

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. 气象, 42(2):238-245.

江淮对流云人工增雨作业效果检验个例分析^{*}

贾 烁 姚展予

中国气象科学研究院中国气象局云雾物理重点开放实验室, 北京 100081

提 要: 江淮对流云是安徽省夏季开展人工增雨作业的主要作业对象, 不同于经过严格试验设计的随机试验, 大多采用非随机的地面火箭、高炮或者烟炉的作业方式。由于对流云存在生命期较短局地性强、自然变差较大等特点, 对其作业效果进行客观、科学、定量的效果评估存在一定困难。利用安徽省国家级地面气象站降水量日值数据和覆盖目标区的 SA 多普勒雷达资料, 将区域历史回归分析统计检验方法和播云多普勒雷达识别追踪及物理检验方法相结合对 2012 年 6 月 28—30 日江淮对流云增雨作业效果进行个例分析。结果表明, 作业后目标区绝对增雨 37.2 mm, 相对增雨 65.18%, 统计显著度 $\alpha < 0.1$; 基于雷达探测基数据识别追踪作业单元, 选取合适对比单元, 对比分析作业单元与对比单元作业前后雷达回波参数的变化差异给出了对应统计检验结果的物理证据。

关键词: 对流云, 增雨作业, 统计检验, 物理检验

中图分类号: P481

文献标志码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2016.02.012

Case Study on the Convective Clouds Seeding Effects in Yangtze-Huaihe Region

JIA Shuo YAO Zhanyu

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

Abstract: Convective clouds in Yangtze-Huaihe Region are the main seeding objects of precipitation enhancement experiments in Anhui Province in summer. Unrandomized seeding operations are usually adopted using rocket launchers, artilleries or ground generators, rather than the randomized trials through strict test design due to some limited condition. Convective clouds have characteristics of short life span and considerable large local and natural variations, which add great difficulties to the objective, scientific and quantitative evaluation of the operation effects. Based on daily rainfall data of national ground stations of Anhui Province and SA Doppler Radar data of the operation areas, this paper makes a case study on the seeding effects of convective clouds in Yangtze-Huaihe Region from 28 to 30 June 2012 with combination of regional historical regression statistical analysis and physical test method using Doppler Radar identification and track of cloud seeding. The results indicate that the rainfall of target area increases 37.2 mm and obtains an enhancement rate of 65.19% after seeding, with a significant level $\alpha < 0.1$. We identify and track seeded units according to the radar data, define appropriate control units and then compare the radar echo parameters of seeded units and control units before and after operation to give physical evidence of the operation effects.

Key words: convective cloud, precipitation enhancement, statistical evaluation, physical test

^{*} 国家自然科学基金面上项目(41375135)及公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306040 和 GYHY201406033)共同资助
2015 年 3 月 9 日收稿; 2015 年 5 月 15 日收修定稿
第一作者: 贾烁, 从事云降水与人工影响天气研究. Email: jia91shuo@163.com
通信作者: 姚展予, 从事云降水与人工影响天气研究. Email: yaoyz@cma.gov.cn

引言

对流云是我国南方夏季的主要降水云系,与层状云或积层混合云相比,一般情况其自然降水效率不高,有较大的增雨潜力(胡雯等,2005;孙晶等,2015)。所以,选择符合作业条件的对流云在合适的时机和部位开展人工增雨作业是缓解南方夏季干旱、水资源短缺状况的主要途径之一(蒋年冲等,2003)。效果检验是人工影响天气作业中不可缺少的环节,在整个作业过程中占有重要地位。但由于对流云的生命史较短、局地性强和自然降水的时空变差较大以及对云降水的物理机制和发展变化的物理过程还缺乏全面、系统、深入的了解,对流云增雨作业效果评估一直都是人工影响天气试验中的难点。

1988—1989年,美国在西德克萨斯开展针对过冷对流云的动力播云随机试验,共得到183个单体(93个播撒和90个未播撒),分析C波段Skywater雷达观测的三维体扫雷达数据得到显著的单体播撒效果,最大高度增加7%,面积增加43%,持续时间增加36%,单体降水量增加130%(Rosenfeld et al, 1993)。1991—1998年,在泰国西北部开展探索型和证明型冷云随机增雨试验,尽管证明型试验得到的增雨效果未达到统计显著性水平,但仍得到对对流单体和对流单元实施冷云播撒作业的潜在效果(Woodley et al, 2003a; 2003b)。

