

文章编号: 2096-1618(2017)02-0208-06

# 四川省春季一次飞机增雨作业个例分析

林丹

(1. 四川省人工影响天气办公室, 四川 成都 610072; 2. 高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室, 四川 成都 610072)

**摘要:**应用卫星反演产品、多普勒雷达资料、地面自动站资料等,采用统计和物理检验相结合的方法,针对2016年3月8日四川盆地的一次飞机增雨作业个例进行计算分析。结果表明,在有利的大尺度天气背景下,四川盆地水汽条件较好,云层较厚,具备作业天气条件。飞机增雨作业后,作业影响区的雷达、卫星、雨量等参数均有显著变化,区域内雨量增大,雷达回波强度增强,回波面积扩大,垂直累积液态水增加,卫星反演云顶温度降低,云顶高度升高,污染物浓度降低。作业对比区的降水不充分,且雷达、卫星等物理参数无显著规律变化。此次人工飞机增雨作业效果较好,有效缓解了干旱,改善了空气质量。

**关键词:**大气科学;人工增雨;效果检验

**中图分类号:**P481

**文献标志码:**A

**doi:**10.16836/j.cnki.jcuit.2017.02.015

## 0 引言

近年来,随着全球变暖,四川省干旱呈现多发、重发态势,再加之近些年,缺水日益严重,频繁出现的草场退化、地表水显著减少甚至断流、森林火灾频发以及空气污染、水环境污染等生态环境问题,对人工增雨的需求越来越大。人工增雨是在适当条件下,利用飞机、高炮等运载工具,在适当的时机向云体适当的部位播撒适当剂量的催化剂,提高自然云的降水效率,使地面降水量增加。过往针对人工增雨过程的分析,大部分研究者采用MICAPS资料和地面自动站点资料,随着卫星气象、雷达气象及各种人影专用探测仪器的发展,FY系列卫星反演产品<sup>[1-3]</sup>、机载探测<sup>[4-6]</sup>、雨滴谱、多普勒雷达<sup>[7]</sup>等多种资料被广泛应用,弥补了过往研究由于数据不足带来的影响。不同于地面作业,飞机作业在天气条件、空域、飞机性能等方面受到更多限制,如何选择作业区域和作业时段就显得非常重要<sup>[8]</sup>。例如,刘星光等<sup>[9]</sup>研究表明FY卫星反演的云参数产品可以用于指挥人工增雨作业,且对选择作业部位和检验催化效果有重要指导意义。余兴等<sup>[10]</sup>认为若采用碘化银作为冷云催化剂,理想的播云温度应保持在-10℃以下,高于-10℃时,增雨效果降低。

四川省人工影响天气工作开展已有50多年的历史,结合业务服务工作,在实践中不断改进作业方式和提高科技含量,从监测预报天气、设计作业方案、作业

效果评估等方面做了许多工作,也取得一些研究成果<sup>[11-14]</sup>。相较于北方人工增雨作业,南方增雨云系有些许差异。层状云是北方春季和秋季的主要降水云系,对于南方而言,除了以大范围层状云为主,还伴有对流性积状云,云中零度层高度相较北方云系略低,云顶高度更低,云中含水量更高。且历史研究表明,西南地区空中水资源丰富,降水转化率仅约11.6%,开发利用潜力大。但四川省对增雨作业方面的分析研究还比较欠缺,利用地面自动站、卫星反演、多普勒雷达等多种数据,计算分析2016年3月8日晚上的一次飞机人工增雨作业,对其作业效果进行初步检验。

