^2}$ 的乘积（x_i，y_i 分别是对比区、作业影响区历史期雨量指标，$\overline{x}$，$\overline{y}$ 分别是对比区、作业影响区历史期雨量指标的平均值，n 是历史样本数）。

符合条件后根据作业影响区、对比区的历史样本雨量资料，应用最小二乘法建立区域雨量历史回归方程 $y=a+bx$，其中系数 $b=S_{xy}/S_x^2=\frac{\sum_{i=1}^{n}x_iy_i-n\overline{xy}}{\sum_{i=1}^{n}x_i^2-n\overline{x}^2}$，系数 $a=\overline{y}-b\overline{x}$。

（4）利用回归方程和作业期对比区实测的雨量计算出作业期作业影响区的估计雨量值，再与作业期作业影响区实测雨量值进行比较，得出绝对增雨和相对增雨结果。

（5）用 t 检验法对增雨效果进行显著度检验。增雨效果显著性水平由查表方式给出。

t 检验法公式为：

$$t=\frac{\overline{y}_k-\overline{\hat{y}}_k}{\sqrt{\frac{1-r^2}{n-2}\sum_{i=1}^{n}(y_i-\overline{y}_n)^2\left[\frac{1}{k}+\frac{1}{n}+\frac{(\overline{x}_k-\overline{x}_n)^2}{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\overline{x}_n)^2}\right]}} \tag{2}$$

式中，k 表示要进行平均效果检验的试验次数，即作业样本数；$\overline{y}_k$ 表示 k 个作业期作业影响区雨量实测值（或相应变换值）的平均值；$\overline{\hat{y}}_k$ 表示 k 个作业期作业影响区雨量期望值（或相应变换值）的平均值；r 表示历史期作业影响区与对比区雨量指标的相关系数；n 表示历史样本数；y_i 表示历史期作业影响区雨量值（或相应变换值）；$\overline{y}_n$ 表示历史期作业影响区雨量值（或其变换值）的平均值；$\overline{x}_k$ 表示 k 个作业期对比区雨量实测值（或相应变换值）的平均值；x_i 表示历史期对比区雨量值（或相应变换值）；$\overline{x}_n$ 表示历史期对比区雨量值（或其变换值）的平均值。如果 $k=1$，则表示对单次试验进行效果检验，那么上述公式中的 $\overline{y}_k$、$\overline{\hat{y}}_k$ 和 $\overline{x}_k$ 均不用再求平均值。

本文时间序列对比分析方法的主要内容为分析雷达探测资料随时间的演变特征获得人工增雨作业的物理学证据。主要分析雷达回波各参量随时间的演变特征。分析的雷达回波参量包括：回波顶高、回波体积、最大反射率、垂直累积液态水含量、降水通量 5 个要素。进行增雨作业个例的时间序列对比分析，主要包含三方面工作，第一是对作业云体单元的多普勒雷达物理量进行分析，第二是寻找作业时间点前与作业云体单元生命发展期相同或近似的云体

单元，第三是给出作业云体单元与对比云体单元作业前后的物理量对比，从而给出物理量在作业前后的变化差异。对比云体单元的选择主要遵循以下三个标准：具有与作业云体单元相似的天气背景、相似的云体特征和相似的产生源地。

本文通过对比分析云体单元5个物理量的时间序列变化特征，找出催化作业促使作业云体单元发生云物理变化的证据。为了更客观、更科学地对比分析作业云体单元和对比云体单元的变化差异，选择云体单元的生命史时间作为时间序列（下文中时间序列分析图中横坐标）而非北京时间作为时间序列。

作业云体单元和对比云体单元的选取方法：利用雷达回波资料，选定5个雷达回波物理参量，根据作业时刻和作业点位置信息，识别并追踪作业云体单元，并选取与作业云体单元作业前回波发展相似的单元作为对比云体单元。对比云体单元一般选在作业当天且不受作业影响的区域，但单元的选取不受作业时刻的约束，即对比云体单元的生消和作业云体单元的时间不局限于同一时刻。按照作业云体单元的各回波特性，在其地理位置附近尽可能多地挑选出具有一定相似性的回波单元。在选出的这些云体单元中，综合对比其回波特征后，将其中一个与作业云体单元作业前发展最相近的回波单元作为对比云体单元。

2 作业情况

2.1 2014年6月16日作业

2014年6月16日个例共进行1次地面火箭作业，作业位置为位于27.56°N、116.57°E的江西省抚州市南城县麻源水库，作业目的是为水库蓄水。此次火箭作业的作业时间为2014年6月16日19:38—19:43，共发射4枚火箭弹。火箭架类型为BL型，每枚火箭弹所含碘化银10.5 g。

2.2 2013年7月14日作业

2013年7月14日个例共进行1次地面火箭作业，作业位置为位于28.61°N、114.46°E的江西省宜春市铜鼓县三都镇东山村，此次火箭作业的作业时间为2013年7月14日11:45—11:50，共发射6枚火箭弹。火箭架类型为BL型，每枚火箭弹所含碘化银10.5 g。

