

文章编号:2096 - 5389(2021)06 - 0071 - 07

多参量动态对比方法在贵州飞机 增雨效果检验中的应用研究

喻乙耽,许 弋,李枚曼,唐辟如

(贵州省人工影响天气办公室,贵州 贵阳 550081)

摘 要:该文根据探空资料、宏观记录、FY2 卫星反演资料、雷达资料等,利用多参量动态对比方法,经作业合理性分析、作业催化剂扩散分析、作业影响区的计算、作业对比区的选择 4 个步骤对 2018 年 5 月 3 日飞机人工增雨两个例进行效果检验分析,得出:影响区雷达回波 K 值、地面小时雨量 K 值在作业后 3 h 变化趋势均为先增后减,作业后有一定的效果,表明该效果检验方法适用于贵州飞机增雨效果检验。

关键词:飞机增雨;多参量区域动态对比法;合理性分析;效果检验

中图分类号:P481 **文献标识码:**B

Application of Multi - Parameter Dynamic Contrast Method in the Test of Aircraft Precipitation Enhancement Effect in Guizhou Province

YU Yidan, XU Yi, LI Meiman, TANG Piru

(Weather Modification Offices of Guizhou Province, Guiyang 550081, China)

Abstract: Based on radiosonde data, macro records, FY2 satellite data, radar data, etc., the effect of Aircraft Artificial Precipitation Enhancement on May 3, 2018 is analyzed by using multi - parameter dynamic contrast method. Four steps are included: rationality analysis of operation, analysis on operation catalyst diffusion, caculation of the operation - influenced area, and selection of operation comparison area, The results show that the change trend of radar echo K value in the influenced area and the K value of surface hourly rainfall increases first and then decreases after 3 hours of operation. The effect made after operation indicates that the effect test method is suitable for aircraft precipitation enhancement in Guizhou.

Key words: aircraft precipitation enhancement; multi - parameter regional dynamic contrast method; rationality analysis; effect test

0 引 言

人工增雨检验,指的是通过向目标云体播撒催化剂后看云体是否产生变化,这种变化直接表现为云的宏观物理量,如云的厚度、持续时间、上升气流速度、云体温度和冰晶浓度等是否产生改变,间

接表现为地面雨量是否增加。一般来说,效果检验按照试验性质可以分为随机化试验和非随机化试验^[1-2],对于随机化试验,需要严格遵守统计学理论,符合随机抽样规则,科学设计来实施作业,比如美国的白顶计划、climax 试验、以色列 - I, II, III 计划、古田增雨计划等^[3-6],但是因随机化试验需要放

收稿日期:2021 - 05 - 13

第一作者简介:喻乙耽(1990—),男,助工,主要从事飞机人工增雨研究工作,E - mail:253042357@qq.com。

通讯作者简介:许 弋(1972—),女,副高,主要从事飞机人工增雨研究工作,E - mail:1042133905@qq.com。

资助项目:贵州省气象局科研项目(黔气科登[2021]03 - 02 号);多参量动态对比方法在贵州飞机增雨效果检验中的应用研究;贵州省气象局科研项目(黔气科登[2020]02 - 04 号);模式产品在飞机人工增雨潜力落区和作业条件判定的应用。

弃一半的作业机会来作试验对比,鉴于贵州省抗旱增雨的迫切需求^[7],随机化试验并不可行。而非随机化试验并不需要大量的样本,仅针对单次或有限数量的作业进行分析,能很好的应用于贵州省人工增雨效果的评估,常用方法有物理检验、序列分析、区域对比分析、区域历史回归试验等^[8]。

目前,贵州省飞机人工增雨主要的检验评估方法为用作业前后云系物理量变化及固定增雨率法来评估作业检验^[9],但是前一种方法以主观性为主且不易量化效果,后一种方法没有根据一次作业的实际天气、作业情况来调整增雨率,因此需要引进一种既可科学客观地描述作业前后物理量的变化,又可以量化人工增雨效果的方法。

1 资料和方法

1.1 资料选取

本文使用的资料包括 2018 年 5 月 3 日 FY2 卫星反演资料(云顶高度、云顶温度、过冷层厚度等)、多普勒天气雷达资料(组合反射率、回波剖面等)、探空资料(含水量、0℃层高度、-10℃层高度、风速、风向等)以及飞机作业信息(飞行高度、飞行时间、飞行轨迹、催化剂含量等)。

