

陈小敏,邹倩,廖向花. 2014. 两次飞机增雨作业过程数值模拟分析. 气象,40(3):313-326.

两次飞机增雨作业过程数值模拟分析^{* 1}

陈小敏¹ 邹 倩² 廖向花¹

1 重庆市人工影响天气办公室,重庆 401147
2 重庆市气象台,重庆 401147

提 要: 利用国家气象中心 GRAPES 业务模式耦合混合相双参数云微物理方案,对 2010 年 12 月 15 日的两次飞机人工增雨作业过程进行了催化数值模拟分析. 分析得出:GRAPES 模式基本能给出正确的中低层天气形势场和降水的动力结构,较大降水的落区和范围基本可信,降水强度较实况偏小;按照作业实况进行催化模拟具有一定的可信度,与实况降水在较强降水区域有较好的对应性;两次播撒都取得了增加降雨量的效果,24 h 平均增雨量在 3~5 mm,最大增雨量达 7 mm,两次播撒后增雨作业区的累计降水总量较未播撒时增加约一倍;播撒有效时段在 4 h 内,播撒后 1~2 h 雨量增加最大,增雨区域初期与播撒区域一致,随时间延长而在播撒区附近扩散;第一次播撒时,播撒冰晶消耗液态水,转化成固态水,水汽流入速度加快,向液态水转化加快,液态水迅速恢复,未出现减雨现象;第二次播撒时,云中固态水争食水汽增长,液态水得不到补充,云中上升运动减弱,自然降水阶段出现减雨现象。

关键词: 飞机增雨, 数值模拟, 效果评估

中图分类号: P456,P48 **文献标志码:** A **doi:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2014.03.007

Numerical Simulation of Two Aircraft Rain Enhancement Operation

CHEN Xiaomin¹ ZOU Qian² LIAO Xianghua¹

1 Weather Modification Office of Chongqing, Chongqing 401147
2 Chongqing Meteorological Observatory, Chongqing 401147

Abstract: Using the GRAPES model which incorporates a new two-moment microphysical scheme, two aircraft artificial precipitation processes that happened in Chongqing on 15 December 2010 are simulated and analyzed. The results show that GRAPES model is able to simulate the real synoptic situation of medium, the precipitation area is credibility, but the intensity is small. Seeding simulation has good correspondence with the observed rainfall in heavier precipitation areas. Seeding twice leads to the increasing of precipitation, the 24 h average enhancement rainfall is 3—5 mm and the maximum amount is 7 mm. The 24 h accumulative total precipitation of seeding is double times than no seeding in seeding area. Obvious enhancement result is seen in 1—2 hours after seeding, and the rain enhancement continues about 4 hours. At the beginning the area of enhancement is the same as the seeding area, spreading near the seeding area with the time. After the first seeding, the liquid water is quickly transformed into solid water by seeding ice crystal, and the vapor inflow accelerates changing into liquid water, so the liquid water quickly restore. There is no rain reduced. After the second seeding, the solid water increases by vapor transforming, the supplement of liquid water is poor, the ascending motion of clouds decreases, and the rainfall is reduced at the stage of natural precipitation.

Key words: aircraft rain enhancement, numerical simulation, effect evaluation

^{*} 重庆市气象局科技攻关项目(ywgg201207)资助
2012 年 12 月 25 日收稿; 2013 年 9 月 17 日收修定稿
第一作者:陈小敏,主要从事云降水物理数值模拟研究.Email:civillegend@163.com

引 言

人工增雨效果是指人工催化后云体发生的变化,一是人工增雨影响后云内微物理过程和云中宏观、微观物理量发生的变化;二是人工增雨影响前后降水发生的变化(叶家东等,1982)。多年来,几乎所有的人工增雨研究和作业的关键性问题都是对人工增雨效果的评估和检验(郑国光等,2005)。目前,人工增雨的效果检验评估,主要是基于严格设计的大量外场作业试验基础上的随机及非随机效果统计检验和物理检验,以及不可避免的对降水云系相当大的自然变差物理效应统计检验(李大山等,2002;严采繁等,2001;曾光平,1999)。这些大量的试验往往需要花费较长时间和较多的经费,而外场试验拖延的时间越长,越容易受环境因子缓慢变化的影响,以数值模拟的形式进行催化效果检验和分析成为一种新的手段。

近年来,随着中尺度数值模式的发展,在天气尺度模式中加入详细的云降水微物理方案,使其不仅具有描述天气系统的能力,而且还能研究在不同天气系统下云降水演变过程,已经成为越来越多的从事云降水物理方面学者的选择。国内外一些学者利用中尺度数值模式同云分辨方案相结合的方式,对地形云(Meyers et al,1995;陈小敏等,2007;孙晶等,2009)、锋面层状云系(史月琴等,2008;方春刚等,2009)、对流云(高茜等,2011)等进行云系结构演变和人工催化的研究,得出了一些有意义的结论,对研究云系降水性质、播云技术和效果方面提供了较

大的帮助。

毛节泰等(2006)指出,人工增雨作业部位和时机的选择主要取决于是否有利于云产生抬升运动。因此,在加强云宏、微观条件观测的同时,要特别加强对抬升运动和被抬升气块中水汽含量的监测,而且相应的云降水数值模拟工作也要考虑反映降水系统的动力场和水汽场模拟能力。本文利用国家气象中心 GRAPES 业务模式耦合混合相双参数微物理方案(马占山等,2009;陈小敏等,2011;花丛等,2011),对重庆一次冬季主城区飞机增雨过程进行催化模拟评估,对播撒区域云中水汽资源随时间的变化进行对比分析,并研究了主城区两个站点的微物理量及逐时雨量在催化前后的时空分布特点。

1 天气形势及增雨作业分析

1.1 天气形势分析

此次降水过程是高空槽引导强冷空气进入四川盆地中东部,再配合较强的低空急流携带的充足水汽而形成的。图 1a 为 15 日 08 时天气实况,15 日 08 时 500 hPa 环流形势在中纬度为一槽一脊型,从陕西南部经四川盆地东部到云南北部有一低槽,重庆处于槽前西南气流控制,700 hPa 上,盆地东北部有气旋性辐合,重庆西部有一切变线(西北偏北风与西南风),从云南东部经贵州到重庆中东部存在低空急流,维持在 $12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上,为此次降水过程提供了充足的水汽条件,重庆西部位于急流左侧,湿度条件较好。到 15 日 20 时,500 hPa 上低槽东移,重庆地

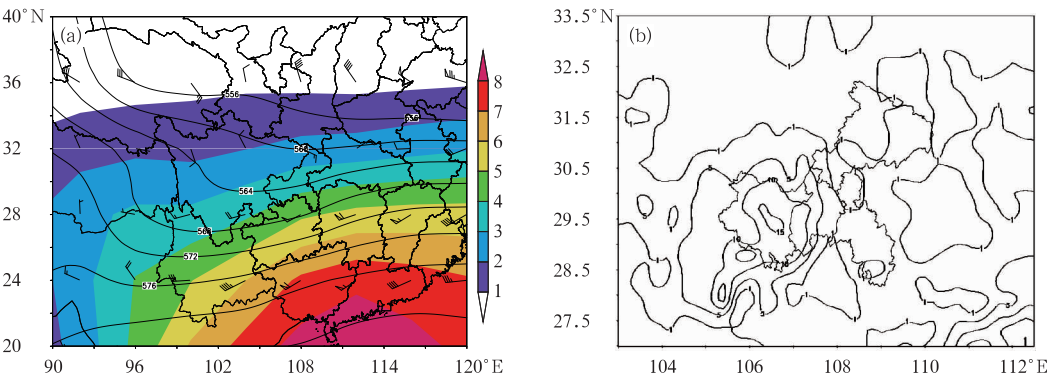


图 1 (a) 2010 年 12 月 15 日 08 时实况 500 hPa 高度场(单位: dagpm)、700 hPa 风场(单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) 和比湿场(阴影), (b) 24 h 降水实况(单位: mm)