3 天气背景分析

3.1 2014年6月16日天气分析

16日作业当天08时，高空500 hPa从华北经河南到四川盆地有一低槽，江西省处在槽前西南气流中，850 hPa低槽切变位于安徽省西部到长江中游一线（图略）并且低槽切变有东移南压的趋势。该次作业是在低层切变的天气形势下进行的。从16日14时的温度对数压力图中可以看出，此时的CAPE数值达到1500以上，数值相当大，对流不稳定。从500 hPa至地面，08—20时多个时段不同高度的温度露点差场可以看出，16日整日水汽湿度条件十分充足，$T-T_d$ 维持在0～4℃的范围内，并且垂直方向上水汽层结深厚。此次作业的水汽条件十分充足。

3.2 2013年7月14日天气分析

2013第7号热带气旋苏力从福建省沿海登陆后，14日05时从抚州南城县进入江西省境内，强度降低为热带低压。“苏力”进入江西后，处副热带高压（简称副高）的东侧，受588线气流引导缓慢向北偏西方向移动，自东南向西北穿过江西，影响江西天气。从500 hPa高空图（图略）上分析，14日08时中纬度有低槽生成，槽底和热带低压环流结合，斜压性增强，有利于斜压不稳定发展，是有利于人影作业的天气形势。副高东伸，引导热带低压北上，副高和热带低压间的等高线挤压变密集，锋区加强，使得江西境内西南急流加强，江西处热带低压倒槽南侧。从地面天气形势场分析发现，热带低压环流完整，对应在江西有辐合线存在，有进行人工增雨的有利的动力条件。热带低压环流带来充足的水汽供应。从08和14时的700、850 hPa温度露点差场可以看出，14日水汽湿度条件十分充足，$T-T_d$ 维持在0～4℃的范围内，并且垂直方向上水汽层结深厚。此次作业的水汽条件十分充足。从14日08时探空图分析，从地面到400 hPa有温度露点差＜2℃的深厚湿区，从地面至400hPa垂直高度上相对湿度＞85％，水汽条件充足；假相当位温 θ_{se} 是表征大气热力条件及对流云发生发展重要参数之一。$\theta_{se850}-\theta_{se500}$ 均为正值，江西上空大气处于弱对流不稳定状态，有进行人工增雨作业的潜力。

4　区域历史回归分析

本文分别使用江西省区域自动站小时雨量数据和国家自动站日雨量数据,进行火箭增雨作业个例的区域历史回归分析。

关于催化有效时段的研究,目前学术界通常将作业后 3 h 作为催化有效时段。本文根据当天作业后的天气条件分析,从卫星云图和雷达回波图可以看出,两个个例在作业后的 3 h 里,目标云团均存在并发展,所以本文将火箭作业催化后的影响时间统一定为 3 h。

4.1　2014 年 6 月 16 日个例分析

此次个例是 2014 年 6 月 16 日在江西省抚州市南城县麻源水库为增加水库蓄水而进行的火箭增雨作业。通过分析作业当天的高空风向风速和雷达回波的移向移速,高空风向为偏西风,风速约为 20 km・h^{-1},雷达回波的移动方向为西偏南方向,如果认为催化作业影响的时间为 3 h 的话,那么将作业点下风方 60 km 以内的区域定为作业影响区(图 1),使用小时雨量和日雨量资料计算增雨作业效果时,取相同的作业影响区。

使用小时雨量数据进行计算时,在作业点下风方 60 km 以内的影响区域内包含的区域自动站共计 43 个。根据对比区选择的原则,将对比区定为作业点西面偏北的一块与作业影响区面积相当的区域,所包含的区域自动站共计 67 个。作业影响区和对比区的具体站点见图 1a。采用区域历史回归方法对其分析,为满足正态分布要求,对雨量数据做 6 次方根变量变换,得出作业影响区和对比区柯氏值分别为 1.01 和 1.36,通过柯氏检验。计算可得,两个区域相关系数为 0.5075,雨量回归方程为 $y=0.4159+0.5622x$,其中,x 为对比区雨量值,y 为作业影响区雨量值。得到的绝对增雨量为 3.14 mm,相对增雨率为 163.58%。增雨效果的显著性检验 $\alpha=0.029$,统计检验结果显著。

使用日雨量数据进行计算时,在作业点下风方 60 km 以内的影响区域内包含的国家自动站有资溪、南城、黎川 3 个站。选择的对比区是其西面偏北的一块面积相当的区域,包括抚州、临川、崇仁、宜黄 4 个国家自动站(图 1b)。采用区域历史回归方法对其分析,为满足正态分布要求,对雨量数据做 4 次方根变量变换,得出作业影响区和对比区柯氏值分别为 0.87 和 0.96,通过柯氏检验。计算可得,两个区域相关系数为 0.78,雨量回归方程为 $y=0.4316+0.8223x$,其中,x 为对比区雨量值,y 为作业影响区雨量值。得到的绝对增雨量为 67.4 mm,相对增雨率为 159.1%。增雨效果的显著性检验 $\alpha=0.018$,统计检验结果显著。

国家站的日雨量资料和区域自动站的小时雨量资料的时空分辨率差异较大,小时雨量资料的时空分布更稠密。计算过程中发现,使用日雨量数据计算的结果相对小时雨量来说更稳定,通过正态变换处理后的日雨量数据时间序列比小时雨量的时间序列更容易满足正态分布。