科学界普遍推崇随机化人工增雨科学试验,把符合催化作业指标的样本分为两组,随机决定一组催化,一组不催化留作对比,根据随机抽样理论得到定量的统计检验结果,并要求伴有人工催化使目标云的宏微观物理量发生直接变化的物理学证据,认为这样得到的评估结果更具可信度(WMO, 2010)。但随机试验需要放弃一部分作业机会,面对迫切的实际需求,大多数国家选择非随机的人工增雨作业。

Woodley等(2004)于2003年提出一种基于浮动目标区,对短期非随机业务化对流云作业效果进行客观评估的方法,利用NEXRAD雷达回波拼图定义浮动目标区分析单元,在目标单元叠加飞机播撒作业情况确定播撒单元和未播撒单元,根据客观标准从所有未播撒单元中确定每一个播撒单元的控制对,通过对1999—2001年作业季的催化效果进行评估,得到同随机播云试验一致的显著作业效果。

周勇等(2001)通过运用714C型数字化雷达采集的加密回波资料,采用目标云和对比云比较分析的方法,分析一次对流云作业个例的催化效果,结果表明,目标云在降水、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。蒋年冲等(2008)利用2003年在试验区获取的对流云人工增雨监测资料,采用成对对流云试验方案,对一次对流云人工增雨作业效果进行评估,通过对作业云和对比云催化前、后雷达特征量和地面雨量变化分析,以及作业云自身对比分析和与对比云的双比分析,初步得出人工催化30 min后才能产生明显的增雨效果,增雨效果在100%以上。

安徽地处中纬度,属暖温带与亚热带的过渡型气候,南北冷暖气流交汇频繁,天气多变,降水的年际变化较大(张红等,2012)。根据安徽省气象台和安徽省气候中心整理统计的2004—2013年旱灾情况,结果显示10年间除2007年外,均出现了不同程度的旱情。

面对抗旱减灾的实际需求,每年6—8月安徽省抓住有利作业时机积极开展针对夏季对流云的地面增雨作业,本文选择2012年6月28—30日对流云增雨作业个例,用区域历史回归分析方法定量地给出催化作业效果,采用基于多普勒雷达观测资料的云体回波识别追踪技术对比分析作业前、后作业单元与对比单元回波参量变化差异的物理检验方法给出作业效果的物理证据,探索将统计检验与物理检验相结合对非随机对流云增雨作业进行客观、科学效果评估的方法。

1 资料与方法

1.1 资料

综合考虑数据的时间分辨率、空间分辨率以及数据质量控制情况,使用1951—2013年安徽省82个国家级地面气象站的降水量日值(20时至次日20时)数据进行统计检验计算。同时,收集安徽省2012年6月28—30日对流云作业期间覆盖目标区的S波段全相参多普勒天气雷达(SA雷达)三维体扫等高平面位置显示(CAPPI)格式的雷达基数据(时间分辨率为6 min),利用其识别追踪作业单元,选取符合条件的对比单元,处理得到所需的雷达回波参量进行物理检验分析。

1.2 统计检验

统计检验的主要评估对象是地面降水量, 比较未进行作业的自然降水量和作业后的降水量的差值并分析差值的显著性。设作业后的降水量为 R , 自然降水量为 R' , 它们的差值 $E=R-R'$ 即为增雨作业效果。作业后的 R 是可以测量的, R' 通常可以通过统计方法来估计。如果两者之间存在差异, 则还要对这个差值进行显著性检验, 指出由于降水的自然起伏和估计值的随机误差引起这种差异的可能性有多大(叶家东, 1979)。这种方法能在一定显著性水平上得出定量的增雨效果, 便于评价作业的有效性, 估算开支和效益比, 所以统计检验是人工影响天气效果检验的基本方法(黄彦彬等, 2011)。

本文采用非随机区域历史回归方案进行作业效果的统计检验, 该方法建立在作业期目标区与对比区自然雨量的统计相关关系与历史上同类天气条件下的雨量区域相关性相同的假设之上, 根据两区历史雨量资料建立区域历史回归方程, 将对比区作业期雨量代入方程求出目标区作业期自然雨量的估计值, 再与目标区作业期实测雨量比较求得增雨效果(Nirel et al, 1995)。

对人工增雨效果进行显著性检验, 首先作出“增雨效果不显著”的原假设, 根据一定的显著性水平定出当原假设成立时检验统计量经常出现的区间, 从而得到合理的拒绝原假设的标准, 最后根据目标区、对比区的作业期、历史期样本计算出检验统计量的值, 根据该值是否落在拒绝域内做出“增雨效果显著”或“不显著”的推断。本文采用参量性的 t 检验方法对区域历史回归分析得到的作业效果进行显著性水平检验(叶家东, 1979)。