Fig. 1 (a) Synoptic situation of 500 hPa height (unit: dagpm), 700 hPa wind (unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) and specific humidity (shaded) at 08:00 BT 15 December 2010; (b) the 24 h observed rainfall (unit: mm)

区转为槽后西北气流控制,700 hPa 切变线减弱并逐渐移出重庆,全市转成偏北气流控制,降水过程趋于结束。从实况降水(图 1b)可以看出,降水落区主要在重庆偏西地区,量级为小到中雨(5~15 mm),降水最大区域在重庆主城区中心附近,量级在 15 mm;主城区的三个观测站点中,沙坪坝站累计雨量为 16.7 mm,巴南站累计雨量为 15.2 mm,渝北站累计雨量为 10.9 mm,都达到中雨量级;偏东地区降水较少,都是小雨量级,雨量小于 5 mm。

1.2 作业情况

这次过程重庆市人工影响办公室在 12 月 15 日 11:00—12:30 和 15:00—17:00 进行了两次飞机人工增雨作业,作业范围在重庆主城及周边,21:00—23:00 也组织沙坪坝、渝北、巴南、北碚、合川、璧山、铜梁、江津等 8 个区县进行了火箭人工增雨作业。第一次飞行航线(图 2 实线)共使用焰弹 110 枚,播撒碘化银 220 g。第二次飞行航线(图 2 虚线)共使用焰弹 200 枚,播撒碘化银 400 g。

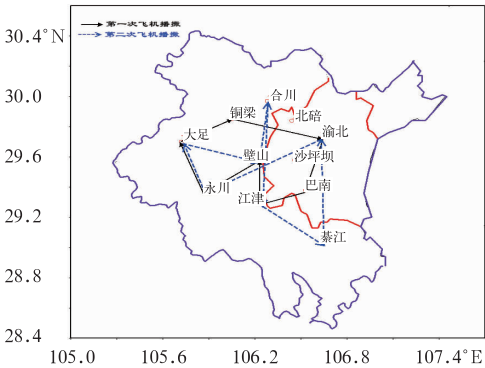


图 2 飞机作业实际播撒路线

(实线:第一次飞行航线,大足—铜梁—北碚—渝北—巴南—江津—璧山—永川—大足,起播点铜梁,结束点永川,起播时间 11:15,结束时间 11:50,每分钟 3~4 枚焰弹,播撒高度 4800 m 左右,温度 -12~-10℃;虚线:第二次飞行航线,大足—璧山—合川—江津—綦江—渝北—永川—大足,起播点璧山,结束点大足,起播时间 15:10,结束时间 16:50,每分钟 2~3 枚焰弹,播撒高度 4300 m 左右,温度 -10~-8℃)

Fig. 2 Aircraft seeding line

(solid line, the 1st seeding line; point line, the 2nd seeding line)

1.3 雷达分析

多普勒雷达观测具有高时空分辨率、好的机动

性和主动性,已经广泛用于人工增雨效果的物理响应检验。图 3 为陈家坪雷达 1.5°仰角的反射率(PPI)图,作业前(11 时),主城上空有降水云系覆盖,回波比较分散,偏北地区回波强度在 20~30 dBz 之间,偏南地区回波稍强,出现少量回波亮带;11:30,在铜梁—北碚—渝北线催化作业了 10 min,这一片(A 云团)回波强度迅速增加,强度在 30~40 dBz 回波,比催化前增加了 10 dBz 左右,出现了比较明显的 0℃层亮带,地面实况为小雨,在 11:48—11:54 回波发展最为强盛;11:36—12:00 之间,在渝北—巴南—江津—璧山—永川方向实施了催化作业(B 云团),云团的回波强度和强回波面积均明显增加,出现了发展加强的趋势;12:00 B 云团有 3 处强中心,13:00, B 云团 3 个强中心合并成 1 个,到 14 时与 A 处云系合并,在近地面层形成完整的 0℃层亮带,回波结构比较密实,亮带高度层有所降低,约为 0.4~0.6 km,越来越接近地面,此时,地面实况为雨夹雪或小雨。雷达反射率因子的变化可以说明 11:20—11:50 的催化作用非常有效,在催化后 1 h 内(特别是 10~30 min 以内)回波强度、强回波面积增大最明显。

另外,对比分析 0.5°雷达反射率图(图略),可以看出:不论冷层(1.5°)或暖层(0.5°),都能在催化 30 min 内引起目标区雷达回波增强的趋势;催化后冷层的回波峰值回落时刻普遍提前于暖层的峰值回落时刻,说明低层暖区的大云滴或雨滴是来源于高层冷区的过冷云滴或冰晶的转换和成长。在回波强度变化期间,雷达风场基本维持不变,地面是东北偏北风,风向随高度顺转,在影响区南面边缘为东南偏南风,有风向辐合。

对两个集中催化作业段沿飞机增雨作业航迹自北向南做雷达剖面图分析(图 4)。沿北碚—渝北的反射率因子垂直剖面(RHI)图可以看出,作业前(11:00),航线上回波比较弱,云系发展不均匀,只有局部地方有超过 20 dBz 的回波,顶高不到 4 km;作业后 20~40 min 内(11:30—12:00),北面云系有明显发展,回波强度从 5~15 dBz 加强到 15~30 dBz, >20 dBz 的回波顶高在 3.5 km 左右,在低层出现 35 dBz 左右回波,与 PPI 图对应可以确认为是 0℃层亮带;作业后 1 h 后(12:30—13:00),云系有所减弱,强回波面积和回波顶高均有所回落。沿渝北—巴南的反射率因子垂直剖面图可以看出,随着由北至南催化作业,作业云系也是北面云系先加强,然后

南面云系加强,与催化作业时间对应比较好。催化作业前北面云系发展比南面旺盛一些,渝北进行催化作业后 30 min(11:30—12:00)内,回波强度从 10~20 dBz 加强到 15~35 dBz, >20 dBz 的回波顶高接近 4 km,在低层出现了 35 dBz 左右的 0℃层亮带,12:00 南面巴南段开始有云系发展。随着 11:30—11:50 在巴南段开始作业后,巴南段在作业后 30~50 min(12:00—12:30)内,回波强度从 10~20 dBz 加强到 15~35 dBz, >20 dBz 的回波顶高从 2 km 增加到 3.8 km 左右,低层出现 0℃层亮带回波,作业后 1~2 h(13:00),云系出现减弱,这可能与云系沿东南风向西北方向移动有一定关系。

2 模拟播撒方案设计及对比分析

2.1 雨量模拟与实况及预报对比

从前文实况和雷达分析来看,降水较强区域与作业区基本一致,雷达回波在作业区域变化明显,本次增雨作业取得了较好的效果,为更全面了解飞机播撒作业的增雨效果,对本次过程进行催化模拟分析。GRAPES 业务模式模拟的区域为 24°~36°N、100°~115°E,东西方向 100 个格点,南北方向 80 个格点,模式的水平分辨率为 0.15°×0.15°,模式垂直分辨率为 31 层,垂直方向采用高度地形追随坐标。时间步长为 60 s,其中降水粒子的落速采用小步长计算,初始场采用 T213 预报场资料,模拟时效为 2010 年 12 月 15 日 08 时至 16 日 08 时。图 5a 给出了模拟的 2010 年 12 月 15 日 08 时天气形势场,可以看出,模式模拟的 500 hPa 位势高度场与实况(图 1a)基本一致,高空槽的位置也处于四川盆地东部。700 hPa 上风场普遍较实况偏小,风速较大区与实况一致,急流较实况略弱,暖切变线位置模拟与实况基本一致,冷切变线较实况偏北,切变线两侧风场较实况偏小。模拟重庆地区 700 hPa 的水汽条件也较好,水汽最大区域与实况相符。总体而言,除低层风速场模拟较实况偏小外,模式基本给出了正确的中低层天气形势场,说明模式能较好地模拟本次降水的动力结构。

模式模拟的 24 h 降水落区与实况比较符合,但降水量级与实况有较大差别,模式模拟的降水在偏西地区都是小雨量级,雨量在 1~5 mm,偏北角雨量在 1 mm 以下,仅偏南角有略大于 5 mm 的降水,