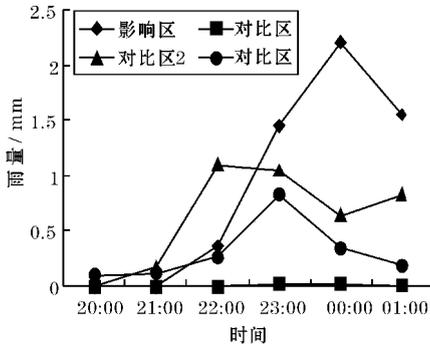
## 1 作业条件和情况

根据四川省气象台天气预报,随着500 hPa中高纬度地区横槽转竖东移,将引导北方冷空气南下,配合青藏高原短波的分裂东移,中低层有明显的风场辐合,低层湿度逐渐增大,700 hPa盆地有切变形成,850 hPa辐合风场稳定维持,将会给盆地带来一次降水过程。采用冰面相对湿度和水面相对湿度计算的云阈值法<sup>[16]</sup>,分析了3月8日08:00宜宾站上空云层垂直结构(图1),可知盆地南部上空0℃层约3300 m,-10℃层约5000 m左右,云底位于1500 m,云顶位于5000 m,云底较低,云层较厚。700 hPa风速约8 m/s,偏西风,云体移速缓慢,600 hPa以下湿度较大,水汽条件好。结合GRAPES模式预报,3月8日晚,四川盆地大部分地区有云系覆盖,盆地南部、中部、西部出现降水,云顶高度约9 km,云顶温度约-30℃。云降水物理学表明

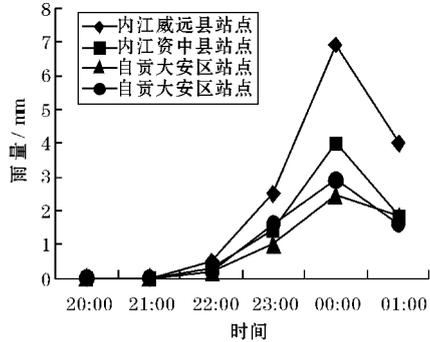
收稿日期:2016-09-06

基金项目:公益性行业专项资助项目(GYHY201406032);四川省气象局青年基金课题资助项目(川气课题2014-青年-05)





(a) 区域对比



(b) 站点对比

图3 雨量对比图

## 2.2 卫星参数

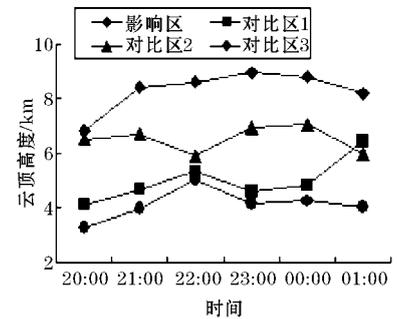
气象卫星监测可以了解云宏观特征,有助于了解云系发展程度、云中液水含量、冷暖云垂直结构配置等,因此已广泛应用在业务研究工作中<sup>[1]</sup>。由于这次飞机增雨作业发生在夜晚,导致液水路径、光学厚度等云参数产生较大误差,因此主要分析云顶高度和云顶温度的变化。图4为云顶高度和云顶温度随时间演变趋势图,按照图2所绘制的作业影响区和对比区,将各个区域内所有格点数值相加再取平均,分别得到作业影响区、对比区1、对比区2、对比区3的云顶高度和云顶温度。

基于过去大量观测事实基础上得到的统计规律,云顶温度低于大约 $-13\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的云中,冰存在的概率基本达到100%,温度为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C} \sim -40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,过冷水与冰晶共存,若选择适当的时机,在适当的部位播撒适当的催化剂,可以增加冰晶浓度,促进冰水转化,增加降水<sup>[15]</sup>。此次增雨作业,作业前的影响区云顶高度约7 km,云顶温度 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,播撒作业开始后,云顶高度呈现明显升高趋势,云顶温度呈现明显降低趋势,云系持续发展,作业后3 h的平均云顶高度约8.5 km,云顶温度约 $-37\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