这次作业利用日雨量数据计算得到的绝对增雨量要大于小时雨量数据计算的绝对增雨量,通过分析可能是如下原因:小时雨量选取的是作业后作业当天的降雨量数据,共3 h,而日雨量数据资料的时

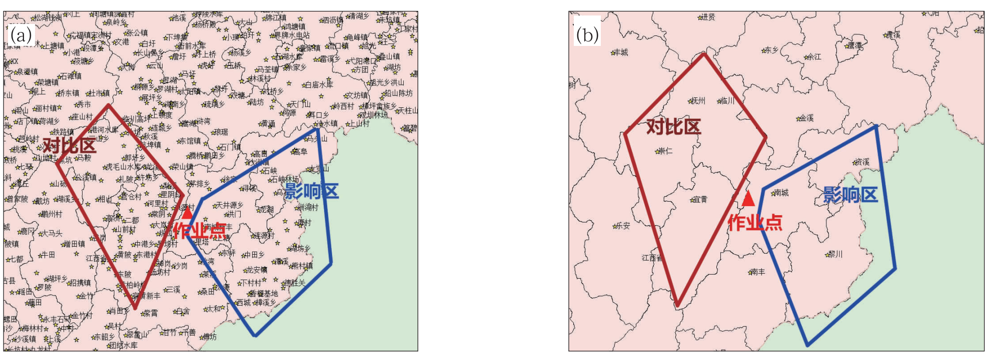

图 1　2014 年 6 月 16 日个例作业影响区、对比区的区域范围
(a)使用小时雨量数据时的区域,(b)使用日雨量时的区域

Fig. 1　The coverage of operation affected area and control area of the case on 16 June 2014
(a) areas using hourly rainfall data, (b) areas using daily rainfall data

表 1 2014 年 6 月 16 日个例区域历史回归分析结果

Table 1 Analysis results of regional historical regression of the case on 16 June 2014

统计变量	相关系数	柯氏检验的柯氏值		增雨效果		显著度
		作业影响区	对比区	绝对增雨/mm	相对增雨/%	
小时雨量	0.5075	1.01	1.36	3.14	163.58	0.029
日雨量	0.78	0.87	0.96	67.4	159.1	0.018

间节点为每日的 20 时，此次个例的作业时间是 19:38—19:43，为了包含作业影响时间段的全部降雨量，所以选择作业影响时间段时选择了 6 月 16 和 17 日的日雨量数据，这在一定程度上造成了使用日雨量数据计算得到的绝对增雨量比使用小时雨量得到的绝对增雨量的值偏大。

4.2 2013 年 7 月 14 日个例分析

此次个例是 2013 年 7 月 14 日在江西铜鼓三都镇进行的火箭增雨作业。受副高引导气流北上影响，作业影响时期作业点高空 500 hPa 风向为西北转北风，通过分析雷达回波可以得出，回波移速约为 20 km·h^{-1}。上文中认为催化作业的影响时间为 3 h，所以，将作业点下风方 60 km 以内的区域定为作业影响区，使用小时雨量和日雨量资料计算增雨效果时，取相同的作业影响区。

使用小时雨量数据进行计算时，在作业点下风方 60 km 以内的影响区域内包含的区域自动站共计 31 个。根据对比区选取的原则，将对比区定为作业点东面的一块与作业影响区面积相当的区域，所包含的区域自动站共计 18 个。作业影响区和对比区的具体站点见图 2a。采用区域历史回归方法对其分析，为满足正态分布要求，对雨量数据做 4 次方根变量变换，得出作业影响区和对比区柯氏值分别为 0.82 和 0.81，通过柯氏检验。计算可得，两个区域相关系数为 0.72，雨量回归方程为 $y=0.1936+0.4952x$，其中，x 为对比区雨量值，y 为作业影响区雨量值。得到的绝对增雨量为 2.25 mm，相对增雨率为 256.8%。增雨效果的显著性检验 $\alpha=0.039$，统计检验结果显著。

使用日雨量数据进行计算时，在作业点下风方 60 km 以内的影响区域内包含的国家自动站有铜鼓、万载 2 个站。选择的对比区是其东面的一块面积相当的区域，包括宜丰、上高、高安 3 个国家自动站（图 2b）。采用区域历史回归方法对其分析，为满足正态分布要求，对雨量数据做 4 次方根变量变换，得出作业影响区和对比区柯氏值分别为 1.30 和 1.13，通过柯氏检验。计算可得，两个区域相关系数为 0.64，雨量回归方程为 $y=0.55+0.6602x$，其中，x 为对比区雨量值，y 为作业影响区雨量值。得到的绝对增雨量为 10.64 mm，相对增雨率为 38.74%。增雨效果的显著性检验 $\alpha=0.044$，统计检验结果显著。

此次个例的分析结果发现，使用小时雨量数据计算得到的相对增雨率要大于使用日雨量数据计算的相对增雨率，前者为 256.8%，后者为38.74%，但从绝对增雨量来说，使用日雨量数据计算得到的绝对增雨量值要大于小时雨量计算得到的绝对增雨量值，前者为 10.64 mm，后者为 2.25 mm。出现这种结果的原因可能是：小时雨量选取的是作业后作业当天的降雨量数据，共 3 h，而日雨量数据是截止到当天 20:00 的 24 h 的数据，虽然从绝对增雨量值来看，是用日雨量计算得到的结果比较大，但是相对增雨率还是小时雨量计算得到的结果大。