主城区三个观测站中,沙坪坝站雨量为 3.3 mm,渝北站雨量为 1.9 mm,巴南站雨量为 4.0 mm,都远远小于实况降水。模拟降水在偏东地区也是小雨量级,雨量也在 1~5 mm,较实况范围略大。

对比 T639、德国、日本 T213 等 3 家全球模式对这次降水预报(图略),3 家模式给出的结果都比较一致,预报的降水落区范围与实况极为符合,预报的降水强度也较实况小,实况降水最大区域(重庆主城区及周边)也没有被模拟出来。对比 GRAPES 业务模式,3 家模式的降水强度普遍大 5 mm 左右,可能是由于当天降水从 08 时就已经开始,但 GRAPES 业务模式得起转时间需要 1~2 h,此时实况的降水没有被模式模拟出来。因此,业务模式模拟的落区基本可信,降水量应该再增加 1~5 mm 左右。

2.2 飞机催化方案设计

利用云模式进行催化试验,主要有三种方法(Rosenfeld et al,1993),第一种是在预先选定的温度区域内直接把过冷水转化为云冰,这种方法可以在一个格点上瞬时转化,也可以在一定的温度区域内多个格点上缓慢转化;第二种方法是在模式选定的时空范围内人为地增加一定数量的冰晶数浓度和相应的很少的冰晶比质量,这种方法适用于原理试验和液氮等的催化模拟;第三种方法是在模式云中的合适部位和时间直接加入催化剂,模拟催化剂的演变、核化及其与云和降水粒子的相互作用,这种方法与自然云中催化剂的扩散增长过程最为接近,但较难进行数值模拟控制。本文选用第二种方法进行催化模拟试验。

从 11:00—15:00 多普勒雷达 VWP 风廓线资料(图略)来看,两次飞行期间播撒高度上风速为 6~12 m·s⁻¹,以碘化银催化剂半小时扩散范围为 11~22 km,模式格距为 15 km 左右,设计催化方案按沿播撒路线格点数来设计(见表 1),方案 1 为第一次飞机播撒模拟(图 6 中 seeding_line1),基本沿实况播撒路线最靠近的格点进行播撒,图中黑色圆圈表示主城区中心沙坪坝站所在(29.35°N、106.33°E),方案 2 为第二次飞机播撒模拟(图 6 中 seeding_line2)播撒的路径也基本上按实况飞行路线进行,播撒剂量计算公式为:

$$C = \frac{N_0 S}{d_x d_y d_z N_m} \times 10^{-3}$$

式中, N_0 为焰剂中 1g 碘化银成核率,由于其在

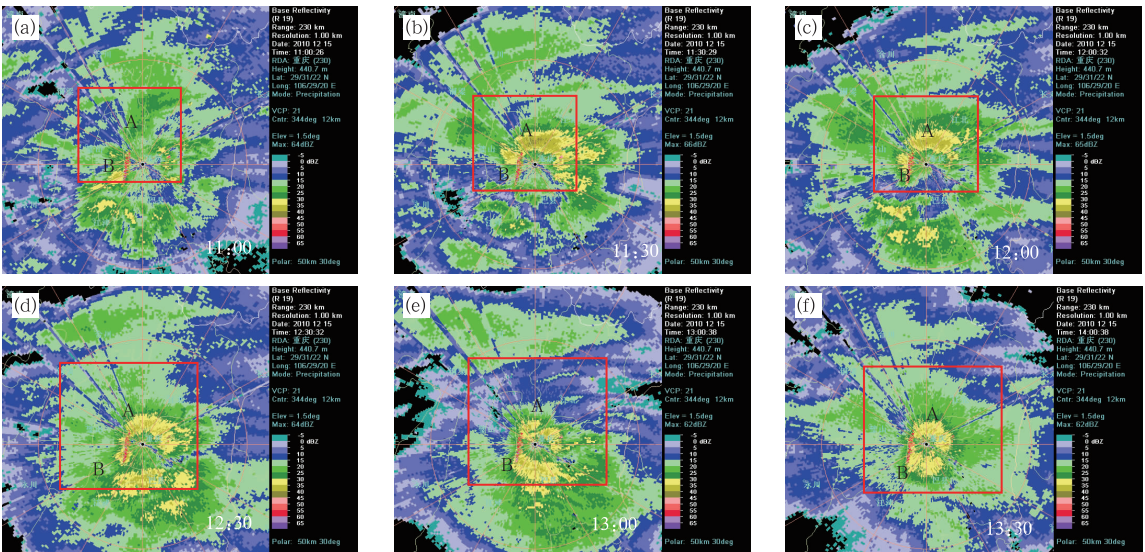


图 3 陈家坪雷达 1.5°仰角的反射率图
Fig. 3 Radar reflectivity at 1.5° elevation at different times

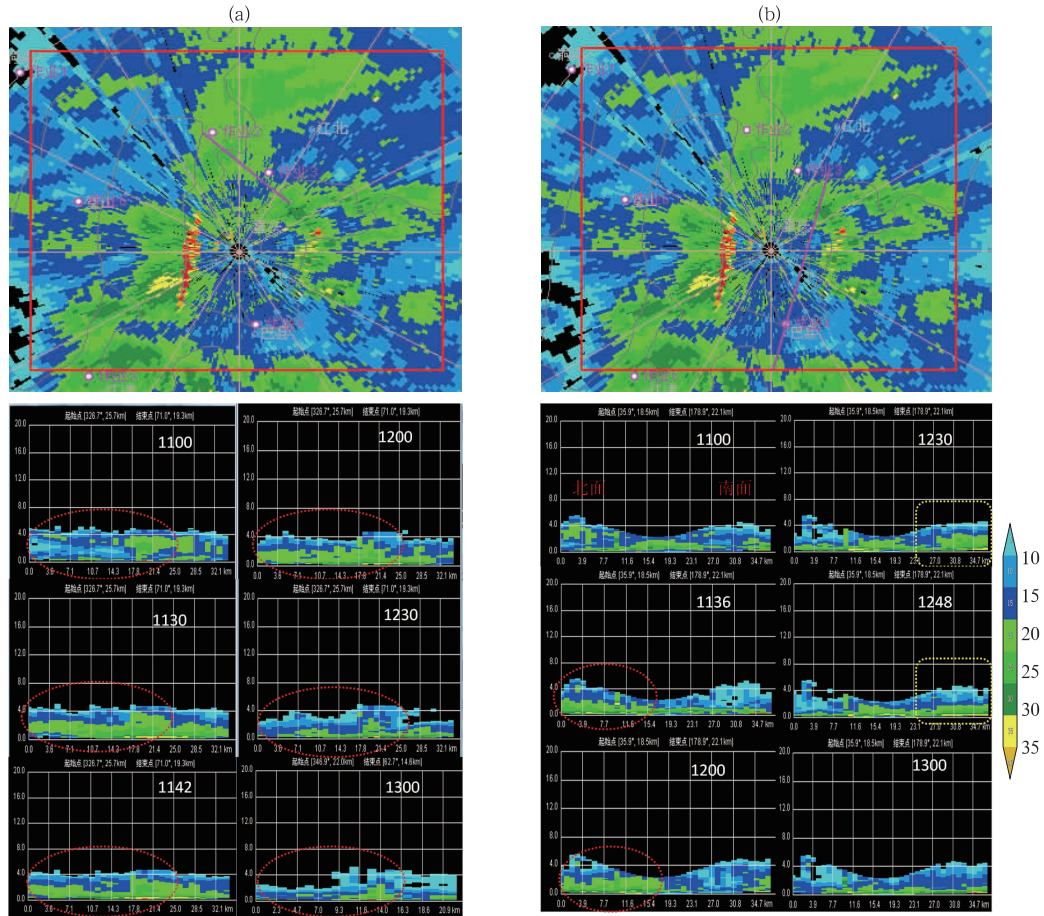


图 4 反射率因子垂直剖面图(左为北面,右为南面)
(a) 北碚—渝北作业段, (b) 渝北—巴南作业段
Fig. 4 Vertical profiles of reflectivity factors from 11:00—13:00 BT
(left: north, right: south)