1.2 研究方法

区域对比分析法是以同作业期的对比区实测降水量作为自然降水量与作业影响区实际降水量作比较,得出人工增雨效果,但因作业云系受到风场的影响及不同作业工具催化剂扩散方式的差异,作业影响区的划定成为应用此方法的一个难点。

按照周毓荃等^[10]的研究,飞机播撒催化剂扩散方式为移动点源扩散,每时段飞机播撒催化剂扩散用以下方程式表示:

$$q_n(x,y,z,t) = \frac{R\Delta t}{8\sqrt{\pi^3 k_H k_v (t-t_n+t^*)^3}} \times e^{-\frac{[x-x_n-\mu(t-t_n)]^2}{4k_H(t-t_n+t^*)}} e^{-\frac{[y-y_n-\nu(t-t_n)]^2}{4k_V(t-t_n+t^*)}} e^{-\frac{[z-z_n-\omega(t-t_n)]^2}{4k_V(t-t_n+t^*)}}$$

其中, R 为播撒速率, Δt 为每时段飞机播撒间隔时间, x, y, z 和 t 为任一空间时间坐标, x_n, y_n, z_n 和 t_n 为第 n 段飞机播撒点的四维精确坐标,由飞机北斗系统实测输入;由于播撒范围较小、时间较短, μ, ν 为常数,假设大气是以水平运动为主, $\omega = 0$; k_H 和 k_v 为湍流系数,层状云中一般为 $50 \sim 70 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$,积云的湍流系数为 $70 \sim 100 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, t^* 为 10 s 。飞机全程的播撒扩散应是每时段相加的结果,即

$$q(x,y,z,t) = \sum_{n=1}^k q_n(x,y,z,t), k \text{ 为飞机播撒的时}$$

段数。

因此,把上述飞机增雨催化剂扩散计算方案应用于区域对比分析法的作业影响区划定,根据区域对比分析法建立对比区,生成作业影响区和对比区雷达、降水量等参数的对比值(以下简称 k 值),能很好地表征作业后大气物理特征参量及降水的响应情况,该方法被称为多参量动态对比方法,目前,该方法已在 CPAS 云降水精细分析系统中实现。本文选取 2018 年 5 月 3 日一次飞机增雨作业过程为例,阐述多参量动态对比方法在贵州飞机人工增雨中的应用。

2 作业合理性分析

2018 年 5 月 3 日,针对黔东南州开展抗旱为主的飞机增雨服务,14 时 25 分起飞,14 时 54 分开始播撒催化剂,15 时 44 分结束播撒,16 时 45 分着陆,共使用 11 枚催化剂,飞行航线如下图:



图 1 2018 年 5 月 3 日飞行航线
Fig. 1 The flight route on May 3, 2018

针对此次作业个例,对作业高度、作业催化剂类型及作业时机和部位 3 个方面进行合理性分析。

2018 年 5 月 3 日 08 时探空资料(图 2)表明, $0 \sim -10^\circ\text{C}$ 海拔高度为 $4\,298 \sim 8\,111 \text{ m}$,云系深厚,含水量高,增雨条件较好。增雨飞机于海拔高度 $4\,111 \text{ m}$ 入云开始播撒催化剂, $5\,312 \text{ m}$ 结束播撒,飞机实际作业大部分处于 0°C 层以上,作业高度较合理。此外,机翼两侧出现从轻微结冰到中度结冰现象,说明云中过冷水充沛且缺少凝结核,有利于播撒成核类催化剂,本次作业播撒 AgI 冷云焰条,形成人工冰核,加速贝吉龙过程,作业催化剂类型合理。

