

文章编号: 2096-1618(2020)01-0117-06

四川盆地初夏一次飞机增雨作业的效果检验

林 丹^{1,2}, 王维佳^{3,4}

(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; 3. 成都市气象局, 四川 成都 611133; 4. 中国气象局云雾物理环境重点开放实验室, 北京 100081)

摘要:针对2018年6月11日四川盆地一次飞机人工增雨作业过程,采用地面自动站数据、FY4A卫星云参数产品和多普勒雷达产品等多种资料,使用统计检验和物理检验相结合的方法,分析了作业效果。区域历史回归分析结果表明,作业影响区和对比区相关性较好,绝对增雨量1.64 mm,相对增雨率约20%。物理检验结果表明,作业后影响区雨量明显增加,增加量超过1 mm,雷达回波强度增强,回波面积扩大,云有效粒子半径从17 μm 增长至24 μm ,云液水含量有所消耗,雷达回波和卫星云参数变化均能反应出人工增雨催化后的物理变化。

关键词:大气物理; 云降水; 人工增雨; 统计检验; 物理检验

中图分类号: P481

文献标志码: A

doi: 10.16836/j.cnki.jcuit.2020.01.016

0 引言

人工增雨是通过飞机、地面燃烧炉等运载工具向云中播撒催化剂,促进云水向降雨转化的过程,提高自然云的降雨效率,增加地面降雨量。自1958年中国实施首次飞机人工增雨,经过60年的发展,人工影响天气已经从单一的防灾减灾向趋利避害、改善生态环境等方面转型拓展,成为国家重要生态保护区域、重要水源地等生态治理和水源补给的重要举措。近年来,极端天气发生频繁,对人工影响天气的需求越来越大^[1]。在人工影响天气业务中,由于云和降水存在巨大的自然变率以及评估对象存在巨大的不确定性,导致对增雨作业效果的检验一直是个世界性难题^[2]。常用的检验方式有统计检验、物理检验和数值检验。统计检验是人工增雨作业效果检验的基本方法,受到多种因子的综合作用,得到客观、定量的结果比较困难^[3]。对于随机试验,王以琳等^[4]提出以雷达回波移向轴线确定火箭人工增雨目标区和对比区的方法,放宽了对作业目标云移动方向的要求。而对于业务作业项目的效果评估,蒋年冲等^[5]、贾玲等^[6]利用双比分析、区域历史回归分析等统计检验方法对增雨作业进行了研究,探索了统计方案的可行性。随着气象卫星、多普勒雷达等探测设备的发展,为效果评估的物理检验提供了更多的数据支撑。唐仁茂等^[7]利用X波段双偏振雷达资料,对湖北省4次外场试验作业进行了

物理检验。刘星光等^[8]采用风云气象卫星资料,比较分析了作业前后云顶温度、云顶高度和云粒子有效半径的变化趋势。刘贵华等^[9]选取陕西地形云降水过程,用极轨卫星资料分析了云降水的物理结构。李德俊等^[10]利用雨滴谱、GPS/MET水汽、多普勒雷达和地面分钟雨量观测资料分析了武汉一次对流云火箭人工增雨的作业效果。

随着科技的发展,四川省人工增雨作业的科技水平有了进一步的提升,在监测作业条件、作业方案设计、跟踪实施作业和作业效果评估上做了许多工作,也得到些有意义的研究结论^[11-13],但对作业效果检验方面的工作还有所欠缺。选取2018年6月11日四川盆地南部一次飞机人工增雨作业,对其作业效果进行初步检验,寻找增雨作业效果的物理证据。

1 天气过程

2018年6月11日,受西风多波动气流影响,配合水汽输送,四川省大部分地区出现一次降水过程。从6月11日08时宜宾站探空资料表明,0℃层和-10℃层分别位于约5 km和7 km左右的高度,相对湿度较大,500 hPa为西南风,风速约为10 m/s。理论研究表明在0℃~-10℃,云粒子以液态为主,温度更低时,云内存在冰晶的概率随温度下降而升高,过冷却水滴和冰晶常同时存在。当云顶温度处于-10℃~-24℃时是冷云播云的有效温度窗,而碘化银烟条至少要达到-4℃才会起到催化作用。四川省云顶温度普遍偏高,一般在-4℃~-10℃进行播撒作业,飞机增雨作