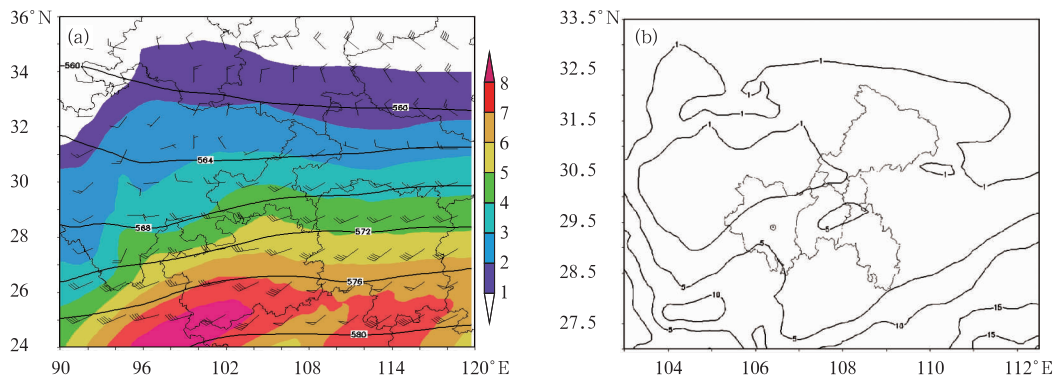


图 5 同图 1, 但为模拟天气形势和降水

Fig. 5 Same as Fig. 1, but for simulated synoptic situation and rainfall

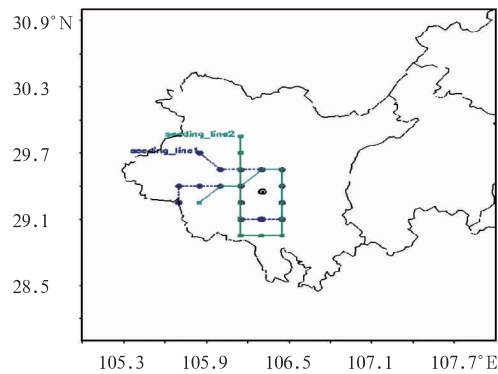


图 6 模式模拟的播撒路线

[line 1: 起播点铜梁, 结束点永川, 起播时间 11:20, 结束时间 11:55, 剂量为每格点 $300 \text{ 个} \cdot \text{L}^{-1}$ 冰晶, 播撒高度 550 hPa (约 5000 m); line 2: 起播点璧山, 结束点大足, 起播时间 15:10, 结束时间 16:50, 剂量为每格点 $200 \text{ 个} \cdot \text{L}^{-1}$ 冰晶, 播撒高度 600 hPa (约 4500 m)]

Fig. 6 Simulated seeding line

表 1 数值模拟方案设计

Table 1 Scheme design of seeding simulation

方案	开始时间	结束时间	格点数 / 个	每个格点剂量 / 个 $\cdot \text{L}^{-1}$	高度 / hPa
1	11:20	11:55	7	300	550
2	15:10	16:50	20	200	600

-10°C 环境中最大成核率为 1.8×10^{15} 个, 我们这里取平均值 1.0×10^{15} 个; S 为 200 发焰剂中总碘化银含量, 为 400 g; d_x 、 d_y 、 d_z 分别为格点在 x 、 y 、 z 方向上的格距, $d_x = d_y = 0.15^{\circ} \approx 15 \times 10^3 \text{ m}$, $d_z \approx 400 \text{ m}$ 。计算下来, 方案 1 播撒时每个格点剂量约为 $300 \text{ 个} \cdot \text{L}^{-1}$, 方案 2 播撒时每个格点剂量约为 $200 \text{ 个} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

2.3 催化对地面降水影响

2.3.1 24 h 降水变化

图 7 给出了播撒作业后地面降水变化, 可以看出, 播撒后在播撒区域地面降水有明显增加, 在方案 1 (播撒后第一次飞行图 7a), 增雨范围较播撒范围略大, 位置略有偏东和偏南, 主城区中心所在区域 24 h 降雨量有明显增加, 最大增雨量有 6 mm, 平均增雨量为 3~5 mm。主城区三个站点中, 沙坪坝站雨量为 5.4 mm, 较播撒前增加 2.1 mm, 增雨效率为 63.6%; 巴南站雨量为 9.1 mm, 较播撒前增加 5.1 mm, 增雨效率为 127.5%; 渝北区由于处于增雨作业范围北部雨量没有增加, 仍为 1.9 mm, 增雨效率为 0%。在播撒范围以南, 有一个小的增雨中心区, 呈南北向的狭长状, 与主城区增雨中心相连, 最大增雨量为 3 mm, 平均增雨量为 1~3 mm。在增雨范围以西四川境内有小片减雨区, 减雨量级为 1 mm, 范围较小, 为增雨范围 1/4 左右。

在方案 1 和 2 都播撒后 (第二次飞行图 7b), 增雨范围较方案 1 略大, 增雨中心位置在主城区中心偏西地区, 呈南北向椭圆形态, 并向南延伸至重庆与贵州交界处, 最大增雨量为 7 mm, 平均增雨量为 5 mm 以上。但在主城区增雨效果与方案 1 相差不大, 主城区三个站点中, 沙坪坝站雨量为 5.4 mm, 较未播撒时增加 2.2 mm, 增雨效率为 68.8%, 较方案 1 时增加 0.1 mm; 巴南站雨量为 10.3 mm, 较未播撒时增加 6.3 mm, 增雨效率为 157.5%, 较方案 1 增加 1.2 mm; 渝北站雨量为 2.4 mm, 较未播撒和方案 1 增加了 0.5 mm, 增雨效率为 26.3%。由于第