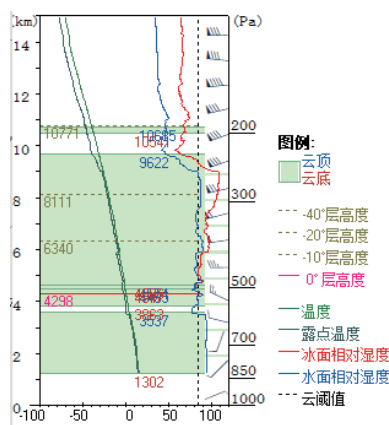


图2 2018年5月3日08时贵阳探空

Fig. 2 Guiyang sounding at 08:00 on May 3, 2018

从作业时 15 时 30 分时卫星云图反演产品平面分布图(图 3)及剖面图(图 4)来看,作业区域云顶高度达 7~8 km、云顶温度 $-30\sim-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、过冷层厚度 4~7 km;从 15 时 04 分、15 时 30 分雷达回波(图 4)来看,黔东南地区有降水回波覆盖,回波强度在 20~40 dBz 之间,回波自西向东移动,为层积云降水,且从飞行高度与雷达回波剖面叠加图(图 6)看出,整个作业时段(14 时 54 分—15 时 44 分)内增雨飞机处于云中。综上所述,该次作业属于在层积冷云中播撒,达到了适合飞机人工增雨的条件,作业时机和部位合理。

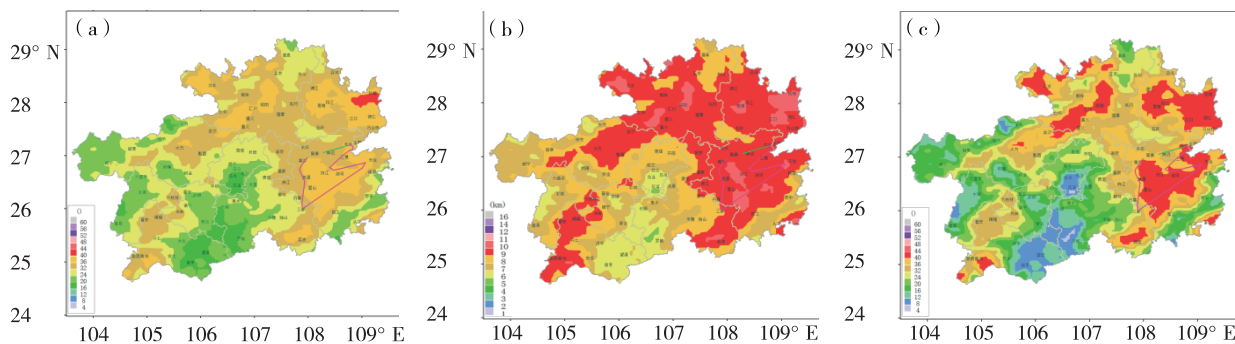


图3 2018年5月3日15时30分作业区域卫星反演产品平面分布图(a. 云顶高度,b. 云顶温度,c. 过冷层厚度)

Fig. 3 At 15:30 on May 3, 2018, the plane distribution map of satellite inversion products in the operation area (a. cloud top height, b. cloud top temperature, c. supercooled layer thickness)

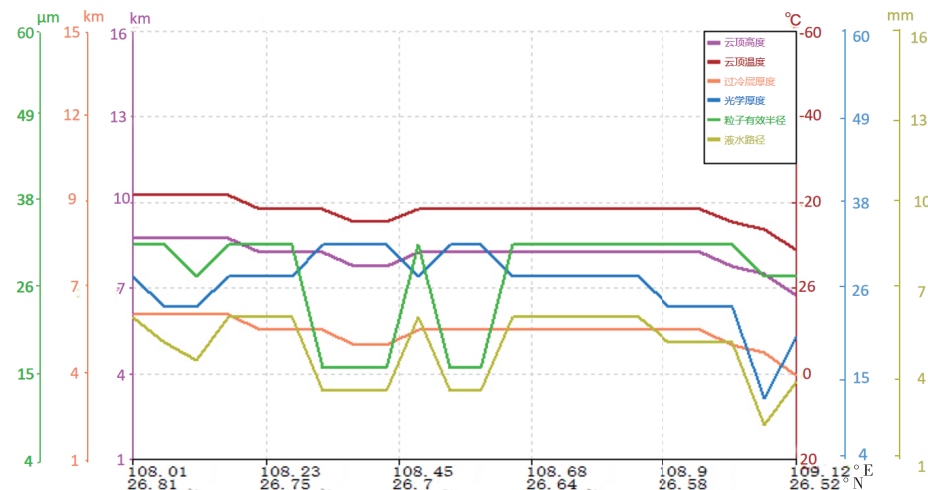


图4 2018年5月3日15时30分作业区域卫星反演产品剖面图

Fig. 4 Profile of satellite inversion products in operation area at 15:30 on May 3, 2018