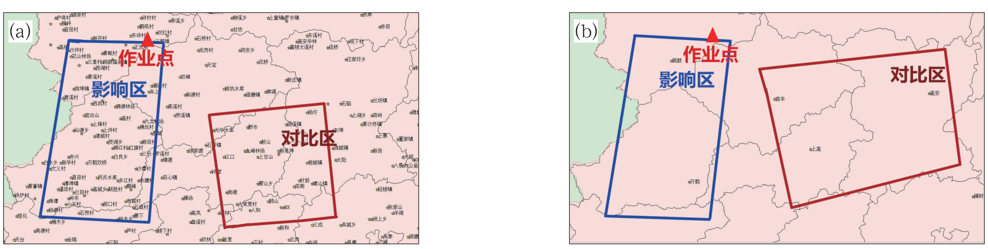

图 2 同图 1，但为 2013 年 7 月 14 日

Fig. 2 Same as Fig. 1, but on 14 July 2013

表 2　2013 年 7 月 14 日个例区域历史回归分析结果

Table 2　Analysis results of regional historical regression of the case on 14 July 2013

统计变量	相关系数	柯氏检验的柯氏值		增雨效果		显著度
		作业影响区	对比区	绝对增雨/mm	相对增雨/%	
小时雨量	0.72	0.82	0.81	2.25	256.8	0.039
日雨量	0.64	1.30	1.13	10.64	38.74	0.044

前文中已经给出了相对增雨率的计算公式，即相对增雨率等于实测雨量减去利用历史雨量求出的自然雨量估计值之后再除以自然雨量估计值。作业当天，天气形势十分有利于降水过程，实际降雨量达到暴雨量级，对于小时雨量数据来说，用历史资料估算的雨量值偏小，导致分母值偏小，从而使得相对增雨率值比较大。

5　时间序列对比分析

5.1　2014 年 6 月 16 日个例分析

利用业务化多普勒雷达的基数据资料对 2014 年 6 月 16 日 19:38—19:43 在抚州麻源水库作业的个例进行时间序列对比分析，选择的雷达基数据数据时间为 2014 年 6 月 16 日 17:42—20:42。

此次作业经过对目标单元发展过程的分析，最终选取的作业之前与之发展最相似的对比云体单元在发展过程中位置处于弋阳、铅山、德丰之间(图 3)。

从作业云体单元和对比云体单元的最大反射率作业前后随时间演变特征(图 4)可以看出，火箭增雨作业之前，对比云体单元的最大反射率略高于作业云体单元，作业后，作业云体单元的最大反射率有所提高，维持了较长时间相对稳定的状态，而对比云体单元的最大反射率呈下降趋势。

从作业云体单元和对比云体单元的降水通量作业前后随时间演变特征(图 5)可以看出，作业云体单元的降水通量随时间有所增加，但增加的程度有限，而对比云体单元作业前降水通量值比较大，但持续时间很短。从图中可以看出，对比云体单元生命初期阶段对流发展相对来说比较旺盛，而目标单元生命初期阶段对流发展比较缓慢，但是在火箭催化作业的影响下，生命期维持了较长的时间。

从作业云体单元和对比云体单元的回波顶高作业前后随时间演变特征(图 6)可以看出，作业云体单元在作业前已经略有下降趋势，但自作业 5 min 后，作业云体单元的回波顶高便有所增加，维持了较长时间。而对比云体单元的回波顶高则迅速下降，维持了不足1 h的时间。对流云的顶高反映了对流

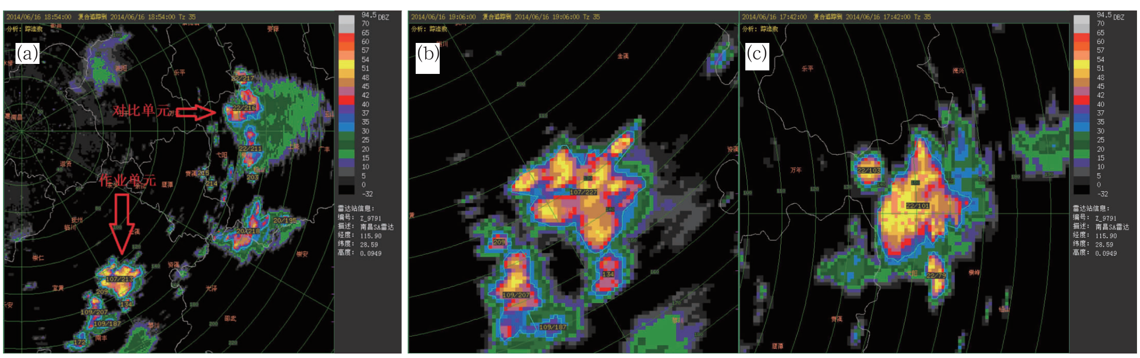

图 3　2014 年 6 月 16 日个例作业云体单元和对比云体单元的雷达回波
(a)作业前同一时刻处于不同生命史阶段的作业云体单元和对比云体单元的相对位置;(b,c)作业前处于同一生命史阶段的作业云体单元和对比云体单元的雷达回波对比