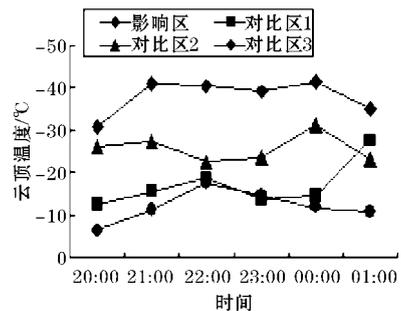
作业前,对比区1和对比区3的云顶高度和云顶温度的数值相当,分别为3~4 km和 $-8\text{ }^{\circ}\text{C} \sim -12\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,均显著低于影响区。作业中,对比区1和对比区3的

云参数变化趋势基本一致,云顶高度逐渐升高,云顶温度逐渐降低。作业结束后,对比区3的云顶高度从作业前的3.2 km升高至4.3 km,云顶温度从 $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 降至 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,随后,云顶高度逐渐降低,云顶温度逐渐升高。作业结束后,对比区1的云参数先逐渐减弱,在作业3 h后出现跃增,云顶高度和云顶温度均达到峰值,对比卫星云参数图发现,这可能是由于区域内有新的云团开始生成发展。作业前,对比区2的云顶高度和云顶温度与作业影响区数值相当,表明最初对比区2的云层发展状态与影响区最接近。播撒作业开始后,云顶温度和云顶高度呈先减弱后加强再减弱趋势,作业后3 h的平均云顶温度和云顶高度分别约为 $-26\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和6.7 km。对比卫星云参数图发现,云顶温度和云顶高度在22时的明显减弱是由于发展的云团已经移出对比区2的区域,随着新的云团发展,云顶高度又逐渐增加,云顶温度逐渐降低。

综上,作业影响区在播撒作业后,云顶高度升高,云顶温度降低。对比区的云顶温度在播撒作业后高于影响区,云顶高度低于影响区,且变化趋势相反,与作业影响区呈现鲜明对比。



(a) 云顶高度



(b) 云顶温度

图4 卫星反演云参数对比图

## 2.3 雷达

雷达回波强度、回波面积、回波顶高、液态水含量等特征参数的演变,可以作为物理证据用来检验作业效果<sup>[7]</sup>。图5为21:30~00:30多普勒雷达观测资料,其中A为雷达组合反射率,B为垂直累积液态水。播

撒作业时,内江市回波强度大多在15 dBZ,自贡市回波强度略高,高值区可达35 dBZ。从垂直累积液态水含量来看,播撒作业时,内江和自贡市已监测到有液态水含量,大值区约为 $5 \sim 10 \text{ kg/m}^2$ ,具备了人工增雨作业条件。作业后,回波强度和覆盖范围增加,回波不断发展,22:30内江和自贡市的回波强度在 $15 \sim 35 \text{ dBZ}$ 。到23:30,自贡市雷达回波略微减弱,内江市雷达回波大值区范围更大,大部分回波强度已达到 $30 \text{ dBZ}$ 。到00:30,内江市回波大值区东移,自贡市回波持续减弱,回波强度在 $5 \sim 15 \text{ dBZ}$ ,云团已经开始逐渐消散。与雷达回波的变化趋势一致,液态水含量在作业1 h后明显增加,整个内江和自贡市上空均含有丰富的液态水,大部分区域液态水含量已达 $5 \text{ kg/m}^2$ 。到23:30,内江市液态水含量继续加大,个别地区液态水含量已达到 $20 \text{ kg/m}^2$ ,自贡市的液态水含量略有减少。到00:30,雷达回波东移,作业影响区液态水含量减少。

总的来说,对比区的雷达回波和垂直累积液态水含量在作业后均呈逐渐减少趋势。与雨量对比来看,雷达参数变化与雨量变化响应较好。对比区1的雷达回波最弱,大部分地区均无雷达回波,对应的雨量在整个

作业过程中无变化,且小于 $0.1 \text{ mm}$ 。对比区2在播撒作业时已全部被雷达回波覆盖,区域内垂直累积液态水含量较高,大值区可达 $5 \sim 10 \text{ kg/m}^2$ ,对应的雨量雨量在作业时高于影响区。