收稿日期: 2019-03-11

基金项目:四川省应用基础研究计划资助项目(2019YJ0621);四川省留学回国人员科技活动择优资助项目(2018-72);高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室科技发展基金资助项目(省重点实验室2018-重点-13、省重点实验室2018-青年-19和SQCXKJQN2019025)

业高度大约 5~6 km。结合 14 时卫星反演云顶高度和云顶温度,四川盆地南部大部分地区云顶温度 -4°C ~ -15°C ,云顶高度 5~8 km,云顶温度符合播云有效温度窗,云顶高度适合作业飞行高度,此次云层条件满足人工增雨飞机作业要求。

2 飞机人工增雨作业情况

2018 年 6 月 11 日 15:10~18:10 在四川盆地南部进行了飞机人工增雨作业,作业飞机为夏延,采用碘化银烟条作为催化剂,共计 20 根。作业飞机于 15:40 开始播撒,17:00 结束播撒,播撒时间 90 min,大约间隔 10 min 播撒 2 根碘化银烟条。作业飞机采用“S”路线,在自贡、内江和宜宾上空进行作业,作业航迹如图 3。根据飞机作业空中观测记录,作业飞机飞行高度 5300~5600 m,作业层高度 -6°C ~ -9°C ,高空风速约 12 m/s,风向为西南风。

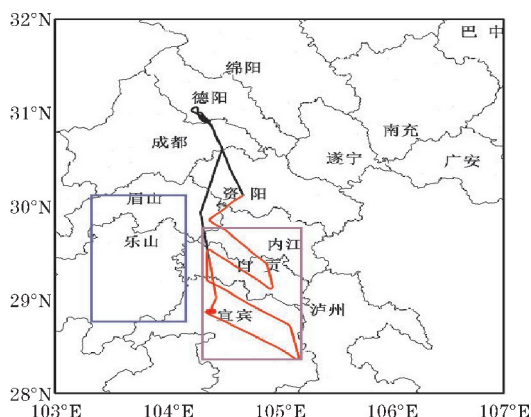


图1 飞行播撒轨迹(红色段)

3 效果检验

现在业务中常使用的人工增雨作业效果检验方法有 3 种,分别为统计检验、物理检验和数值模拟检验。统计检验主要关注的是降水量,定量检验作业效果和其显著性水平。物理检验主要分析作业前后卫星、雷达等参数的变化特征,定性或定量分析作业效果。数值模拟检验是通过云和降水过程以及人工催化增雨过程的数值模式,定量预报催化与不催化情况下,云的发展和降水量,并与实测结果比较,从而判断作业效果。对于此次飞机作业,主要采用统计检验和物理检验两种方法。

3.1 作业影响区 and 对比区

图 1 紫色框内为作业影响区,蓝色框内为对比区,

作业影响区和对比区面积大小一致,作业影响区和对比区之间间隔约 20 km。对比区的选择遵循三大原则:一是对比区和作业影响区地形地貌相似,两个区域均位于四川盆地,平均海拔约 500 m;二是对比区不受催化剂影响,当天风向为西南风,催化剂会随着风向向东北方扩散,故选择作业影响区横测左边区域;三是对比区和作业影响区受同一系统影响,根据天气预报,四川盆地受到西风多波动气流影响,配合水汽输送带来降水。

3.2 统计检验

区域历史回归法是根据历史资料建立作业影响区和对比区的历史回归方程,通过回归方程,由对比区的雨量求出作业影响区的雨量估计值,与作业影响区实测雨量比较,获得作业区雨量增加值^[14-15]。对于人工增雨作业统计检验而言,由于受到不同下垫面影响,且历史样本数和作业样本数也会影响到增雨评估准确度,区域历史回归分析法是统计检验方法中所需作业样本数较少并且在统计检验效果中准确度较高的一种,在业务工作中被广泛应用。