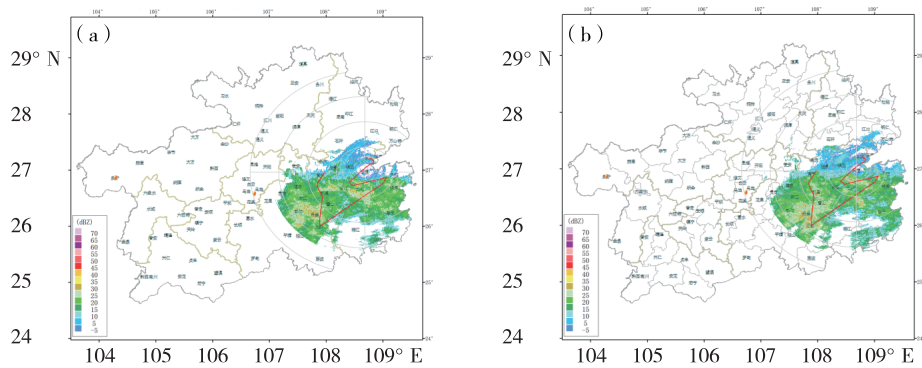


图 5 2018 年 5 月 3 日黔东南雷达回波(a. 15 时 04 分,b. 15 时 30 分)

Fig. 5 Radar echoes of Qindongnan on May 3, 2018(a. 15:04, b. 15:30)

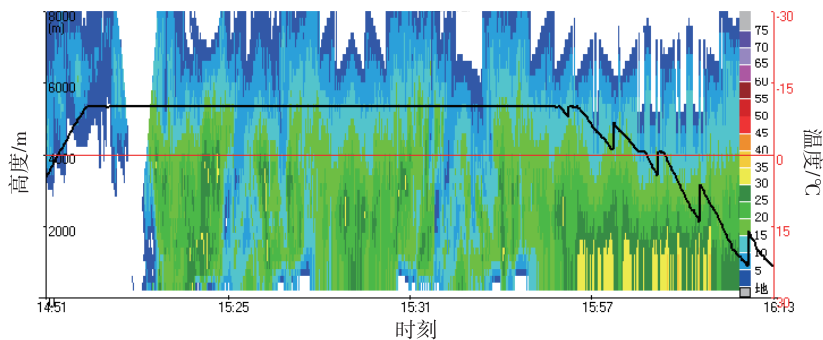


图 6 2018 年 5 月 3 日飞行高度与雷达回波剖面叠加图

Fig. 6 Superimposition of flight altitude and radar echo profile on May 3, 2018

3 催化剂在云中的扩散

图 2 显示,2018 年 5 月 3 日 08 时贵阳探空 0℃ 层水平风速为 $12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,风向为 270° ,此次增雨作业是针对层积混合云开展,且水平方向上的湍流系数往往比垂直方向上大,在计算中,取 $k_H=70\text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$, $k_v=35\text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ 。催化扩散计算具体参数设置如图 7。

催化扩散传输计算

扩散系数 $K_H=$ m^2/s $K_v=$ m^2/s

风场资料: 风速 m/s 风向 度

催化剂及作业时间设置

编号/架次

催化剂类型 10克Agl 数量 根

有效催化剂含量 Exp10 (个/ m^3)

扩散开始时间 时 分

扩散结束时间 时 分

扩散传输范围及浓度

☒ 扩散时长 分钟

☐ 扩散时刻 时 分

☒ 是否计算扩散影响区 区域面积:

影响区计算及输出

催化扩散采样时长 小时

扩散过程回放, 每隔 分钟

图 7 催化扩散计算参数设置

Fig. 7 Parameter setting of catalytic diffusion calculation

图 8 为开始催化时及催化后 1 h、2 h、3 h 催化剂扩散传输与相应时刻雷达回波(平面、剖面),可以看见开始催化后 1~3 h 催化剂扩散区均有回波覆盖且均匀分布,开始催化后 1~2 h 作业区域平面、剖面雷达回波组合反射率最大值均超过 30 dBz, 3 h 后回波减弱。因此,把催化剂扩散采样时长设置为 3 h,每隔 30 min 显示,得到该次作业的影响区(图 9)。