廖向花等<sup>[7]</sup>对人工增雨作业的分析研究表明,层状云的降水回波强度一般在 $15 \sim 35 \text{ dBZ}$ ,大片层状云或层积云降水都会出现明显的“零度层”亮带。为了更好地分析作业影响区的雷达回波参数变化,将作业影响区域内的回波强度按照5档( $15 \sim 20 \text{ dBZ}$ ,  $20 \sim 25 \text{ dBZ}$ ,  $25 \sim 30 \text{ dBZ}$ ,  $30 \sim 35 \text{ dBZ}$ , 大于 $35 \text{ dBZ}$ )分类,分别统计回波面积(表1)。可以看到,作业后, $15 \sim 20 \text{ dBZ}$ ,  $20 \sim 25 \text{ dBZ}$ 两档的回波面积呈现先增大后减少的趋势; $25 \sim 30 \text{ dBZ}$ ,  $30 \sim 35 \text{ dBZ}$ 和大于 $35 \text{ dBZ}$ 三档的回波面积在作业后持续增大2 h,随后减少,与雨量对应较好,均在作业后2 h达到峰值。 $30 \sim 35 \text{ dBZ}$ 和大于 $35 \text{ dBZ}$ 的回波面积变化最显著,作业中回波面积分别约为 $465 \text{ km}^2$ 和 $168 \text{ km}^2$ ,作业后2 h的回波面积达到 $1265 \text{ km}^2$ 和 $475 \text{ km}^2$ ,回波范围增大,约为作业中的3倍。比较可知,作业后,回波强度增强,回波面积增加。

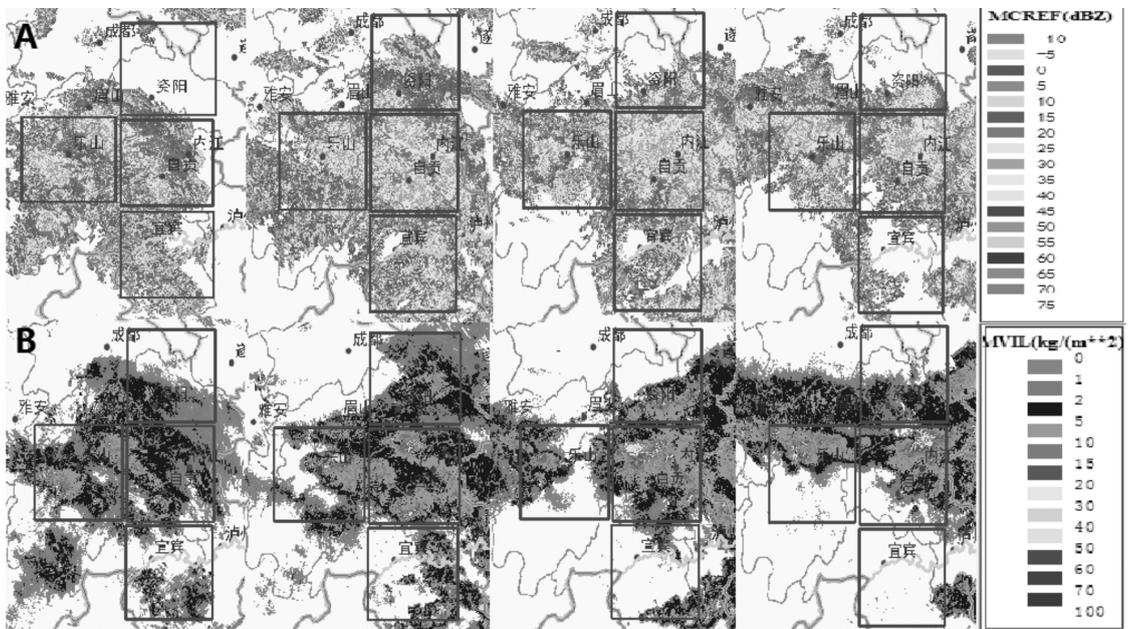


图5 多普勒雷达参数演变图

表1 作业影响区内不同回波强度的面积变化/ $\text{km}^2$

强度/dBZ 时间	15 ~ 20	20 ~ 25	25 ~ 30	30 ~ 35	>35
21:30	1023	1657	1229	463	168
22:30	1441	1801	1566	893	308
23:30	909	1526	1962	1266	475
00:30	932	1167	1297	778	349