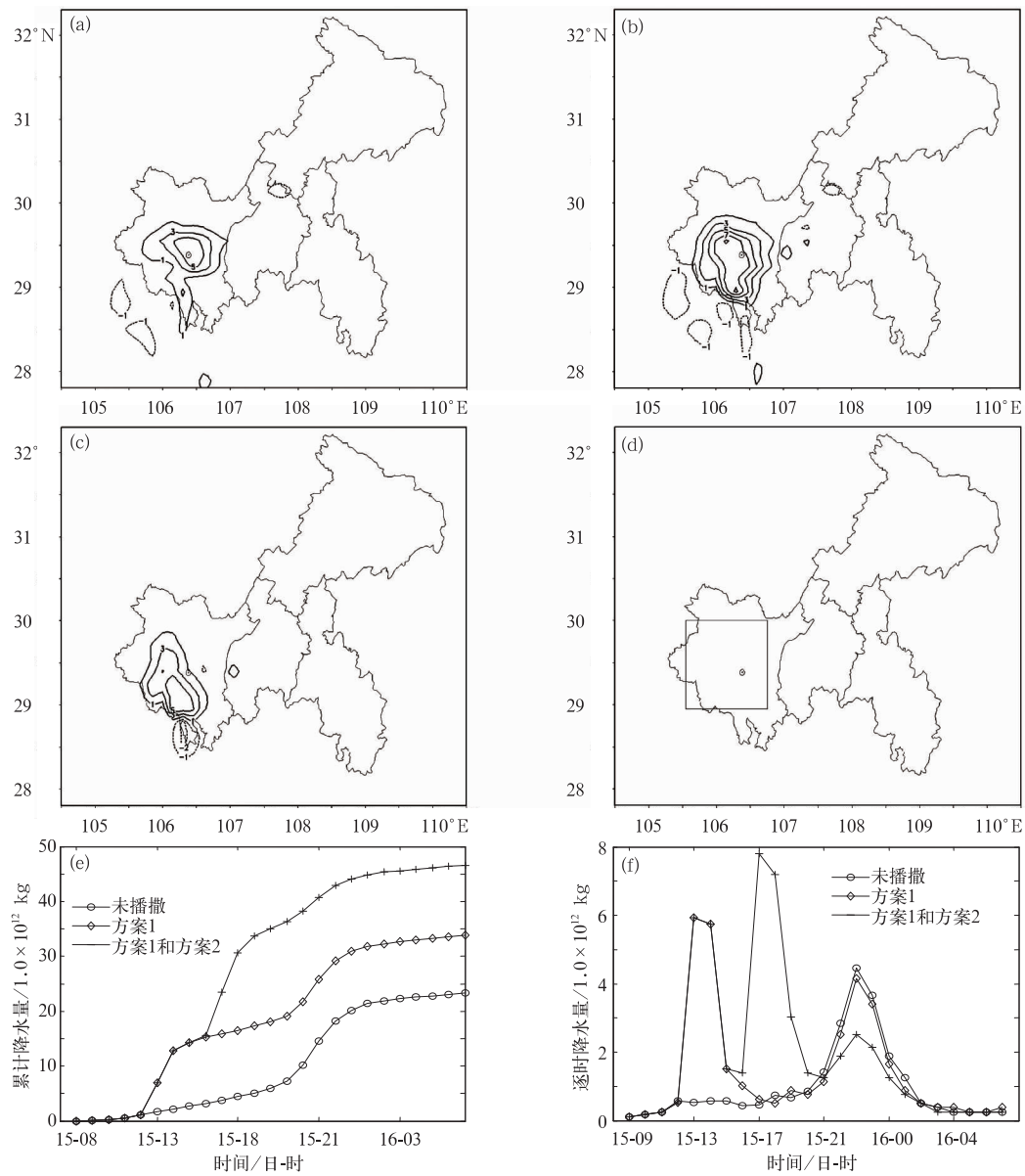


图 7 播撒后地面降水变化

[a~c 中: 实线为雨量增加量(间隔 2 mm), 虚线为雨量减少量(间隔 1 mm), 单位: mm]

- (a) 方案 1 播撒和与未播撒 24 h 地面降水变化量, (b) 方案 1 和 2 都播撒与未播撒 24 h 地面降水变化量, (c) 方案 1 和 2 都播撒后与方案 1 播撒后 24 h 地面降水变化量, (d) 地面累计降水量计算区域(基本覆盖播撒作业影响区域), (e) 未播撒、方案 1 播撒和方案 1 与 2 都播撒地面累计降水总量随时间变化(单位: kg), (f) 未播撒、方案 1 播撒和方案 1 与 2 都播撒地面逐时降水总量随时间变化(单位: kg)

Fig. 7 Changes of surface rainfall after seeding

[a~c: solid line is increasing amount of rainfall (interval 2 mm), dashed line is decrement of rainfall (interval 1 mm); unit: mm]

- (a) Variation of 24 h rainfall between experiment 1 and no seeding; (b) variation of 24 h rainfall between seeding experiment 1 and 2 and no seeding; (c) variation of 24 h rainfall after seeding experiment 1 and 2 with experiment 1; (d) area of total surface rainfall; (e) changes of accumulative rainfall with time in no seeding, experiment 1 and experiment 1 and 2 (unit: kg); (f) changes of hourly rainfall with time in no seeding, experiment 1 and experiment 1 and 2 (unit: kg)

二次飞行播撒的时间、路径、高度和剂量较第一次飞行不一样,增雨效果有较大差别(图 7c),方案 2 的播撒实际使得主城区偏西偏南地区雨量增加明显,增加降水 3~5 mm,其中偏南地区增雨 5mm 以上,

在重庆和贵州交界区域有减雨区,增雨区与减雨区相邻,减雨量级在1~2 mm,范围与增雨5 mm以上区域基本相等,呈南北对称状态。

为更好了解增雨作业实际效果,对播撒区域(图7d)地面24 h降水总量进行分析,图7e给出了未播撒、方案1播撒和方案1与方案2都播撒地面降水总量随时间变化,可以看出,未播撒时,24 h地面降水总量为 23.31×10^{12} kg,方案1播撒后降水总量为 33.89×10^{12} kg,方案1与方案2都播撒后降水总量为 46.62×10^{12} kg,是未播撒时的2倍。从逐时变化来看(图7f),未播撒降水呈现单峰型,雨量最大出现在15日23时,但飞行播撒使得雨量呈双峰(第一次飞行)和三峰型(第二次飞行),播撒后2 h雨量增加最为明显,以播撒后第1个小时增加最大,方案1播撒后第一个小时(13:00)降水总量增至 5.93×10^{12} kg,第二个小时(14:00)降水总量增至 5.74×10^{12} kg,到第三个小时(15:00)时,降水总量骤减至 1.51×10^{12} kg,随后随时间逐渐减少,到第五个小时,小时降水总量已经同未播撒时基本相同,增雨效果结束,到第六个小时还略有减少,其后几个小时逐小时降水总量变化与未播撒时一致,整个降水过程中未出现降水量较未播撒时明显减少的时段。方案2进行播撒时,播撒效果在播撒时期就显现,播撒时期(15:00—16:00),16:00雨量较方案1时略大,但增雨效果最明显的时段也是播撒后2 h,其后逐渐减少,其中第一个小时(17时)降水总量为 7.81×10^{12} kg,到第二个小时,降水总量为 7.18×10^{12} kg,随后逐时雨量骤减,到第五个小时(21:00)增雨效果结束,此时降水总量与未播撒时一致,但较方案1不同的是,方案2在22:00以后,降水总量明显较未播撒时变小,即呈现出减雨现象,并持续有5 h,到16日02时才与未播撒时一致。其中在未播撒降水总量峰值时(23时)减雨量最大,为 1.94×10^{12} kg,约为未播撒降水总量一半,其后减雨逐渐减少。

2.3.2 地面降水逐小时变化

研究地面逐小时降水主要是为了了解播撒作业的持续影响时间,及在影响时间内雨量的演变规律。图8给出了播撒后逐小时雨量变化量,可以看出在当方案1第一次播撒后3 h内雨量有明显增加,播撒后1~2 h雨量增加最为明显,其中播撒后1 h(图8a),增雨区范围与播撒范围基本一致,最大增雨量为3.5 mm,最大增雨区在主城区中心附近。播撒

后2 h(图8b),增雨区中心位置变化不大,增雨区范围向西略有增大,增雨量级分布较为平均,最大增雨量为2.5 mm,最大增雨区仍在主城区中心附近。播撒后3 h(图8c)增雨量明显减少,增雨范围也减小,增雨区在主城区偏西北地区,增雨量级为0.5 mm左右。播撒后4 h(图8d)与播撒后3 h基本一样,增雨区在主城区偏西北地区,增雨量级为0.5 mm左右。

进行方案2第二次播撒后,在第二次播撒后1 h(图8e),也有明显增雨区出现,增雨区范围较大,位置较播撒区偏南,最大量级为4.5 mm左右,播撒后2 h(图8f),增雨区范围持续扩大,出现两个最大增雨中心,增雨量级有所减少,两个中心最大增雨量都在2.5 mm。播撒后3 h(图8g),增雨区范围减少,位置较前一时次略偏西,最大增雨量为1.5 mm。播撒后4 h(图8h),增雨过程基本结束,没有出现明显的增雨区。随后在21:00—22:00即第二次播撒后6 h(图8i),出现零星的减雨区,位于主城区的东北部,减雨量级在0.5 mm左右。播撒后7 h(图8j),减雨区范围扩大,基本覆盖了整个主城区,减雨量级也增大,最大减雨量在1 mm。播撒后8 h(图8k),减雨区范围有所减小,位置向南移动至主城区东南部,减雨量级也减少至0.5 mm左右。播撒后9 h(图8l),减雨过程基本结束,仅在江津南部靠近重庆边界有小块区域出现减雨,量级为0.5 mm左右。

2.4 云中水资源变化

将空中云水和雨水等以液态存在的水凝物称为液态水,将冰晶、雪和霰等以固态存在的水凝物称为固态水,研究作业后水汽、液态水和固态水总量随时间变化特征,有利于了解空中水资源变化对地面降水的影响。