1.3 物理检验

通常用统计检验方法对人工增雨作业的间接效果——地面降水量进行分析以判断增雨效果, 用物理检验方法对人工增雨作业的直接效果(作业目标云的宏微观物理量的变化)进行观测分析, 从而给出催化作业效果的物理证据(蒋年冲等, 2006)。机载云物理探测仪器可以随探测作业飞机直接入云探测云的微物理参量, 通过分析云中微物理参量的变化, 得到人工增雨作业的直接效果(彭亮等, 2007; 于丽娟等, 2009; 辛乐等, 2011; 刘晴等, 2013)。但我国地方人工影响天气业务部门人工增雨业务作业有机载

云物理探测仪器配合探测的很少, 借助机载仪器探测获取作业效果物理证据较难实现。多普勒雷达作为一种全天候的探测工具, 时间分辨率较高, 探测范围较广, 雷达回波产品丰富, 而且在我国已经业务布网, 现已成为人工影响天气作业条件判别及作业后分析作业效果的强有力工具(陈冰等, 2003; 唐仁茂等, 2010)。

在美国 NCAR 开发的 TITAN 系统风暴识别追踪算法的基础上(韩雷等, 2007), 研发了播云多普勒雷达识别追踪及物理检验算法, 利用多普勒雷达回波得到的物理参量寻找作业前与播云作业单元生命发展期相同或近似的对比单元, 通过分析作业前、后作业单元回波参量随时间的变化情况以及作业单元, 对比单元同一发展阶段回波参量的对比, 得到催化作业效果的物理学证据。

2 个例分析

针对 2012 年 6 月 28—30 日江淮对流云增雨作业个例进行天气条件、作业情况、统计检验和物理检验方面的分析。

2.1 天气条件

2012 年 6 月 28 日(图 1), 高空 500 hPa, 贝加尔湖到四川盆地为一低槽区, 584 线北抬至山东、河北和山西境内, 安徽处在副热带高压(以下简称副高)外围的西北部, 受副高外围西南气流的影响; 700 hPa 受西南低涡影响, 850 hPa 切变线北抬至沿淮地区; 受低槽切变线及西南暖湿气流的影响, 安徽全省以阴天为主, 大部分地区有阵雨或雷雨。29—30 日(图 1), 500 hPa 副高经历一次减弱撤退到再次发展的过程, 700 hPa, 山西省上空有一槽形成并迅速加深, 伴随弱冷空气东移南下, 冷暖空气交汇于淮北, 且低层配合有冷切和低空急流。综上, 6 月 28—30 日的高低空系统配置形成了有利于降水产生的环流背景。

分析阜阳站(58203)6 月 28—30 日 08 和 20 时的探空资料(源自 <http://weather.vwyo.edu>), 700 hPa 比湿 $\geq 10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 850 hPa 比湿 $\geq 15 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 850 hPa 温度露点差 $\leq 2 \text{ }^\circ\text{C}$, 上干(冷)下湿(暖), 具有较好的水汽条件; 850 hPa 的假相当位温 $\geq 350 \text{ K}$, K 指数 $\geq 36 \text{ }^\circ\text{C}$, 沙氏指数(SI) $\leq 0 \text{ }^\circ\text{C}$, 指示云中有对流存在, 有利于水汽的垂直输送; 从 6 月

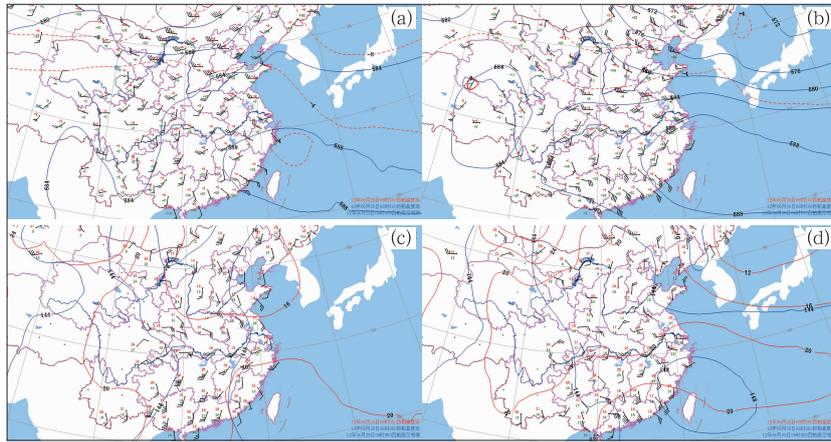


图 1 2012 年 6 月 28 日 08 时(a,c)、30 日 08 时(b,d) 500 hPa(a,b)和 850 hPa(c,d)的天气形势场

Fig. 1 The synoptic situation at 500 hPa (a,b) and 850 hPa (c,d) at 08:00 BT 28 (a,c) and 30 (b,d) June 2012