## 2.4 气溶胶

从气溶胶质量浓度来看,大气中的气溶胶浓度不仅与污染源有关,气象条件例如降雨、风速、相对湿度等对污染物浓度变化也有重要影响<sup>[17]</sup>。此次作业,作业前,自贡PM10和PM2.5浓度分别约为 $110 \text{ ug/m}^3$ 和 $60 \text{ ug/m}^3$ ,内江PM10和PM2.5浓度分别约为 $50 \text{ ug/m}^3$ 和 $30 \text{ ug/m}^3$ ,自贡空气污染更严重。播撒作业后,随时

间推移,气溶胶浓度逐渐减少,作业3 h后气溶胶浓度降至最低点。作业3 h后,自贡PM10和PM2.5浓度分别降至40  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 和20  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,内江PM10和PM2.5浓度分别降至30  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 和15  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。比较而言,自贡气溶胶PM10和PM2.5浓度在作业后均降低明显,仅为作业前浓度的1/3,内江作业后的气溶胶PM10和PM2.5浓度仅为作业前的一半。受降雨影响,气溶胶浓度降低明显,空气质量好转,据成都环境监测中心站显示,3月9日凌晨,自贡和内江市空气质量指数达到优。

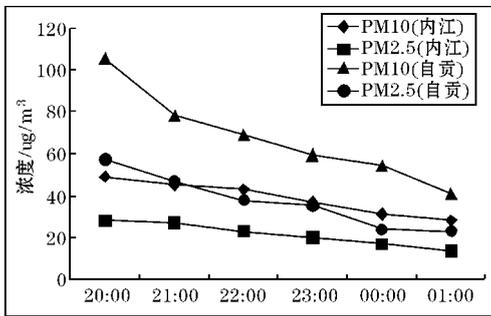


图6 气溶胶粒子浓度变化图

### 3 结论

开展人工增雨作业可以有效增加地面降水量、缓解干旱和改善生态环境,而作业时机和作业云区的选择是影响人工增雨效果的关键<sup>[9]</sup>。从此次作业来看,根据天气和数值模式预报表明,3月8日晚上四川省将会出现一次降水天气过程,四川省人工影响天气办公室密切关注天气,协调空管等部门,组织实施了飞机人工增雨作业。作业前,作业区的云顶温度 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,云顶高度7 km,云层较厚,含有丰富的过冷水,适合进行飞机增雨作业。作业后,云顶高度升高至8.5 km,云顶温度降低至 $-37\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,云系继续发展,雷达回波强度和面积明显增大,区域雨量由持续增加至2.2 mm,气溶胶污染物浓度降低。而较作业区而言,对比区雨量、卫星等参数变化无明显规律。总的来说,催化作业区域和时机的选择是基本合理的,催化效果比较显著。

但是,由于受到空域、机场保障等客观条件限制,最后批准的飞机播撒作业时间和航线与最初理想的飞机作业方案设计有出入,对作业效果造成一定影响。其次,云中内部结构变化复杂,四川省没有机载探测仪器,无法获得云中微物理量的变化,加上四川省飞机作业大多发生在夜间,缺少液水路径、光学厚度等卫星反演产品的云宏观物理量计算分析,制约了作业效果的检验深度。今后的研究中会加入更多数据资料的计