图9给出了未播撒、方案1和方案1、2都播撒时区域内(图7)云中柱水汽总量、柱水汽逐时变化量、液态水总量、液态水逐时变化量、固态水总量以及固态水逐时变化量。总柱水汽含量在播撒后都呈现出先减少后缓慢恢复趋势(图9a),其中方案1播撒后第四小时(17:00)基本恢复至未播撒时,这与逐时降水(图7f)趋势一致;方案2播撒后在第七个小时(23:00)基本恢复至未播撒时,这可能是由于区域内水汽在19:00以后流入迅速减少,播撒消耗的水汽得不到及时补充。从逐时水汽变化来看(图9b),

区域内水汽在 09:00—17:00 一致处于净减少状态,但流出的量呈波浪式缓慢减少,到 17:00 达到流入流出平衡(逐时水汽变化接近 0 kg);随后,在 18:00—20:00,区域内水汽呈净增加状态,其中在 19:00 流入达到顶点,为 2.52×10^{12} kg;20:00 以

后,区域内水汽呈净减少状态,在 03:00 也达到顶点,为 -11.08×10^{12} kg,其后净减少缓慢减少。方案 1 的播撒,使得前期净减少量增大,主要作用在播撒后 2 h (12:00 和 13:00),随后净减少量逐渐减少,并提前至 15:00 流入流出基本平衡,随后同未播

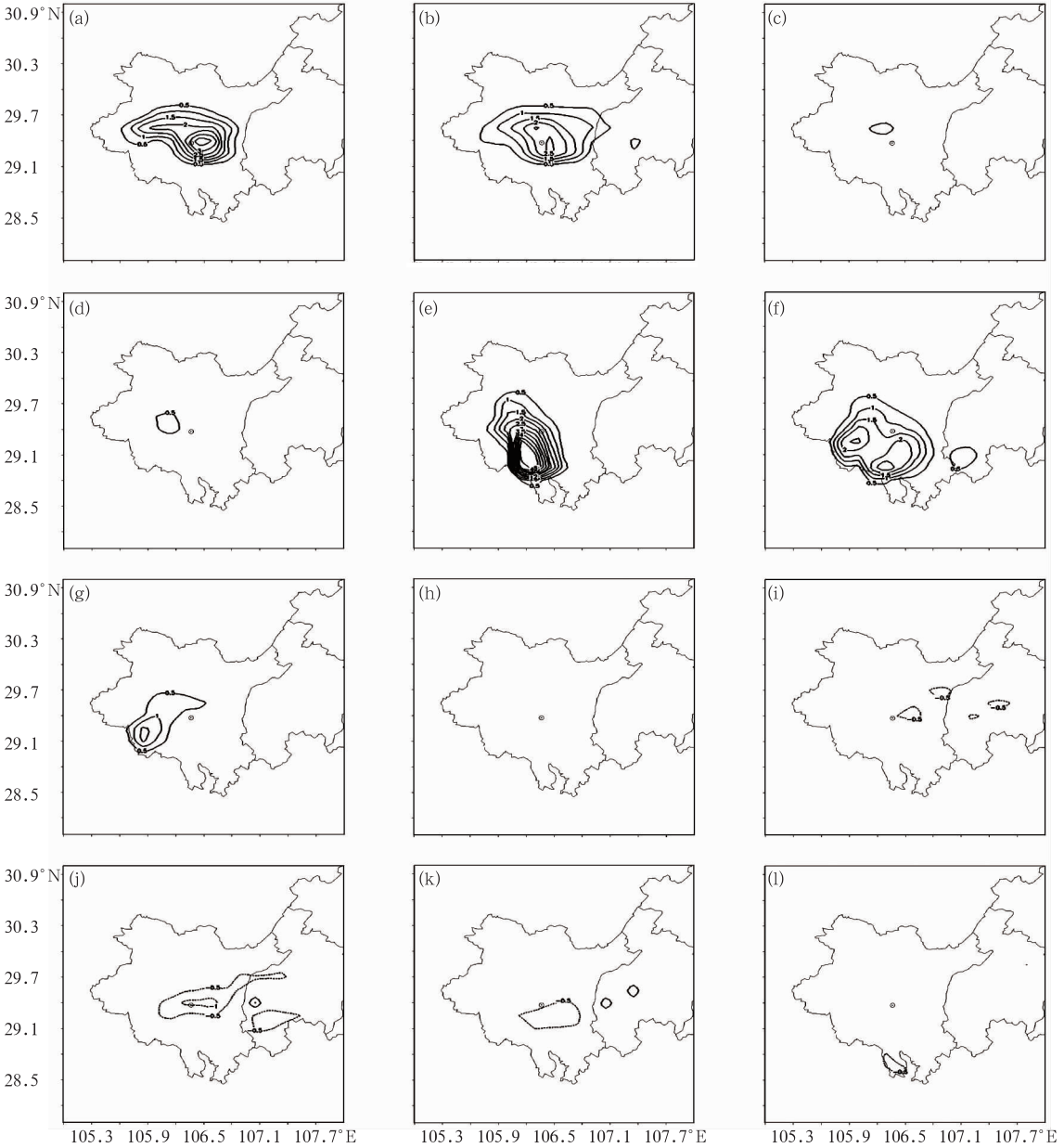


图 8 方案 1 和 2 都播撒后逐小时雨量变化量

(a) 12:00—13:00, (b) 13:00—14:00, (c) 14:00—15:00, (d) 15:00—16:00, (e) 16:00—17:00, (f) 17:00—18:00, (g) 18:00—19:00, (h) 19:00—20:00, (i) 21:00—22:00, (j) 22:00—23:00, (k) 23:00—00:00, (l) 00:00—01:00

Fig. 8 The hourly rainfall change after experiments 1 and 2

(a) 12:00—13:00 BT, (b) 13:00—14:00 BT, (c) 14:00—15:00 BT, (d) 15:00—16:00 BT, (e) 16:00—17:00 BT, (f) 17:00—18:00 BT, (g) 18:00—19:00 BT, (h) 19:00—20:00 BT, (i) 21:00—22:00 BT, (j) 22:00—23:00 BT, (k) 23:00—00:00 BT, (l) 00:00—01:00 BT