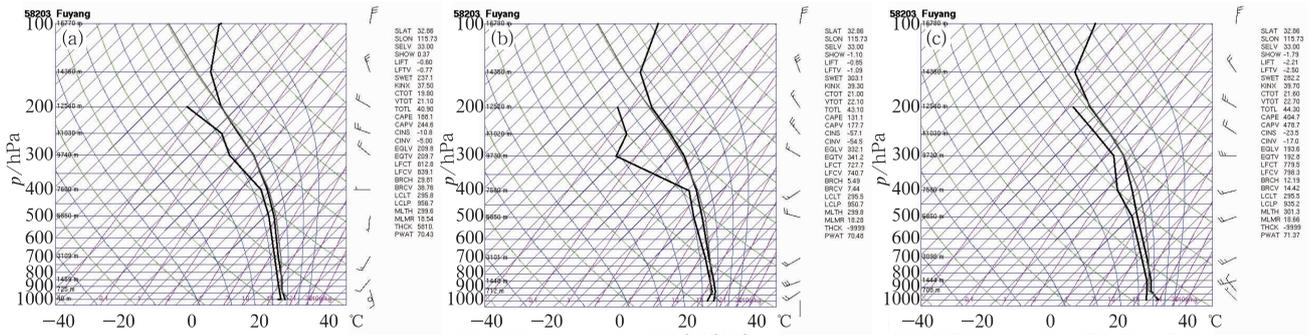


图 2 2012 年 6 月 28 日 20 时(a)、29 日 08 时(b)和 20 时(c) 阜阳站(58203)温度-对数压力图

Fig. 2 $T-\ln p$ diagram at 20:00 BT 28 (a),

08:00 BT 29 (b) and 20:00 BT 29 (c) June 2012 at Fuyang

28 和 29 日阜阳站的温度-对数压力($T-\ln p$)图看出(图 2),中低层间有明显的垂直风切变,对流有效势能(CAPE)增加,大气层结处于不稳定状态;综合以上条件,具备对流发生发展的必要条件,适合开展人工增雨作业。

2.2 作业情况

夏季影响安徽省的大尺度环流以高压(大陆高压、副高)控制及其边缘影响为主,其次是沿海槽型、弱环流型及台风倒槽型天气形势(蒋年冲等,2003)。其中,副高外围型环流特点是安徽处在副高外围的西北部,受西南气流影响,平均总云量自南向北逐渐增多,降水沿淮淮北偏多(吴有训等,2006)。根据前面关于作业个例的天气形势分析,2012 年 6 月 28—

30 日属于副高外围型,受低槽切变线共同影响,增雨作业时机的判断主要依靠蚌埠站 SA 雷达 6 min 一次的雷达回波图像,分析发现 6 月 28 日 23:18、29 日 02:39 和 06:34 安徽东北部的宿州市、淮北市地区出现反射率在 40~45 dBz 以上的对流单元(图 3),其中 06:34 时观测到的对流单元强回波面积达到 200 km²(图 4),宿州市、蚌埠市作业点抓住有利作业时机开展地面火箭、高炮增雨作业,作业前天气状况为小到中雨,作业后为中到大雨。

2.3 统计检验

选择基于浮动目标区的区域历史回归方案对 2012 年 6 月 28—30 日对流云增雨作业个例进行统计检验效果评估。设目标区历史样本为 y_i ,目标区

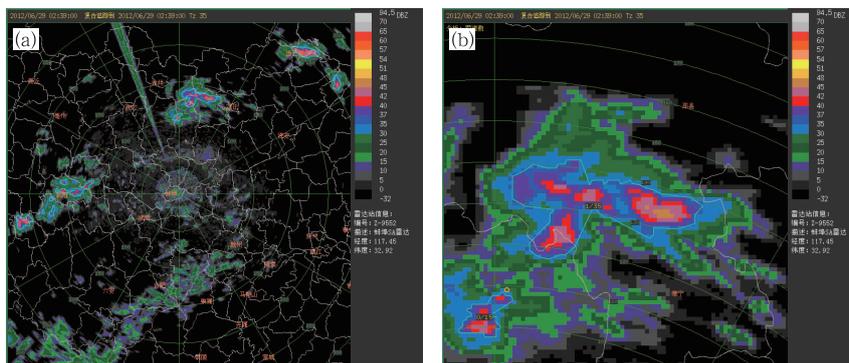


图 3 2012 年 6 月 29 日 02:39 蚌埠 SA 雷达 CAPPI 雷达回波基本反射率(单位:dBz)
(a)大范围的雷达回波图像,(b)作业目标单元局部放大图