算,利用多种分析手段,让飞机增雨个例分析更具有科学性。

### 参考文献:

- [1] 杨道侠,张蔷.利用卫星反演云参量分析一次人工消(减)雨作业过程[J].气象,2008,34(专刊):179-184.
- [2] 徐诚,肖天贵.利用FY-2E卫星资料对川西一次强降水过程成因分析[J].成都信息工程学院学报,2015,30(5):481-490.
- [3] 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.
- [4] 庞朝云.一次飞机积冰条件下的云粒子结构分析[J].成都信息工程学院学报,2011,26(6):702-706.
- [5] 周德平,宫福久,高建春,等.一次飞机播云的微物理效应分析[J].气象科学,2004,24(4):405-412.
- [6] 王扬锋,雷恒池,樊鹏,等.一次延安层状云微物理结构特征及降水机制研究[J].高原气象,2007,26(2):388-395.
- [7] 廖向花,张逸轩,陈小敏,等.重庆一次典型飞机人工增雨作业的效果分析[J].西南师范大学学报(自然科学版),2014,39(9):156-163.
- [8] 杨敏,鲍向东,马鑫鑫,等.2010年3月14日河南省飞机增雨作业效果分析[J].气象与环境科学,2012,35(增刊):1-6.
- [9] 刘星光,李鹏,单良.FY-2C卫星反演云参数产品在一次飞机增雨作业中的应用[J].黑龙江气象,2008,25(3):23-24.
- [10] 余兴,戴进.层状云中飞机人工增雨作业间距的研究[J].大气科学,2005,29(3):465-474.
- [11] 余芳,郝克俊,张世林,等.四川省人工影响天气工作推进措施及成效[J].现代农业科技,2011,23:46-48.
- [12] 耿蔚.四川省人工影响天气业务系统功能[J].高原山地气象研究,2012,32(2):91-94.
- [13] 林丹,王维佳.一次飞机增雨作业的云参数变化响应分析[J].高原山地气象研究,2015,35(1):67-73.
- [14] 张元,刘建西,刘晓璐,等.2013年四川省飞机增雨作业典型个例分析[J].成都信息工程学院学报,2015,30(2):192-198.

- [15] 杨军,陈宝军,银燕,等.云降水物理学[M].北京:气象出版社,2011:86-87.
- [16] 周毓荃,欧建军.利用探空数据分析云垂直结构的方法及其应用研究[J].气象,2010,36(11):50-58.
- [17] 叶家东,范蓓芬.人工影响天气的统计数学方法[M].北京:科学出版社,1982:264-336.
- [18] 程月,徐学义,苗长忠,等.人工增雨效果检验中影响区和对比区选择的探讨[J].山东气象,2012,32(4):21-27.
- [19] 汤天然,陈建楠,李广前,等.降雨对PM<sub>2.5</sub>浓度的影响及人工降雨降低PM<sub>2.5</sub>浓度的探讨[J].贵州气象,2013,37(4):35-37.

## Case Study of Aircraft Precipitation Enhancement in Spring in Sichuan Province

LIN Dan

(1. Weather Modification Office of Sichuan Province, Chengdu 610072, China; 2. Heavy Rain and Drought-Flood Disasters in Plateau and Basin Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610072, China)

**Abstract:** Based on satellite-derived products, doppler radar data and automatic station data, the aircraft precipitation enhancement in Sichuan basin on March 8, 2016 was analyzed by using statistical and physical testing method in this paper. The results showed that under favorable large-scale weather background, the moisture conditions were good with thick cloud, the weather conditions were suitable for aircraft precipitation enhancement. After operation, radar, satellite, precipitation and other parameters had obvious changes. Radar echo intensity enhanced, echo area expanded, vertically integrated liquid grew, cloud top temperature fell, cloud top height increased, precipitation increased and the concentration of pollutants reduced. There were no significant regular changes in contrast area with inadequate rainfall. The effect of this operation was good. This aircraft precipitation enhancement effectively alleviated the drought and improved air quality.

**Keywords:** aircraft precipitation enhancement; operation impact; physical testing