Fig. 3　Radar echo of seeded cloud unit and control unit on 16 June 2014
(a) relative position between seeded cloud unit and control unit in different periods of cloud life at the same moment, (b, c) contrast of the radar echo between the seeded unit and control unit in the same period of cloud life before operation

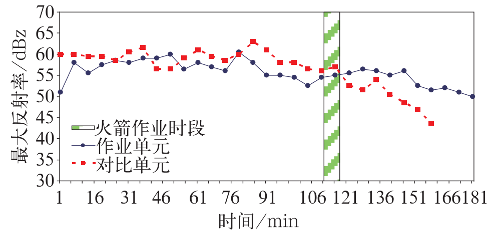

图 4 2014 年 6 月 16 日个例作业云体单元、对比云体单元最大反射率随时间变化
（横坐标为云体单元的生命史时间）

Fig. 4 The maximum reflectivity of the seeded cloud unit and control unit versus time on 16 June 2014
(Abscissa is the unit's life cycle)

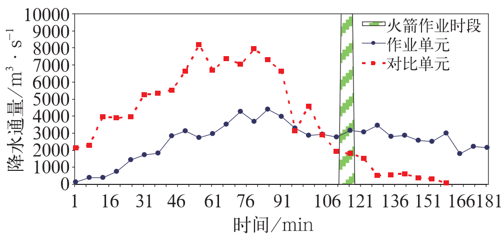

图 5 同图 4，但为降水通量

Fig. 5 Same as Fig. 4, but for precipitation flux

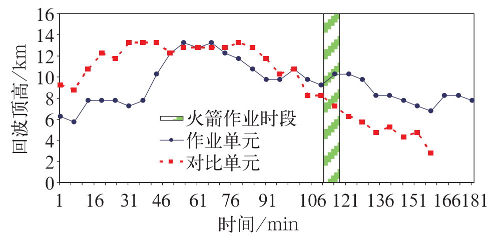

图 6 同图 4，但为回波顶高

Fig. 6 Same as Fig. 4, but for height of echo height

云体的发展情况，从上述变化可以看出，火箭增雨作业后，作业云体单元维持稳定的发展状态并有继续发展的趋势，而对比云体单元的发展趋势减弱，开始消散。

从作业云体单元和对比云体单元的回波体积作业前后随时间演变特征（图 7）可以明显看出，作业云体单元在作业后是继续发展的状态，而对比云体单元则衰减消亡。可见，此次火箭增雨使作业云体单元的生命史得以延长。

垂直累积液态水含量资料是判别强降水及降水能力、强对流天气和冰雹等灾害性天气的最有效的工具之一，有助于确定大多数显著风暴的位置。它往往与大面积降水中心区域对应得很好。从作业云体单元和对比云体单元的垂直累积液态水含量作业前后随时间演变特征（图 8）来看，垂直累积液态水含量峰值时间点都在作业时间之前，说明此次作业选取的作业云体单元并不是初生、发展时期的云体单元，而是已经发展了一定时间的云体单元。但在作业后数分钟时间内，作业云体单元的垂直累积液态水含量便再次出现了一个峰值，而这之前 1 h，它都是呈下降趋势的，可以明显得出此次作业对作业云体单元的云中物理过程是产生了有利影响的。

综合作业云体单元和对比云体单元 5 个雷达回波参量在作业前后的变化特征可以得出，这次增雨作业前后，与对比云体单元相比，作业云体单元在作业后出现了明显的正偏离，即作业后作业云体单元 5 个回波变量值与对比云体单元回波变量值之差均为正，说明此次作业产生了一定的增雨效果。可以看出，播云作业后云的微物理场发生变化，在催化作业 1 h 内引起了作业影响区雷达回波增强的趋势。此次作业使作业云体单元生命期得到了明显的延长，作业云体单元相对于对比云体单元出现了明显的正偏离现象，可以得出此次作业在云中得到了明显的微物理响应这一结论。

从降水通量（图 5）和回波体积（图 7）随时间的变化趋势可以看出，作业云体单元和对比云体单元在各自生命史的 80 min 附近均出现一个峰值，在这次峰值之后，对比云体单元的衰减趋势比较明显。所以，此次作业若提前 40 min 进行，可能会得到更好的增雨结果，作业的增雨结论科学性也会增强。

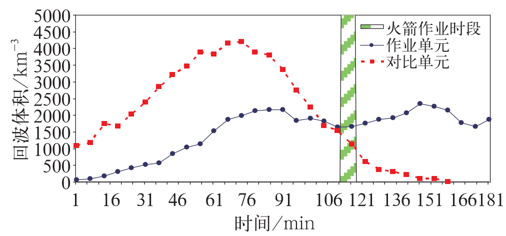

图 7 同图 4，但为回波体积

Fig. 7 Same as Fig. 4, but for echo volume

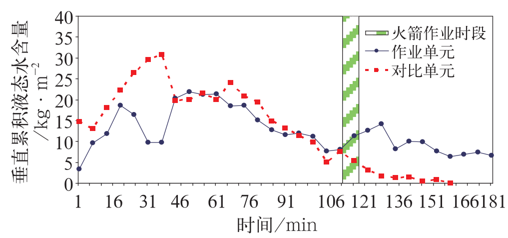

图 8 同图 4，但为垂直累积液态水含量

Fig. 8 Same as Fig. 4, but for vertical accumulative liquid water content

5.2　2013 年 7 月 14 日个例分析

利用业务化多普勒天气雷达的基数据资料对 2013 年 7 月 14 日 11:45—11:50 在江西宜春市铜鼓县三都镇东山村作业的个例进行时间序列对比分析,选择的雷达基数据数据时间为 2013 年 7 月 14 日 11:05—12:52。