Fig. 3 Reflectivity of CAPPI radar echo from the Bengbu SA Radar at 02:39 BT 29 June 2012(unit:dBz)
(a) radar echo image of wide areas, (b) the enlarged target unit

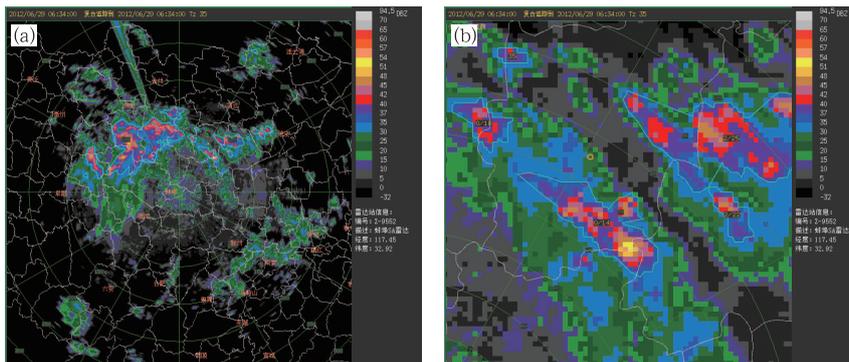


图 4 同图 3, 但为 06:34

Fig. 4 Same as Fig. 3, but for 06:34 BT

历史样本的平均值为 \bar{y}_n , 目标区历史样本的标准差为

$$S_y \left[S_y = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_n)^2} \right]$$

目标区作业样本为 y_j , 目标区作业样本的平均值为 \bar{y}_k ; 对比区历史样本为 x_i , 对比区历史样本的平均值为 \bar{x}_n , 对比区历史样本的标准差为 S_x $\left[S_x = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_n)^2} \right]$; 对比区作业样本为 x_j , 对比区作业样本的平均值为 \bar{x}_k ; 历史样本数为 n , 作业样本数为 k 。

根据实际作业情况、作业期天气形势分析、作业高度高空风(西南风为主)确定作业影响区(即目标区)站点为宿州、灵璧、泗县、固镇, 同时结合作业地区气候背景、地形条件选择涡阳、利辛、蒙城作为对比区站点, 所选对比区与目标区面积近似, 相关性较好($r=0.7547$), 且不受催化作业影响; 选择日雨量

作为评估单元, 则区域日雨量为统计变量, 6 月 28—30 日为作业样本(3 个), 选择历史同期(1971—2000 年 6 月)相同天气背景下的降水日作为历史样本(316 个)。

采用参量性的 t 检验法对增雨效果进行显著性检验, 要求统计变量近似服从正态分布。目标区、对比区区域日雨量未通过正态分布拟合度检验, 取 7 次方根进行变代换, 将变换后的新变量作为统计变量, 得到新变量的柯氏值小于 1.36, 符合正态分布的要求(曾光平等, 1997)。

根据最小二乘法, 利用历史期目标区、对比区日雨量建立自然降水情况下目标区日雨量的一元线性预报方程 $y=0.7326x+0.3329$ (其中系数 $b = \frac{S_{xy}}{S_x^2}$

$$= \frac{\sum_{i=1}^n \bar{x}_i \bar{y}_i - n \bar{x}_n \bar{y}_n}{\sum_{i=1}^n \bar{x}_i^2 - n \bar{x}_n^2} = 0.7326, \text{ 系数 } a = \bar{y} - b\bar{x} =$$

0.3329),用 F 检验法对求得的回归方程进行显著性水平检验($F < 0.01$),满足显著性要求;将作业期对比区降水量代入上述方程,求得对应目标区自然降水量的估计值 57.075 mm,与实测值比较得到绝对增雨 37.2 mm,相对增雨 65.19%;结合作业前、后的实际天气状况,由小到中雨转为中到大雨,说明区域历史回归分析得到的增雨效果比较符合实际情况。

采用参量性的 t 检验法对求得的增雨效果进行显著性检验,将上述对比区、目标区降水量数据代入统计量 t 的表达式

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

根据求得的 t 值以及自由度 $\nu = n - 2 = 314$,查 t 分布数值表得 $\alpha = 0.0904$,即为区域历史回归统计分析增雨效果的显著性水平。综上所述,2012 年 6 月 28—30 日对流云增雨作业统计检验得到比较显著的正效果。