4 对比区选择及增雨效果检验

4.1 对比区选择

针对飞机增雨对比区的选择,传统方法基本遵循对比区要位于作业影响区的上风方或垂直风向横侧且受同一降水天气系统的影响,因此,此例中对比区本应位于影响区北面、南面或东面,但是多参量动态对比法生成影响区是根据催化剂扩散分段生成确定的,只要对比区选择不与影响区太接近(距离不超过一个时段),对比区并不会对影响区产生影响,具有可比性。

从生成的飞机增雨作业影响区(图 9)可以看出作业范围较大且垂直风向左右两侧回波稀少,不利于对比,选取故选取垂直风向前后做对比区,即垂直风向上方为对比 1 区,下方为对比 2 区,且可保证

作业影响区和对比区皆处于同一过程中(图 10)。

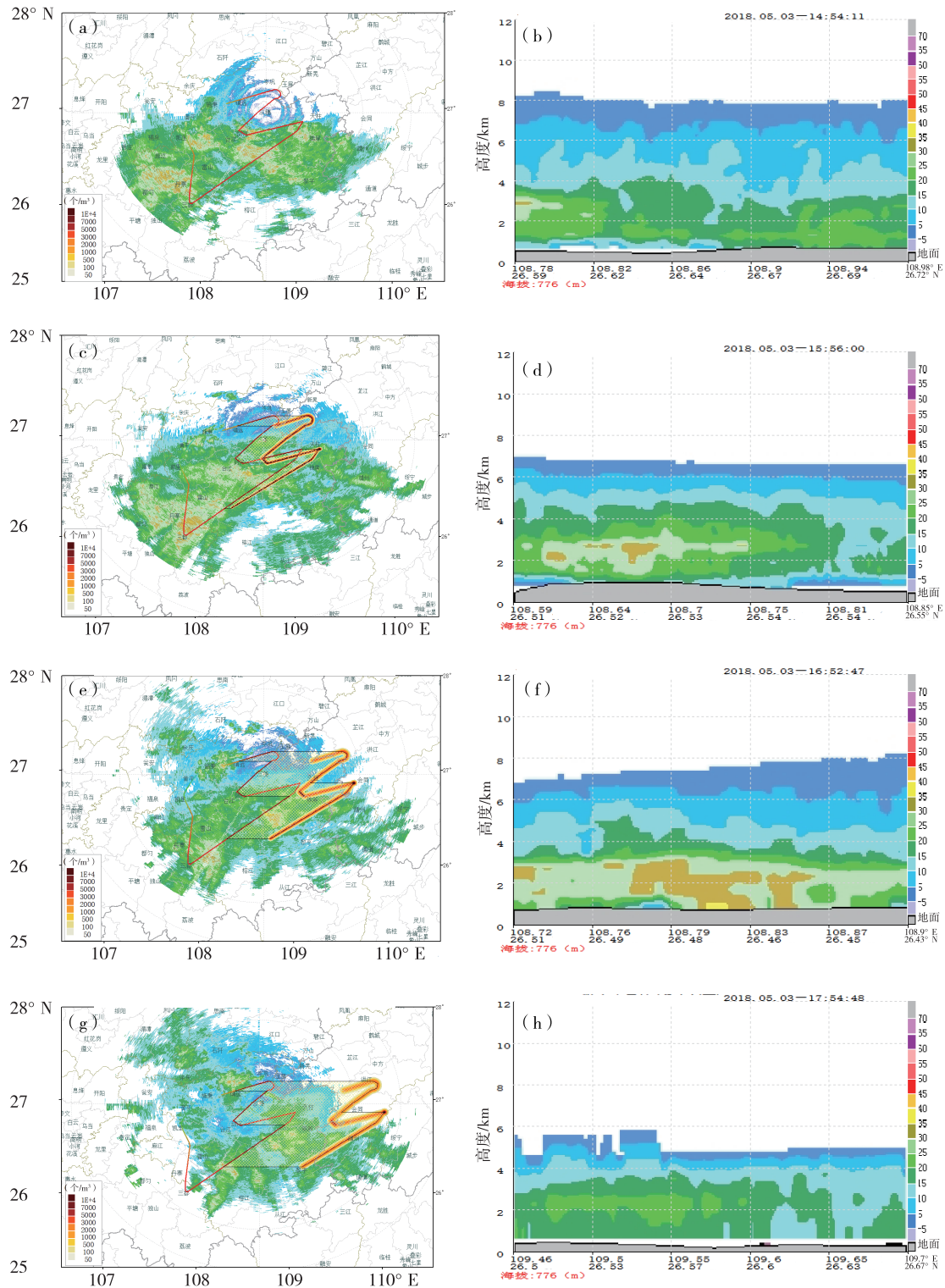


图 8 开始催化时(a,b)及催化后 1 h(c,d) 、2 h(e,f) 、3 h(g,h)
催化剂扩散传输与相应时刻雷达回波(平面、剖面)(网格表示催化剂影响区)
Fig.8 Radar wave (plane and section) of diffusion and transmission of catalyst at the beginning of catalysis(a,b)
and 1 hour(c,d) , 2 hours (e,f)and 3 hours (g,h)after catalysis(The grid represents the catalyst affected area)

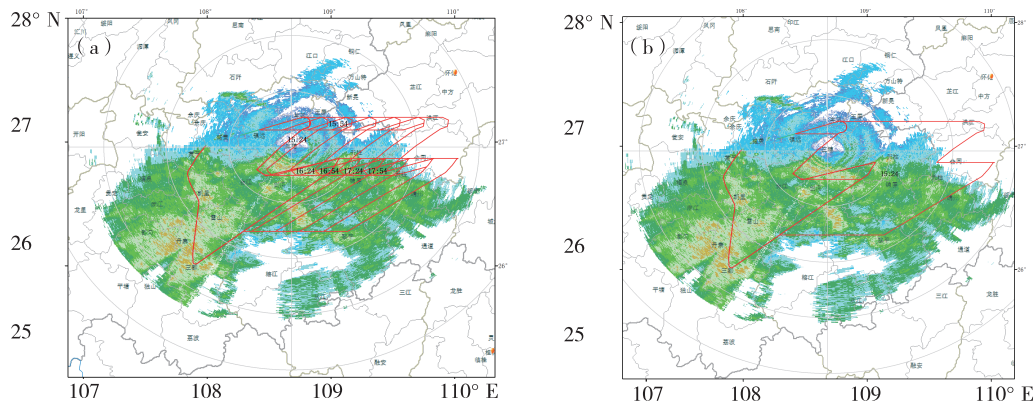