此次作业的作业云体单元分析的起始时间为 2013 年 7 月 14 日 11:05,共分析了近 2 h 的回波发展演变特征。通过对目标云体单元发展过程的分析,最终选取的作业之前与之发展最为相似的对比云体单元在发展过程中的位置处于宜春、萍乡与上栗之间(图 9),分析的对比云体单元的时间段与作业云体单元一致。此次作业个例的作业云体单元和对比云体单元的生命史不同阶段发展时间是一致的,所以选择北京时间作为时间序列(横坐标)(图 10～图 14)。

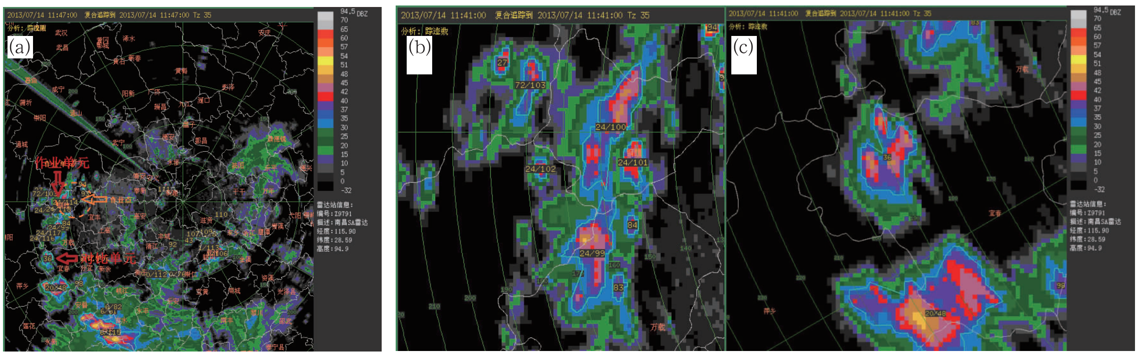

图 9　同图 3,但为 2013 年 7 月 14 日

Fig. 9　Same as Fig. 3, but on 14 July 2013

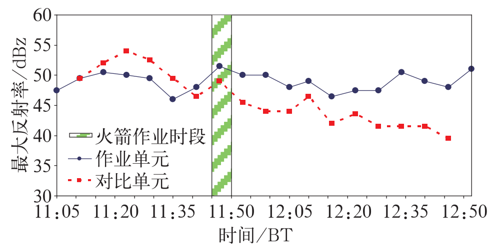

图 10　2013 年 7 月 14 日个例作业云体单元、对比云体单元最大反射率随时间变化(横坐标为云体单元的生命史时间)

Fig. 10　The maximum reflectivity of the seeded unit and control unit versus time on 14 July 2013 (Abscissa is the unit's life cycle)

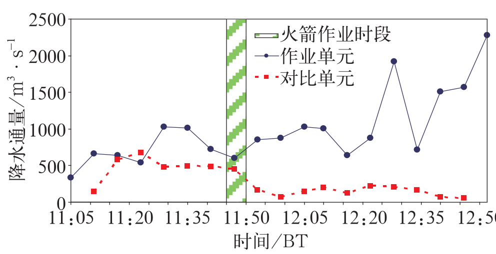

图 11　同图 10,但为降水通量

Fig. 11　Same as Fig. 10, but for precipitation flux

从作业云体单元和对比云体单元的最大反射率作业前后随时间演变特征(图 10)可以看出,火箭增雨作业之前,作业云体单元和对比云体单元的最大反射率数值相近,对比云体单元的最大反射率略大于作业云体单元的最大反射率,两者发展趋势类似。而在作业之后,作业云体单元最大反射率基本维持平稳发展,略有下降的趋势,而对比云体单元最大反射率的下降幅度十分明显,在作业 20 min 之后,作业云体单元仍维持发展而对比云体单元则衰减。相对于对比云体单元来说,作业云体单元是有增雨效果的。

从作业云体单元和对比云体单元的降水通量作业前后随时间演变特征(图 11)可以看出,作业之前,作业云体单元和对比云体单元的降水通量数值都比较小,在作业之后,作业云体单元的降水通量开始增加,尤其是在作业 30 min 之后,作业云体单元的降水通量有了更显著的增加。而对比云体单元的降水通量在作业之后便开始下降,说明此次催化作业对于作业云体单元降水通量的增加起到了一定的作用。

从作业云体单元和对比云体单元的回波顶高作业前后随时间演变特征(图 12)可以看出,作业云体单元的回波顶高在作业在作业之后略有增高,作业后 15 min 左右有一个小幅度的抬升,作业后 1 h 内一直维持着缓慢的上升趋势,而对比云体单元的回