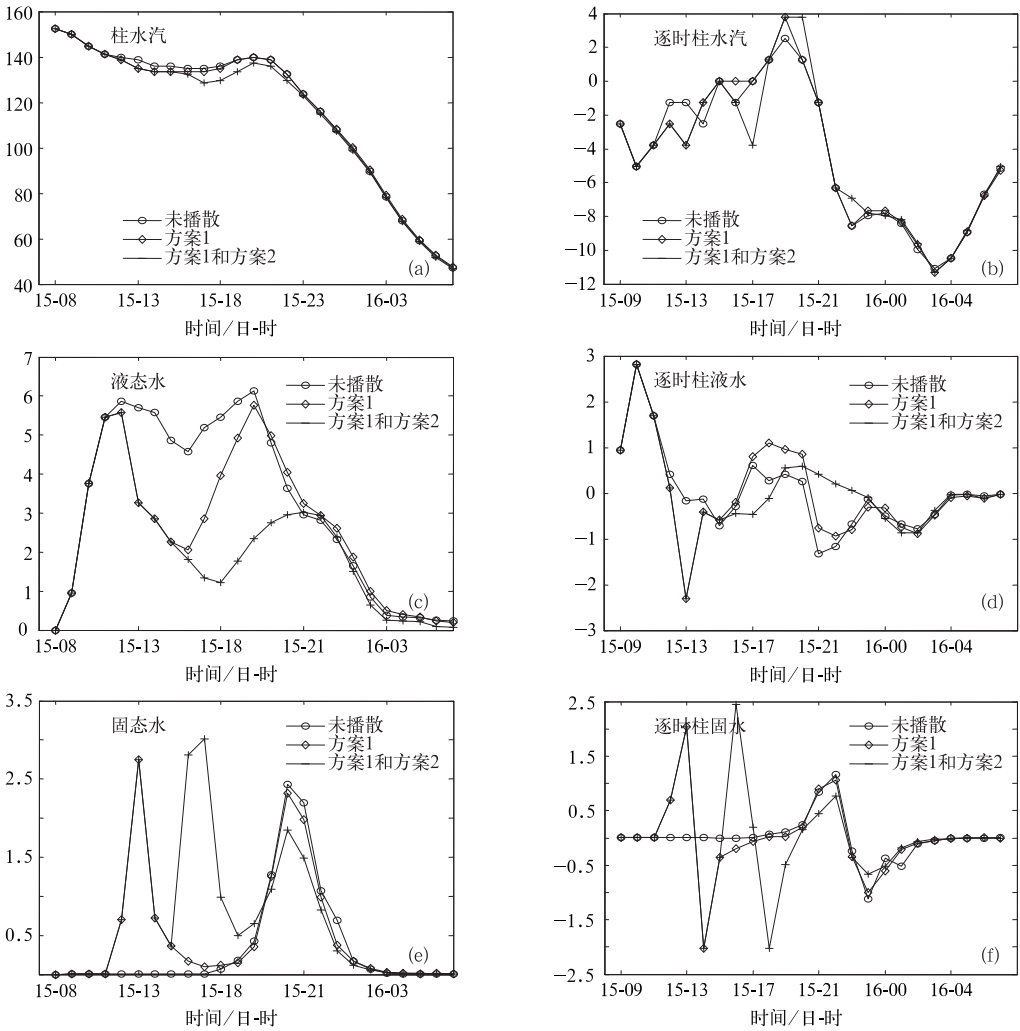


图 9 播撒区域内云中水资源变化特点 (单位: 1.0×10^{12} kg)

(a) 区域总柱水汽含量随时间变化, (b) 区域逐时总柱水汽变化量随时间变化, (c) 区域总柱液态水含量随时间变化, (d) 区域逐时柱液态水变化量随时间变化, (e) 区域总柱固态水含量随时间变化, (f) 区域逐时柱固态水变化量随时间变化

Fig. 9 Characteristic changes of seeding region water resources in clouds (unit: kg)

(a) hourly changes of total column water vapor, (b) hourly changes of hourly column water vapor, (c) hourly changes of total liquid water, (d) hourly changes of hourly liquid water, (e) hourly changes of total solid water, (f) hourly changes of hourly solid water

撒时期一样呈现净增加状态,19:00 达到流入顶点,为 3.78×10^{12} kg,较未播撒时增加,其后变化基本与未播撒时一致。方案 2 播撒后,逐时水汽净减少也明显增大,18:00 也由净减少转为净增加,并在 19:00 和 20:00 达到顶点,流入量都为 3.78×10^{12} kg,其后变化基本与未播撒时也一致。对比三种条件逐时柱水汽变化量,可以看出,播撒作业不会改变水汽变化大的趋势,三种条件下水汽都呈净减少—净增加—净减少形势,但播撒可以短时期内改变水汽净增加流出的速度,在水汽前期净减少时播

撒增加净减少量,播撒作业后,水汽输送的自然调整,会在净增加时期迅速补充水汽量,提高净增加速度和流入量。

大范围的水汽变化必然引起云中液态水(图 9c)和固态水(图 9e)变化,播撒时云中液态水就开始消耗,方案 1 中播撒后 1 h 液态水消耗极为明显,液态水总量从 5.57×10^{12} kg 骤降至 3.26×10^{12} kg,随后缓慢减少,16:00—20:00 迅速增至 5.76×10^{12} kg,与未播撒时液态水总量基本相同,其后液态水总量逐渐减少。方案 2 播撒时云中液态水含量持

续减少,在18:00—21:00虽有一段时间增加,但云中液态水总量增至 3.02×10^{12} kg,仅为未播撒最大值的一半。从柱液态水逐时变化来看(图9d),方案1播撒后第二小时(13:00)液态水消耗最多,其后迅速补充,在18:00—20:00补充液态水较未播撒时 0.5×10^{12} kg $\cdot$ h $^{-1}$ 。方案2播撒后2 h(17:00—18:00),逐时液态水变化极小,较方案1明显不同。固态水在播撒后明显增加,在未播撒时,08:00—17:00云中固态水含量极低,方案1和2播撒后2 h云中固态水迅速增加,播撒后3~4 h又明显减少,随后变化与未播撒时基本相同,但方案2播撒后固态水在随后的自然降水过程中未恢复至最大量值。未播撒时,逐时固态水(图9f)在15日20时至16日02时呈正态形态分布,15日22时和16日00时为最大净增加与净减少时刻,量级为 1.0×10^{12} kg左右,其余时刻基本为0。进行播撒后逐时固态水变化极为迅速,11:00—17:00,在0线左右呈锯齿状分布,最大减少与增加量都在 2×10^{12} kg左右,15日20时至16日02时方案1变化与未播撒时一致,方案2最大净增加和减少量较未播撒略小,为 0.7×10^{12} kg左右。

对比分析播撒后云中水资源变化可以看出,方案1播撒后,区域内液态水被迅速消耗,变成云中固态水,在云中水凝物相态变化过程中,水汽也被消耗部分,由于方案1播撒后区域内水汽正从净减少向净增加转化,水汽补充迅速,水汽向液态水转化迅速,云中消耗的液态水被迅速补充,使得方案1在自然降水时段云中液态水和固态水与未播撒时基本相同,对自然降水未有影响,因此没有出现明显减雨效果。在方案2播撒后2 h内,区域内液态水被进一步消耗,此时处于区域内水汽补充最迅速时期,云中固态水争食水汽增长,液态水得不到补充,含量持续减少,其后虽然随着自然水物质转化过程,云中液态水仅补充至未播撒时一半,使得方案2在自然降水时段中较未播撒时雨量明显减少,出现减雨效果。

2.5 单站催化前后雨量及微物理量对比分析

播撒冰晶的主要作用是为了改变云中微物理量分布,使得云中微物理量分布在微物理过程的作用下偏向降水一侧,提高云中的降水效率。利用离主城区中心较近的沙坪坝站和增雨量级较大的巴南站的微物理量分布时空图,研究不同方案下云中微物理量变化,了解雨量变化与微物理量对应关系。

图10给出了未播撒、方案1播撒和方案1、2都播撒后沙坪坝站(57516)和巴南站(57518)微物理量及逐时雨量时空分布图,可以看出,沙坪坝站在未播撒时(图10a),云中液态水凝物含量极为丰富,达到 $0.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,由于云层 0°C 层极低,云中液态水基本都是过冷液态水,高度从底层延伸到600~700 hPa,接近 -10°C 层,但是在20:00之前,云中固态水凝物含量极少,低层垂直上升运动极弱,地面降水较少。15日20:00至16日03:00,伴随着600~700 hPa水平风速增加,云中固态水凝物才逐渐增多,高层出现 $10 \sim 30$ 个 $\cdot \text{L}^{-1}$ 的冰晶,低层上升运动增强,液态水凝物抬升,固态和液态水凝物充分混合,地面出现较强降水。16日03:00后,高空风场没有较大波动,地面液态和固态水凝物都减少,云层移出站点,降水过程趋于结束。

方案1播撒后(图10c),在11:00—15:00,中低层出现固态水凝物,含水量为 $0.01 \sim 0.05 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,覆盖范围从底层延伸到700 hPa,云中液态水凝物有明显消耗,含水量从 $0.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 降至 $0.01 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以下,低层有较弱的上升运动出现,固态水凝物较丰富区域有1个 $\cdot \text{L}^{-1}$ 的冰晶,冰晶数浓度高区域存在时间较短,说明有足够过冷水消耗增长,地面降水增加。后期末播撒液态水补充较及时,但15日18:00至16日03:00的低层上升运动持续时间减少,上升运动较强时间段从15日21:00至16日00:00提前到15日19:00—21:00,地面降水在15日21:00至16日03:00略有减少。方案1和方案2都播撒后(图10e),11:00—15:00,微物理量和地面逐时雨量变化与方案1一致,在方案2播撒后的增雨时段(15日17:00—20:00),低层有明显上升运动,云中液相水凝物进一步消耗,含水量从 $0.1 \sim 0.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 降至 $0.01 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以下,过冷液态水基本耗尽,地面降水增加。固态水凝物增加,含水量为 $0.05 \sim 0.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,冰晶数浓度也为1个 $\cdot \text{L}^{-1}$,但延伸的高度和持续时间有所增加,说明方案2播撒后由于云中液态水已消耗极多,有剩余冰晶没有增长,在低层存留时间较长。增雨时段过后,在15日21:00至16日03:00,有液态水补充,但含水量较未播撒时少,上升运动也明显减弱,地面降水随之减少。