图 9 飞机增雨作业影响区(a. 分时段,b. 整个时段)
Fig. 9 Impact area of aircraft rain increase operation (a. divided period,b. whole period)

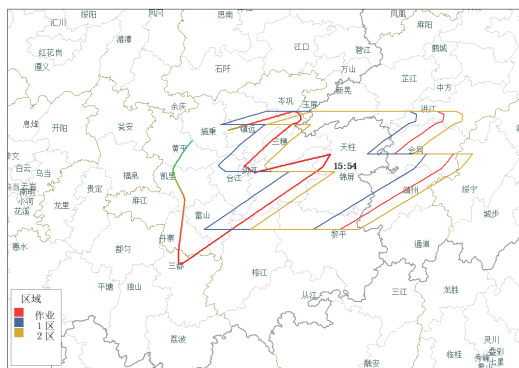


图 10 飞机增雨作业对比区划定
(红色框:影响区;蓝色框:对比 1 区;橙色框:对比 2 区)
Fig. 10 Delimitation of contrast area for aircraft precipitation enhancement(Red box;influence area; Blue box;contrast 1 area;Orange box;contrast area 2)

4.2 增雨效果检验

通过多参量动态对比方法对此次增雨作业后雷达、小时雨量进行物理检验,可以从图 11a 看出,雷达回波 K 值变化趋势为先增后减,开始作业后 30 min 到 2 h K 值逐步增加,2 h 达到最大值 1.89, 2 h 后降低,2 h 30 min 后 K 值低于 1,3 ~ 4 h 作业区和对比区雷达回波平均值明显降低,可能是超出雷达探测范围,因此把催化剂扩散采样时长设置为 3 h 较合理。地面小时雨量 K 值变化趋势(图 11b)亦为先增后减,作业后 1 ~ 2 h K 值逐步增加,2 h 达到最大值 5.8,2 ~ 3 h 有一个波动,因超出监测范围,扩散 3 h 后,作业区雨量平均值为 0。作业后作业区与对比区雷达回波和小时雨量动态 K 值呈先增加后减少的态势,物理响应明显。