选择 1960~2000 年 6 月的逐日雨量作为历史资料,此阶段还未大范围开展人工增雨作业,雨量样本未受增雨作业影响。作业影响区包含富顺、荣县等 20 个国家基本气象站,对比区包含峨眉、洪雅等 18 个国家基本气象站。对作业影响区和对比区的历史资料进行区域平均,计算作业影响区和对比区的雨量相关系数^[16]。公式如下:

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

其中作业影响区和对比区日平均雨量分别为 \bar{x} 和 \bar{y} , x_i 和 y_i 为该区域历史雨量, n 为历史样本数,计算得出相关系数 $r=0.82$,相关系数高,认为对比区的选择是合理的。

利用区域历史回归统计检验方法进行统计分析时要求统计变量满足正态分布,用柯尔莫哥洛夫定理分别对作业影响区和对比区的区域平均雨量进行正态分布的拟合度检验^[17],进行 4 次方根后,得到作业影响区和对比区 m 值分别为 1.03 和 1.05, m 值均小于 1.36,认为“统计变量近似服从正态分布”。然后采用最小二乘法建立一元线性回归方程: $y=a+bx$, 其中 x 为对比区雨量, y 为作业影响区雨量, a 和 b 为系数。由于历史回归法主要选择日雨量进行比较,因此代入作业期间 6 月 10 日 20 时~11 日 20 时雨量,计算绝对增雨量和相对增雨率,公式如下:

绝对增雨量: $O=y_2-y_1$,其中 y_2 为作业期间作业影响区的实测降水量, y_1 为作业期间作业影响区自然降水的估计值。相对增雨率: $R=\left(\frac{y_2}{y_1}-1\right)\times 100\%$ 。

表 1 历史回归分析评估结果

回归方程	相关系数	绝对增雨/mm	相对增雨/%
$Y=0.02+0.99x$	0.84	1.64	19.82

从表 1 中得出,对比区和作业影响区相关性较好,相对增雨量19.82%,绝对增雨量1.64 mm。

3.3 物理检验

物理检验是人工影响天气作业效果评估中重要的一个环节,可以为效果评估提供相应的物理学证据,证实催化效果。此次飞机人工增雨作业主要利用雨量、雷达和卫星资料进行作业前、中、后各项物理参数变化的检验,同时结合空气质量改善情况。考虑飞行作业时的风速和风向确定作业影响区的移动位置。高空风速约12 m/s,风向为西南风,按照云团移速12 m/s,经过计算可知相当于纬向和经向分别移动约0.2 °/h。作业播撒时间为15:30–17:00,因此将 15 时作为播撒前时段,16 时作为播撒中时段,17–20 时作为播撒后时段,从 17 时开始,按照0.2 °/h移动的作业影响区。

3.3.1 雨量

雨量是检验人工增雨作业效果的重要物理量之一。通过遵照移动方向和速度,计算不同时段不同作业影响区域内的所有站点的雨量平均值,得到了15–20 时的雨量变化趋势,同时计算了对比区雨量,绘制了雨量变化趋势图(图 2)。从图中可见,作业前目标区已经开始降水,约0.4 mm,播撒作业中雨量增加到接近 1 mm,作业后雨量持续逐渐增加,从1 mm增长至 20 时的约2 mm,作业后雨量达到最高值2.3 mm,作业后的雨量明显高于作业前。与对比区雨量比较,对比区在作业前已有降水,且对比区和作业影响区雨量相当,根据天气形势分析,两个区域被同一天气系统影响。对比区雨量从 17 时开始逐渐增加,但雨量的增加量低于作业影响区,且 18–20 时雨量无明显变化,维持在 1.4 mm左右。从雨量来看,此次飞机人工增雨作业效果明显。

除了统计分析区域雨量以外,考虑单个站点雨量的变化趋势。分别选取宜宾和自贡的 4 个站点,绘制雨量演变图(图 3)。从图中可见,宜宾和自贡的作业站点均在作业开始前已有降水,雨量较小,低于 0.5 mm,播撒作业开始后雨量有了明显增加。17–20 时,各个站点雨量均持续增加。20 时长宁县和南溪县