2.4 物理检验

本文采用的播云多普勒雷达识别追踪及物理检验算法主要用于某个对流云单元作业效果的物理检验,下面选择 6 月 28—30 日作业个例中 1 次对流云单元的火箭增雨作业,基于蚌埠站 SA 雷达三维体扫 CAPPI 格式的雷达基数据,设定 35 dBz 的回波阈值识别追踪作业单元,选择合适的对比单元,对比分析作业单元和对比单元作业前、后雷达回波物理参量的变化,得到增雨作业效果的物理证据。

2012 年 6 月 29 日 06:36—06:37,宿州市泗县三湾乡作业点(33.47°N、117.85°E)利用地面火箭进行对流云增雨作业。因一定时间后,作业单元发生较大规模的合并,故选取 06:12—07:41 的雷达基数据进行分析,作业目标单元在作业点的西南方向,选取的对比单元位于作业点的正东方向(图 5),通过处理雷达基数据对比分析作业单元、对比单元雷达回波参量随时间的变化差异(图 6—图 10)。

作业前,作业目标单元与所选对比单元的回波顶高均在 8 km 左右,对流发展均比较旺盛;作业时,作业目标单元回波顶高小幅增加后处于减小趋势;作业后,对比单元回波顶高在 7~8 km 起伏变化,而催化作业抑制了作业目标单元回波顶高的继续减小,作业后 20 min 作业目标单元回波顶高持续增加至最大值,较对比单元增幅明显,说明催化作业

消耗云中过冷水,释放潜热,使得作业目标单元对流进一步发展(图 6)。

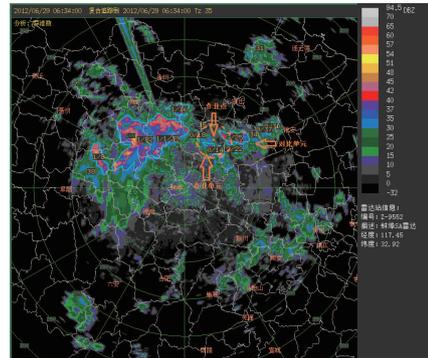


图 5 作业点分布、作业单元与选取的对比单元(图中箭头所指)

Fig. 5 Operation point distribution, the seeded unit and the selected control unit (arrow in the figure)

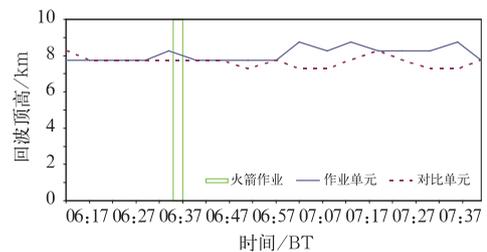


图 6 作业前、后作业单元和对比单元回波顶高随时间变化的对比分析

Fig. 6 The comparison of changes in echo top between seeded unit and control unit before and after cloud seeding

作业前,作业目标单元回波体积先减小后缓慢增加,对比单元回波体积维持在 1000 km³ 左右,有减小的趋势;作业后,对比单元回波体积缓慢减小,作业单元回波体积先是小幅度起伏,作业后 30 min 由 600 km³ 迅速增至 1200 km³ 以上,这与回波顶高的变化比较一致,但比其增加更明显,这也就解释了后面最大反射率没有显著增加的原因(图 7)。

作业前,对比单元的最大反射率在 46~50 dBz 起伏变化,作业目标单元的最大反射率由 50 dBz 逐渐增至 55 dBz 后有减小趋势,这与回波顶高的变化是一致的,强回波指示云体含有大量过冷水,核化过程和贝吉隆过程消耗云中过冷水,释放潜热,促进对流进一步发展,回波顶高增加;作业后,作业单元的最大反射率先是继续减小,推测是过冷水形成降水