波顶高在作业之后缓慢下降。

从作业云体单元和对比云体单元的回波体积作业前后随时间演变特征(图 13)可以看出,作业前后作业云体单元的回波体积变化较大,自作业后几分钟的时间内作业云体单元的回波体积便有所增加,在作业 30 min 之后,作业云体单元的回波体积有一个比较迅速的增加过程,而对比云体单元的回波体积在作业后相比作业前有明显的减小趋势。说明此次催化作业对作业云体单元的回波体积的发展起到一个很明显的促进作用。

从作业云体单元和对比云体单元的垂直累积液态水含量作业前后随时间演变特征(图 14)可以看出,作业之后,作业云体单元的垂直累积液态水含量刚开始是减少的,但在 20 min 后开始波动式增加,而对比云体单元的垂直累积液态水含量在作业之后则出现减小的趋势,总体都是下降趋势。作业云体单元相对于对比云体单元有明显的正偏离变化。

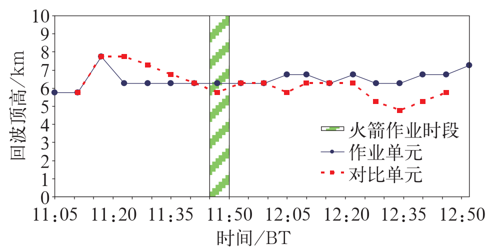

图 12 同图 10,但为回波顶高

Fig. 12 Same as Fig. 10, but for height of echo top hight

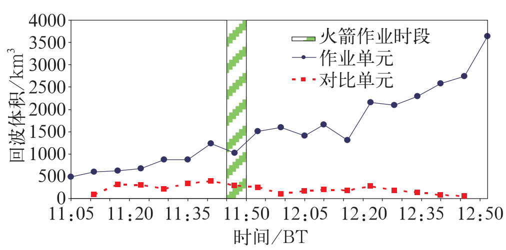

图 13 同图 10,但为回波体积

Fig. 13 Same as Fig. 10, but for echo volume

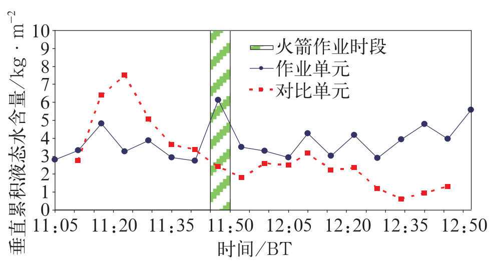

图 14 同图 10,但为垂直累积液态水含量

Fig. 14 Same as Fig. 10, but for vertical accumulative liquid water content

综合作业云体单元和对比云体单元的 5 个雷达回波参量在作业前后的变化特征可以得出,此次催化作业前后,与对比云体单元的回波参量相比,作业云体单元的回波参量在作业后出现了明显的正偏离,即作业后作业云体单元的回波参量的变量值与对比云体单元回波参量的变量值之差均为正,说明此次催化作业起到了一定的增雨效果。因此,可以得出,此次播云作业后对作业云体单元产生了云的微物理变化,在催化作业 1 h 的时间内引起了作业云体单元雷达回波增强的发展趋势,是作业云体单元发展的旺盛,相对于对比云体单元来说,作业云体单元出现了明显的正偏离,此次作业在云中得到了明显的微物理响应。

6 结论与讨论

(1) 本文选取江西省相似天气形势下的两个对流云火箭增雨作业个例,使用基于日雨量和小时雨量资料的区域历史回归分析方法,以及基于雷达探测的作业云体单元和对比云体单元的时间序列对比分析方法进行综合分析,结果发现,两个个例的增雨效果具有较好的一致性。分别使用小时雨量和日雨量数据,利用区域历史回归方法,在通过显著性检验的前提下,两个个例均得出正效果;时间序列分析中 5 个雷达回波物理参量在作业前后与对比云体单元相比,作业云体单元均发展并增强,其中,作业云体单元的回波体积尺度增加均比较明显,回波发展变化具有明显的一致性。本文两次个例增雨结果具有趋势一致性的结论,可以得出,在合适的作业条件下,针对对流云进行的火箭增雨作业可以得到较好的增雨效果。

(2) 使用区域历史回归分析方法,2014 年 6 月 16 日个例中,使用小时雨量作为统计变量分析得到的绝对增雨量为 3.14 mm,相对增雨率为 163.58%;使用日雨量作为统计变量分析得到的绝对增雨量为 67.4 mm,相对增雨率为 159.1%。2013 年 7 月 14 日个例中,使用小时雨量作为统计变量分析得到的绝对增雨量为 2.25 mm,相对增雨率为 256.58%;使用日雨量作为统计变量分析得到的绝对增雨量为 10.64 mm,相对增雨率为 38.74%。本文两次个例选用的都是业务作业个例,作业前人为选定作业影响区,影响区降水条件比对比区要好。尽管两区的历史相关性比较好,但作业当天影响区的自然雨量可能比对比区大,在一定程度上造成了增雨效果值偏大。另外,利用日雨量数

据计算得到的绝对增雨量要大于小时雨量数据计算的绝对增雨量，原因可能是小时雨量的时空分辨率均高于日雨量，两者选取的作业影响区域内的雨量站点和作业期的雨量数据时间段不同。