雨量超过2 mm,富顺县雨量达到3 mm,大安区雨量变化幅度较小,17–20 时的雨量约接近1 mm。从雨量增加量来看,宜宾市两站点的雨量增加较大,分别从作业前的0.1 mm和0.3 mm,增加至作业后的2.1 mm和 2.4 mm。

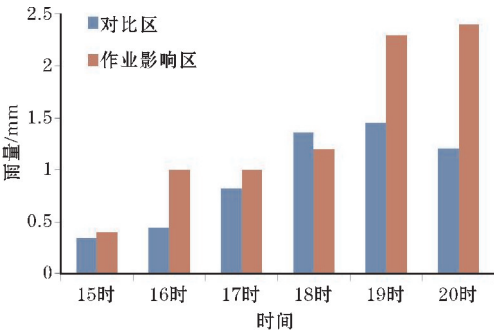


图 2 区域雨量变化图

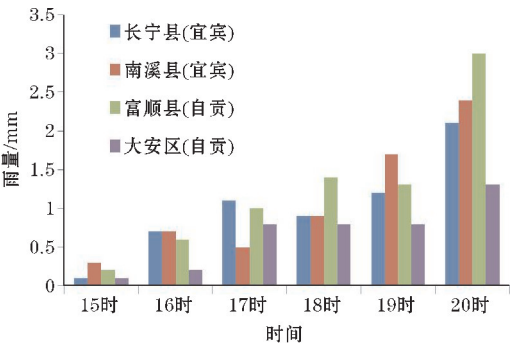


图 3 站点雨量变化图

为更直观地比较这次降水过程,绘制了雨量演变图,图 4 和图 5 分别为作业前 2018 年 6 月 11 日 10–15 时和作业后 16–21 时的 6 h 累积雨量图。从图中可知,作业前 6 h,降水天气系统已开始影响四川盆地,盆地中部资阳和遂宁地区累积雨量超过 25 mm,盆地南部部分地区有小雨。作业后 6 h,盆地南部、攀西地区北部和川西高原部分地区雨势较大。盆地南部大部分地区累积雨量约 10 mm,其中播撒作业区域里的宜宾、自贡和内江等地,最大累积雨量超过 25 mm。