粒子降落,之后对应回波顶高和回波体积的增加,最大反射率小幅增加维持在 50 dBZ 以上,而对比单元最大反射率起伏变化逐渐减小(图 8)。

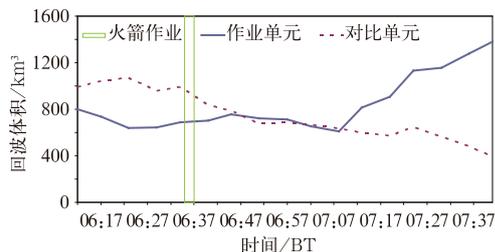


图 7 同图 6, 但为回波体积

Fig. 7 Same as Fig. 6, but for echo volume

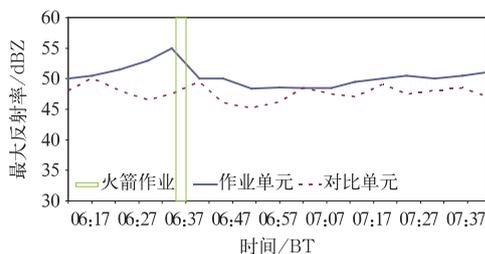


图 8 同图 6, 但为最大反射率

Fig. 8 Same as Fig. 6, but for maximum reflectivity

作业前,作业目标单元的垂直累积液态水含量(VIL)由 $5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 迅速增至最大值 $9 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 后逐渐减小,对比单元 VIL 也由 $6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 逐渐减小;作业后,目标单元的 VIL 先是继续减小后逐渐增加,作业后 30 min VIL 开始迅速增加达到 $9 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,对比单元呈现相似的发展趋势但增幅较小(图 9)。

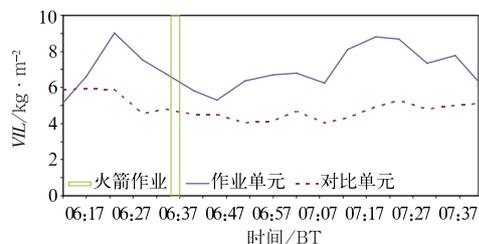


图 9 同图 6, 但为 VIL

Fig. 9 Same as Fig. 6, but for VIL

作业前,作业目标单元降水通量增至 $900 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 的极值后在 $900 \sim 800 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 窄幅起伏变化,对比单元降水通量增至最大值;作业时作业目标单元和对比单元的降水通量均处于减小趋势;作业后,对比单元降水通量逐渐起伏减小,而作业单元先是小

幅度增加后减小,作业后 30 min 开始急剧增加(图 10)。

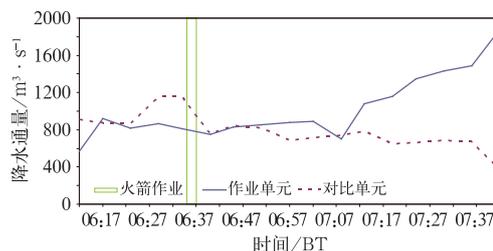


图 10 同图 6, 但为降水通量

Fig. 10 Same as Fig. 6, but for precipitation flux

综合上述分析,作业前,回波顶高、最大反射率和 VIL 均达到小峰值,说明作业目标单元和对比单元均处于成熟发展阶段;作业时各物理参量呈减小趋势,催化作业抑制了作业目标单元物理参量的继续减小,作业目标单元的回波顶高、最大反射率在催化作业后 20 min 变为增加趋势,尤其回波体积的增加非常明显,对流再次发展,垂直累积液态水含量和降水通量显著增加。

对比单元回波顶高、最大反射率和 VIL 作业前与作业单元相应物理量有一定差异,作业后有小幅增加,所以对作业前、后作业单元与对比单元相应的物理量进行定量双比分析,得到催化作业对作业单元的对流发展有一定正效果,对比单元更早进入减弱消散阶段。说明这次增雨作业促进作业目标单元对流进一步发展,最终延长作业目标单元的生命期,产生更多地面降水,带来明显的增雨效果。

3 结论与讨论

本文利用安徽省 82 个国家级地面气象站的降水量日值数据和蚌埠站 SA 雷达三维体扫 CAPPI 格式的雷达基数据,采用统计检验与物理检验相结合的方法对 2012 年 6 月 28—30 日江淮对流云地面非随机增雨作业个例进行效果检验分析,得到结论如下:

(1) 该个例属于副高外围型大气环流背景下的江淮对流云地面增雨作业,结合探空资料及雷达回波图像分析选取的作业时机和作业部位较合适。

(2) 采用区域历史回归方案对该个例作业效果进行统计检验,选择宿州、灵璧、泗县和固镇为目标

区站点,选择上风方的涡阳、利辛和蒙城为对比区站点,取区域日雨量的7次方根进行变量变换,建立区域历史回归方程,得到绝对增雨37.20 mm,相对增雨65.18%,显著性水平 $\alpha=0.0904$,结合作业前、后的实际天气状况,说明区域历史回归分析得到的增雨效果比较符合实际情况。