(3) 使用时间序列对比分析方法，对比分析作业云体单元和最相似对比云体单元在作业前后的雷达探测物理量的时间序列变化发现，作业云体单元5个雷达回波参量相对于对比云体单元均出现了明显的正偏离现象，且两次个例的变化趋势较为一致，两次个例增雨效果的物理证据都十分明显。其中，2014年6月16日增雨作业个例可以得出以下结论：最大反射率作业之前对比云体单元略高于作业云体单元，作业之后，作业云体单元最大反射率提高并维持稳定，对比云体单元最大反射率下降。作业后作业云体单元的降水通量、回波体积和垂直累积液态水含量相对于对比云体单元出现了明显的正偏离。作业后，作业云体单元的回波体积相对于作业之前的增幅在5个回波参量中是最大的，说明催化作业使得作业云体单元的尺度明显增加。2013年7月14日增雨作业个例可以得出以下结论：作业后，作业云体单元的最大反射率、回波顶高和垂直累积液态水含量相对于对比云体单元的发展有一定程度上的增加，说明催化作业对作业云体单元起到了一定的影响，一定程度上改变了云中的物理量的发展。作业云体单元的降水通量和回波体积相对于作业之前的增幅十分明显，说明催化作业使得作业云体单元的尺度增加，并在一定程度上能够印证催化作业引起了实际雨量的增加。

(4) 通过选取合适的多普勒雷达回波资料，对各个参量的回波变化进行综合分析，可以在一定程度上解释人工影响天气的作业效果。多普勒天气雷达全天候连续工作，采样间隔短，资料多样化，从雷达资料中可以分析出云体单元发生、发展、维持、消亡的若干信息，因此，多普勒雷达资料可以对作业效果进行监测比较，以提高人影作业的科学性。

(5) 本文通过国家气象观测业务网的自动站雨量数据和业务化雷达的探测数据资料，对对流云火箭增雨作业个例进行分析。评估人工增雨作业效果，针对地面雨量进行区域历史回归分析的同时，利用多普勒雷达观测资料验证播云作业的微物理响应，是科学可行的。文中日雨量数据资料使用的是国家自动站的雨量资料，分辨率较低，下一步工作中将使用分辨率更高的区域自动站的日雨量资料进行火箭增雨作业的区域历史回归分析工作。利用本文的技术方法对于地方人影业务部门分析研究火箭增雨作业效果具有一定的参考价值。

参考文献

白卡娃，杨昌年，宋娟，等，2005. 南京周边地区夏季对流云降水的雷达回波特征与人工增雨[J]. 气象科学，25(2)：206-211.

陈冰，张深寿，冯晋勤，2003. 新一代天气雷达产品在人工增雨作业中的应用[J]. 气象，29(1)：23-26.

洪光，周庆满，林滋新，等，1995. 青岛月降水量Γ分布的统计特征[J]. 青岛海洋大学学报，25(2)：153-161.

贾烁，姚展予，2016. 江淮对流云人工增雨作业效果检验个例分析[J]. 气象，42(2)：238-245.

蒋年冲，吴林林，曾光平，2006. 抗旱型火箭人工增雨效果检验方法初步研究[J]. 气象，32(8)：54-58.

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.

李玉林，吴万友，蔡定军，等，2010. 江西省云水资源特征分析[J]. 气象科技，38(5)：613-619.

李玉林，杨梅，黄少平，等，2003a. 江西省夏季干旱特征分析[J]. 应用气象学报，14(Z1)：161-169.

李玉林，杨梅，曾光平，2003b. 江西省7至9月水汽资源特征[J]. 气象科技，31(3)：167-173.

李玉林，杨梅，曾光平，2004. 江西省夏季降水效率特征[J]. 气象科技，32(1)：44-47.

刘晴，2013. 人工增雨效果统计检验方案优选及个例分析[D]. 北京：中国气象科学研究院.

刘晴，姚展予，2013. 飞机增雨作业物理检验方法探究及个例分析[J]. 气象，39(10)：1359-1368.

鹿翠华，2010. 最大风速变化特征及再现期极值估算[J]. 气象科技，38(3)：399-402.

马巨贤，易宜曲，朱美荣，1985. 江西省气候区划刍议[J]. 江西科学，3(1)：17-24.

王婉，姚展予，2009. 人工增雨统计检验结果准确度分析[J]. 气象科技，37(2)：209-215.

叶家东，范蓓芬，1982. 人工影响天气的统计数学方法[M]. 北京：科学出版社.

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.

曾光平，方仕珍，肖锋，1991. 1975—1986年古田水库人工增雨效果总分析[J]. 大气科学，15(4)：97-108.

曾光平，郑行照，方仕珍，等，1994. 非随机化人工降雨试验效果评价方法研究[J]. 大气科学，18(2)：233-242.

曾光平，朱鼎华，王祖炉，1997. 古田人工降雨应用研究[J]. 气象，23(12)：34-38.

张瑞波，刘丽君，钟小英，等，2010. 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，36(2)：70-75.

周德平，宫福久，王吉宏，2006. 东北冷涡云系人工增雨作业效果的检验和分析[J]. 高原气象，25(5)：950-958.

Rosenfeld D, Woodley W L, 1993. Effects of cloud seeding in West Texas (additional results and new insights)[J]. J Appl Meteor, 32(12): 1848-1866.

Woodley W L, Rosenfeld D, 2004. The development and testing of a new method to evaluate the operational cloud-seeding programs in texas[J]. J Appl Meteor, 43: 249-263.