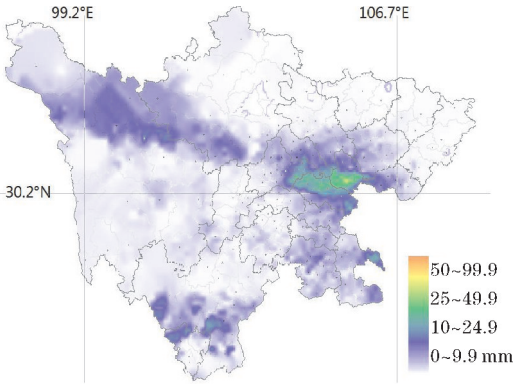


图 4 2018 年 6 月 11 日 10–15 时雨量图

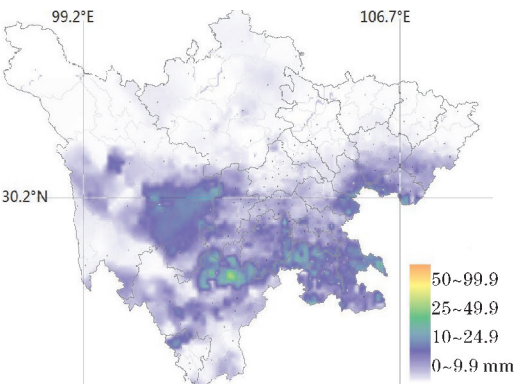


图5 2018年6月11日16~21时雨量图

3.3.2 雷达

随着新一代天气雷达的广泛应用,回波分析广泛应用在天气预报、人工影响天气等气象业务上。层状云连续性降水一般出现片状回波,零度层亮带是层状云或层积云降水回波的主要特征,雷达回波强度介于15~35 dBZ,最强可达45 dBZ^[18]。为了更明显地分析作业后17~20时雷达回波参数的变化,通过遵照移动方向和速度,统计作业后影响区域内不同雷达回波强度的面积(表2),并将雷达回波强度分为了4档(0~10 dBZ,10~20 dBZ,20~30 dBZ,>30 dBZ)。从表中可知,作业后0~10 dBZ和10~20 dBZ两档的回波面积逐渐减少,特别是回波强度介于0~10 dBZ的面积由1727 km²降为103 km²,而20~30 dBZ和>30 dBZ两档的回波面积出现逐渐增加趋势,20~30 dBZ的回波面积由1366 km²增长为3512 km²,>30 dBZ的强回波面积由19 km²增长为456 km²。从雷达回波来看,作业后雷达回波变化显著,强回波面积明显持续增加,回波强度加大,且与区域雨量变化趋势对应较好,均在20时达到最强。

表2 作业后雷达回波面积统计					km ²
时间	0~10 dBZ	10~20 dBZ	20~30 dBZ	>30 dBZ	
17时	1727	5013	1366	19	
18时	955	4520	1689	73	
19时	375	4003	2685	292	
20时	103	3172	3512	456	

3.3.3 卫星

气象卫星可以探测云的宏微观特征,获取云水含量、粒子有效半径等云参数,有助于了解云系的发展情况^[19]。风云四号卫星于2016年底发射,相比风云二号卫星,具备了更多的探测波段和观测模式,提升了时间和空间分辨率,新增了云光学厚度、云液态水含量、云相态、云顶气压等产品。由于此次飞机增雨作业结束时间已为傍晚,可见光的缺失导致云液水含量、云光学厚度和云有效粒子半径数据的缺失,故只能采用

15~17时的云参数图(空间范围28°N~32°N、102.5°E~106.5°E)。经比较发现,云光学厚度在这个时间段没有明显变化趋势,云光学厚度受到大气热力条件、水汽条件、环流场等多种因素的影响^[20],多种影响因子共同作用,可能是造成云光学厚度短时间内没有明显变化的原因之一。

从理论上讲,采用碘化银烟条作为冷云催化剂,在云内制造适量的冰晶,产生冰晶效应,改变云内的微物理过程,使水滴不断蒸发,冰晶不断增长,加快冰水转换过程,提高降水效率。从云有效粒子半径和云液水含量变化图(图6)中可以看到,作业前的15时,播撒作业区内云液水含量图色调偏白,云液水含量较多,约170 g/m²,云有效粒子半径图色调深蓝,云有效粒子半径约17 μm,Rosenfeld^[21]等研究发现,当云有效粒子半径大于14 μm时,是云中产生降水的阈值,说明15时云中已经开始形成了降水粒子。播撒作业开始后,云液水含量开始减少,云有效粒子半径开始增大,至17时,云液水含量图色调偏黄,云液水含量减少为约40 g/m²,云有效粒子半径图色调浅蓝,云粒子有效半径增加为约24 μm,此时云系持续发展,由于人工催化影响,冰水转换速度加快,液水含量显著降低,冰粒子不断长大,云顶开始冰晶化。从云有效粒子半径和云液水含量的变化趋势来看,此次播撒作业改变了云的微物理结构,增加了冰晶浓度,促进了冰水转换。