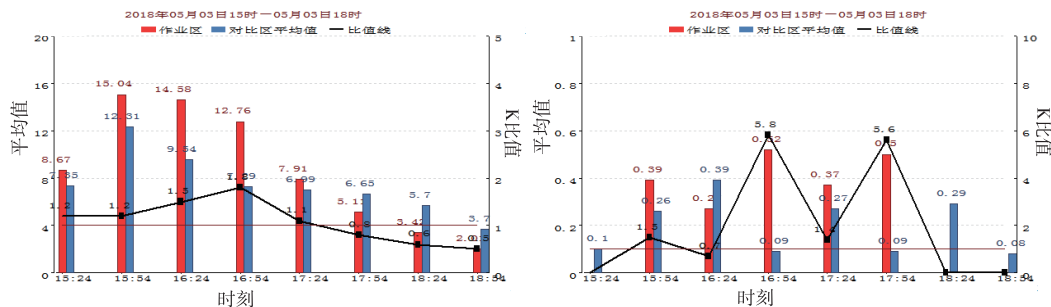


图 11 动态 K 比值(a. 雷达,b. 雨量)
Fig. 11 Dynamic K ratio (a. radar,b. rainfall)

5 结论

本文引进多参量动态对比法来检验 2018 年 5 月 3 日的一次飞机人工增雨作业效果,结论如下:
①针对 2018 年 5 月 3 日飞机增雨个例,开展作业合理性分析,经过分析可知此次作业高度较合

理,作业时机和部位合理,作业催化剂类型合理,因此可将此次个例用于多参量动态对比法来检验飞机增雨效果。
②通过探空资料及宏观记录,分析此次增雨作业目标云类型、移速、移向及催化作业后雷达回波(平面、剖面)的变化,可以得出催化剂的最佳催化

时间是在作业后 1~3 h,并把催化剂扩散采样时长设置为 3 h,通过催化扩散传输方案计算得到该次作业的影响区,

③根据催化扩散传输方案得到作业影响区,选取影响区垂直风向前后做对比区,通过多参量动态对比法分析,该个例雷达回波 K 值、地面小时雨量变化趋势均为先增后减,作业后有一定的效果,但因作业范围较大,雷达、自动站测量范围有限,雷达回波 K 值和此次个例地面小时雨量平均量在扩散 3 h 后降低明显直到 0。

通过上述分析研究,多参量动态对比方法可成功应用于贵州飞机增雨效果检验,但该效果检验方法还需要通过大量的个例来进行验证完善,形成更适用于贵州本地的飞机增雨效果检验方法,为科学开展飞机增雨效果检验分析提供更可靠、更有力地支撑。

参考文献

[1] 李大山,章澄昌,许焕斌,等. 人工影响天气现状与展望[M]. 北

京:气象出版社,2002:325-355.

- [2] 房彬,王吉宏,杨文霞. 人工增雨效果检验的研究进展[J]. 安徽农业科学,2010,38(13):6756-6758.
- [3] Hobbs, P. V. and A. L. Rangno. Comments on the Climax and Wolf Creek Pass Cloud Seeding experiments[J]. J. Appl. Met., 1979, 18(9):1233-1237.
- [4] Braham, R. R., Jr. and J. A. Flueck. Some result of the Whitetop experiment[J]. Preprints, Second National Conference on Weather Modification, 1970, April 6-9, 176-179.
- [5] Rangno, A. L. and P. V. Hobbs. A new look at the Israeli cloud seeding experiments[J]. J. Appl. Met., 1995, (34):1169-1193.
- [6] 曾光平,吴明林,林长城,等. 古田水库人工降雨效果的综合评价[J]. 应用气象学报,1993(2):154-161.
- [7] 贺艺,许弋,文继芬,等. 贵州省 2018 年 5 月 3 日飞机增雨作业个例分析[J]. 中低纬山地气象,2019,43(5):48-53.
- [8] 叶家东,范蓓芳. 人工影响天气的统计数学方法[M]. 北京:科学出版社,1982:264-336.
- [9] 李玮,汪丽,许弋,等. 2005 年 9 月贵州飞机人工增雨及效果评估[J]. 贵州气象,2007(3):40-42.
- [10] 周毓荃,朱冰. 高炮、火箭和飞机催化扩散规律和作业设计的研究[J]. 气象,2014,40(8):965-980.