(3) 采用基于多普勒雷达观测资料的云体回波识别追踪技术对比分析作业前、后作业单元与对比单元回波参量变化差异的物理检验方法,对宿州市泗县三湾乡作业点6月29日06:36—06:37的对流云火箭作业单元进行分析,通过作业前后与对比单元的比较,说明催化作业带来一定正效果,抑制了作业单元雷达回波参量的减小趋势,促进对流进一步发展,VIL和降水通量显著增加,而对比单元较作业单元更早进入减弱消散阶段。

综合以上定量的统计分析和物理学证据,该次作业带来较显著的增雨效果,说明将统计检验和物理检验相结合对非随机对流云增雨作业进行效果评估是可行的。但鉴于没有得到经过质量控制的区域自动气象站的小时或分钟雨量资料,本文利用日雨量数据对对流云作业效果进行统计检验计算,统计变量的时间分辨率较低,并且跟物理检验所用的6 min一次的雷达基数据不匹配,如果采用小时雨量数据进行统计分析可以进一步提高效果检验的精度。

致谢:感谢安徽省人工影响办公室提供2012年6月28—30日08和20时的各高度层天气图以及蚌埠站SA雷达基数据,感谢怀俄明大学网站提供的阜阳站(58203)2012年6月28日至30日08、20时的探空资料和 $T-\ln p$ 图,感谢祝晓芸在分析天气形势时提供的帮助。

参考文献

- 陈冰,张深寿,冯晋勤. 2003. 新一代天气雷达在人工增雨作业中的应用. 气象,29(1):23-26.
- 韩雷,王洪庆,谭晓光,等. 2007. 基于雷达数据的风暴体识别、追踪及预警的研究进展. 气象,33(1):3-10.
- 胡雯,申宜运,曾光平. 2005. 南方夏季对流云人工增雨技术研究. 应用气象学报,16(3):413-416.
- 黄彦彬,姚展予,游积平,等. 2011. 基于“.NET”的华南区域人工增雨效果统计检验共享平台的设计与实现. 气象,37(6):727-734.
- 蒋年冲,吴必文,袁野,等. 2003. 江淮地区对流云人工增雨技术研究中心的可行性分析. 应用气象学报,14(增刊):151-155.
- 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. 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. 气象科学,28(1):100-104.
- 刘晴,姚展予. 2013. 飞机增雨作业物理检验方法探究及个案分析. 气象,39(10):1359-1368.
- 彭亮,姚展予,戴进,等. 2007. 河南春季一次云降水过程的宏微观物理特征分析. 气象,33(5):3-11.
- 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.
- 辛乐,姚展予. 2011. 一次积层混合云飞机播云对云微物理过程影响效应的分析. 气象,37(2):194-202.
- 吴有训,胡雯,袁野,等. 2006. 安徽夏季云系与东亚环流空间结构. 安徽农业科学,34(10):2224-2227,2229.
- 叶家东. 1979. 人工降水的试验设计和效果检验. 气象,5(2):26-29.
- 于丽娟,姚展予. 2009. 一次层状云飞机播云试验的云微物理特征及响应分析. 气象,35(10):8-24.
- 曾光平,朱鼎华,王祖炉. 1997. 古田人工降雨应用研究. 气象,23(12):34-38.
- 张红,黄勇,刘慧娟. 2012. 安徽省近30年气候变化的空间特征. 生态环境学报,21(12):1935-1942.
- 周勇,王斌,唐仁茂,等. 2001. 对流云增雨作业效果回波对比分析. 应用气象学报,12(增刊):158-163.
- Nirel R, Rosenfeld D. 1995. Estimation of the effect of operational seeding on rain amounts in Israel. J Appl Meteor, 34: 2220-2229.
- Rosenfeld D, Woodley W L. 1993. Effects of cloud seeding in west Texas: Additional results and new insights. J Appl Meteor, 32: 1848-1866.
- Woodley W L, Rosenfeld D, Silverman B A. 2003a. Results of on-top glaciogenic cloud seeding in Thailand. Part I: The demonstration experiment. J Appl Meteor, 42:920-938.
- Woodley W L, Rosenfeld D, Silverman B A. 2003b. Results of on-top glaciogenic cloud seeding in Thailand. Part II: Exploratory analyses. J Appl Meteor, 42:939-951.
- Woodley W L, Rosenfeld D. 2004. The development and testing of a new method to evaluate the operational cloud-seeding programs in Texas. J Appl Meteor, 43:249-263.
- WMO documents on weather modification. 2010. Updated in the meeting of the expert team on weather modification research, Abu Dhabi, 22-24 March 2010.