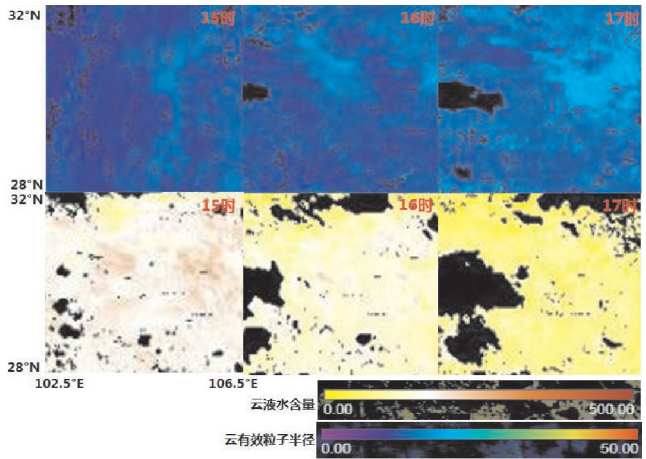


图6 云液水含量和云粒子有效半径参数图

3.3.4 空气质量

气溶胶质量浓度与气象条件相关,例如风速、降水等,降水可以达到清除气溶胶颗粒物的效果,降水开始前若气溶胶颗粒物浓度较高,降水对其有明显的降低效果^[22]。周彬等^[22]提出当雨量低于1 mm,降水对PM_{2.5}没有清除作用,雨量介于1~9.9 mm,降水对PM_{2.5}的降低效果显著提升,而降水持续时间介于2~5 h,降水对气溶胶颗粒物有较好的清除效果。空气质量的转变是

个连续缓慢的过程,选取 15–22 时,作业播撒区域内宜宾石马和沙坪 2 个站点,分别计算了空气质量指数(AQI)、可吸入颗粒物(PM_{10})和细颗粒物浓度($PM_{2.5}$) (图 7)。从图中可知,随时间推移,15–22 时空气质量指数和气溶胶颗粒物浓度整体呈持续减少趋势,在 17 时变化更为明显,其中空气质量指数有显著降低。与 $PM_{2.5}$ 相比, PM_{10} 的降幅更大,分别由 15 时的 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$,降低为 17 时的 $55 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$,空气质量指数分别由 15 时的 80 和 55 降低为 17 时的 55 和 40。之后持续下降,22 时达到最低点,此时空气质量指数降到 40,气溶胶颗粒物浓度 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 分别降到约 $32 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $18 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。总的来说,播撒作业后污染物浓度降低,空气质量得到改善,空气质量指数达到优。

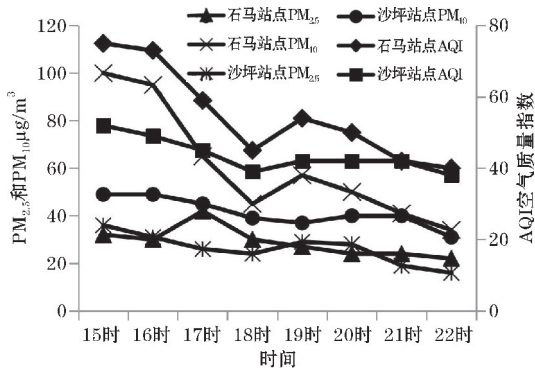


图7 空气质量指数和颗粒物浓度变化图

4 结论与讨论

2018 年 6 月 11 日在四川盆地南部实施的一次飞机增雨作业,从统计检验来看,经过区域历史回归分析得到,对比区和作业影响区相关性较好,相关系数超过 0.8,相对增雨量 19.82%,绝对增雨量 1.64 mm。从物理检验来看,(1)按照高空风速 12 m/s 移动作业影响区,计算可知作业影响区雨量在催化作业后持续增加,20 时雨量达到最高值,作业后的雨量明显高于作业前。(2)雷达回波强度在作业后加强,20 ~ 30 dBZ 和 >30 dBZ 两档的回波面积出现持续逐渐增加趋势,与雨量匹配较好,均在 20 时达到最强。(3)催化作业开始后,云有效粒子半径和云液水含量变化显著,催化后云有效粒子半径呈明显增大趋势,液水含量呈明显下降趋势,可以认为催化作业后,加快了冰水转换,冰晶凝华增长导致液水快速消耗,与降水机制吻合,表明催化作业有效。

综上,此次飞机人工增雨作业效果较好,增加了降水并改善了空气质量。但由于四川省缺少机载探测设

备,欠缺对云中微物理量的分析以及对云系结构发展的分析,制约了作业效果检验的深度。今后研究中会加入地面微波辐射计、雨滴谱仪等更多探测设备数据,采用更多的分析比较方法,更为全面科学的进行飞机增雨作业效果检验。

致谢:感谢成都市科技项目(2018-ZM01-00038-SN)对本文的资助

参考文献:

- [1] 李鹏,高倩楠,鲍磊.春季一次飞机增雨的效果评估[C].第32届中国气象学会年会,2015.
- [2] 李大山.人工影响天气现状与展望[M].北京:气象出版社,2001.
- [3] 郭学良.大气物理与人工影响天气[M].北京:气象出版社,2010.
- [4] 王以琳,王俊.地面人工增雨随机试验方法的探讨[J].干旱气象,2015,33(5):756–760.
- [5] 蒋年冲,曾光平,袁野,等.夏季对流云人工增雨效果评价方法初探[J].气象科学,2008,28(1):100–104.
- [6] 贾玲,郭强,李燕.陕西飞机人工增雨效果统计检验方法研究[J].气象科技,2010,30(3):378–381.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 刘贵华,余兴,戴进,等.地形云人工增雨条件卫星探测反演个例分析[J].气象学报,2011,69(2):363–369.
- [10] 李德俊,唐仁茂,江鸿,等.武汉一次对流云火箭人工增雨作业的综合观测分析[J].干旱气象,2016,34(2):362–369.
- [11] 张元,刘建西,刘晓璐,等.2013 年四川省飞机作业典型个例分析[J].成都信息工程学院学报,2015,30(2):192–198.
- [12] 范思睿,陶丽,张恒,等.四川一次超级单体风暴的多普勒雷达观测分析[J].高原山地气象研究,2017,37(1):73–79.
- [13] 刘平,林丹,任超,等.四川省人工影响天气现代业务系统设计[J].成都信息工程大学学报,2018,33(3):281–285.
- [14] 徐冬英,张中波,唐林,等.几种人工增雨效果

- 检验方法分析[J]. 气象研究与应用, 2015, 3(36):105-107.
- [15] 张存. 人工影响天气优化技术研究[M]. 北京: 气象出版社, 2000:27-28.
- [16] 汪玲, 唐林, 丁莉, 等. 湖南人工增雨作业效果统计检验与分析[C]. 第35届中国气象学会年会. 2018.
- [17] 李书严, 李伟, 赵习方. 北京市人工增雨效果评估方法分析[J]. 气象科技, 2006, 34(3):296-300.
- [18] 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.
- [19] 杨道侠, 张菁. 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.
- [20] 周喜讯, 张华, 荆现文. 中国地区云量和云光学厚度的分布与变化趋势[J]. 大气与环境光学学报, 2016, 11(1):1-13.
- [21] Rosenfeld D, Gutman G. Retrieving microphysical properties near the tops of potential rain clouds by multispectral analysis of AVHRR data[J]. Atmos Res, 1994, 34:259-283.
- [22] 周彬, 刘端阳, 魏建苏, 等. 降水对气溶胶颗粒物清除作用的初步分析[J]. 长江流域资源与环境, 2015, S1:160-170.

On Effect Assessment of an Airborne Cloud Seeding Operation in Early Summer in Sichuan Basin

LIN Dan^{1,2}, WANG Weijia^{3,4}

(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; 3. Chengdu Meteorological Bureau, Chengdu 611133, China; 4. Key Laboratory for Cloud Physics of China Meteorological Administration, Beijing 100081, China)

Abstract: By using ground automatic station, cloud parameter products from FY4A satellite and Doppler radar products, and adopting the method which combine the statistical test and physical test, the effect evaluation has been made on the aircraft cloud seeding operation which took place on June 11, 2018 in Sichuan basin. The results of regional historical regression analysis show that the correlation between the operation affected area and the comparison area is well, the absolute precipitation increase is 1.64 mm and the relative ratio of precipitation increase is nearly 20%. The results of physical testing show that after seeding operation, the rainfall in the operation affected area increase significantly by more than 1mm. The radar echo intensity increases, and the echo area expands. The cloud effective particle radius increases from 17 μm to 24 μm , and the cloud liquid water decreases. The physical changes of clouds after seeding operation can be detected by the change of radar echo and cloud parameter from satellite.

Keywords: atmospheric science; cloud precipitation; artificial precipitation; statistical testing; physical testing