巴南站在未播撒时(图10b),云中液态水凝物也极为丰富,云中液态水分布范围与沙坪坝站相似,也是从底层延伸到600~700 hPa,接近 -10°C 层,

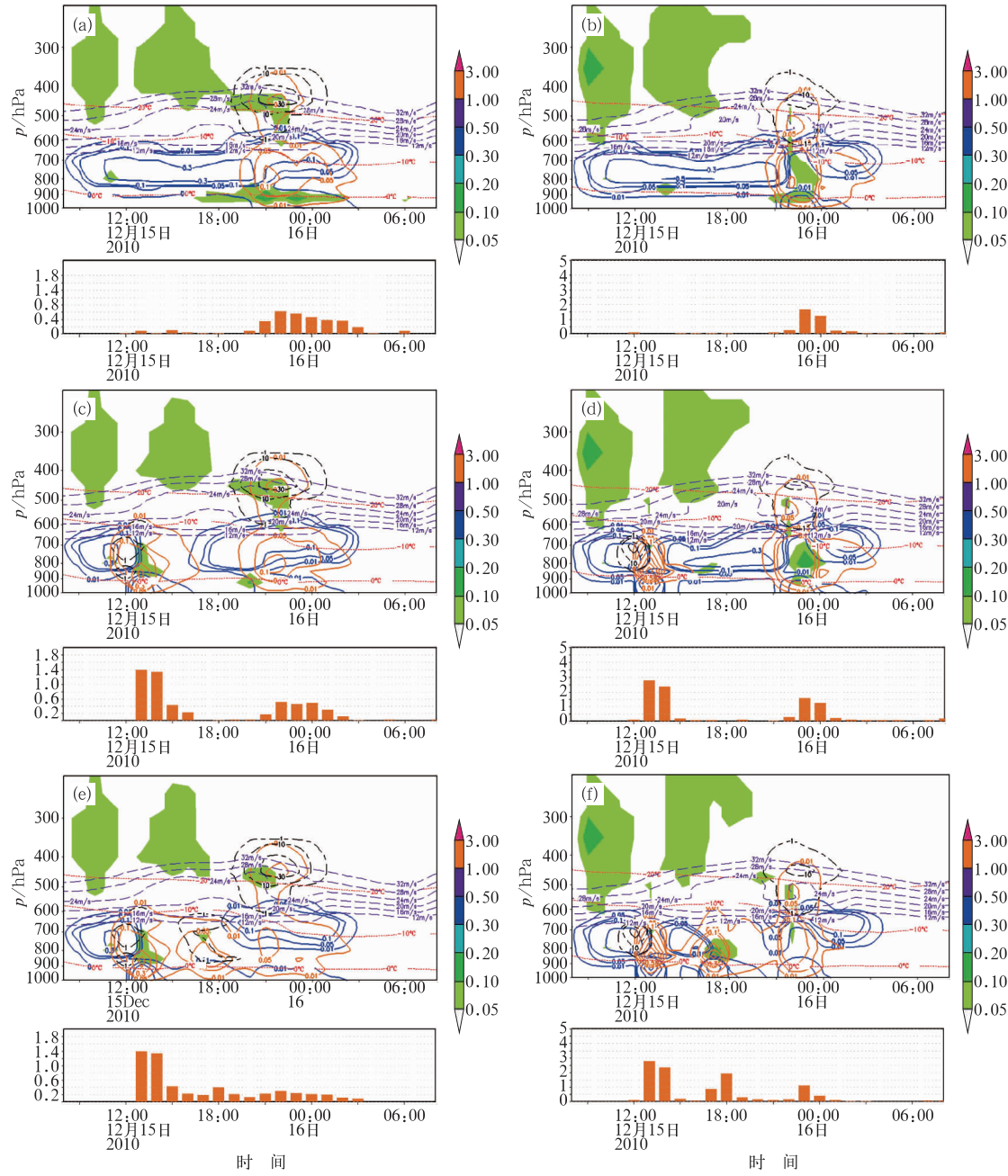


图 10 沙坪坝站(57516)和巴南站(57518)微物理量及逐时雨量时空分布图

(a) 沙坪坝站未播撒时,(b) 巴南站未播撒时,(c) 沙坪坝站方案 1 播撒后,(d) 巴南站方案 1 播撒后,
(e) 沙坪坝站方案 1 和 2 都播撒后,(f) 巴南站方案 1 和 2 播撒后

[填图为垂直风速,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;紫色短虚线为水平风速,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;红色点线为 0°C 、 -10°C 和 -20°C 层位置;
蓝色实线为液态水凝物(云水 Q_c +雨水 Q_r)含水量,单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$;橙色实线为为固态水凝物(冰晶 Q_i +雪 Q_s +霰 Q_g)
含水量,单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$;黑色虚线为冰晶数浓度,单位: $\text{个} \cdot \text{L}^{-1}$;橙色柱状图为逐时雨量,单位: mm]

Fig. 10 Temporal and spatial distributions of microphysical amount and hourly rainfall
at Shapingba Station (57516) and Banan Station (57518)

(a) no seeding at Shapingba Station, (b) no seeding at Banan Station, (c) experiment 1 at Shapingba Station,
(d) experiment 2 at Banan Station, (e) experiments 1 and 2 at Shapingba Station, (f) experiments 1 and 2 at Banan Station
[Shade is vertical velocity, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; purple short broken line is horizontal wind speed; red point line is the position of 0°C , -10°C
and -20°C ; blue line is liquid water (cloud water + rain water, unit: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$); orange line is solid water (ice + snow + graupel,
unit: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$); black broken line is ice number concentration, unit: L^{-1} ; orange bar chart is hourly rainfall, unit: mm]

基本以过冷液态水形式存在,但含水量较沙坪坝站高,达到 $0.5\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,在 21:00 前,基本上也没有固态水凝物存在,地面降水极少。在 15 日 22:00 至 16 日 02:00,600~700 hPa 水平风速有波动增加,低层有弱上升运动,高空有 $1\sim 10\text{ 个}\cdot\text{L}^{-1}$ 的冰晶区域,固态水凝物含量丰富,含水量为 $0.05\sim 0.3\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,液态水水凝物含量较少,含水量为 $0.01\sim 0.1\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,特别是在地面降水较大的 23:00 和 16 日 00:00,液态水凝物含水量更小,为 $0.01\sim 0.05\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,且基本都在 600~700 hPa 分布,低层含水量为 $0.01\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以下,说明液态水凝物在高空冰晶自然播撒情况下,有极大的消耗,转化成固态水凝物,在下落过程中融化产生降水,16 日 00:00—03:00,高空自然冰晶播撒减弱,部分液态水没有被消耗,地面降雨量也减小。03:00 以后,云系移出巴南站区域,降水过程趋于结束。

方案 1 播撒后(图 10d),在 11:00—12:00,液态水消耗明显,地面有较强降水出现,在 12 时有 $1\sim 10\text{ 个}\cdot\text{L}^{-1}$ 的冰晶区域,冰晶分布在液态水含量丰富区,12:00,播撒冰晶完全增长,低层有较丰富固态水凝物,最大含水量达到 $0.5\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,地面降水达到最大,雨量为 2.7 mm 。其后雨量减弱,云中液态水凝物含量又迅速增加,在 18:00,达到 $0.5\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,固态水凝物逐渐减弱,18:00 为 $0.01\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以下。在 15 日 22:00 至 16 日 02:00 自然降水的主要降水时段,云中微物理分布和地面降水在播撒作业后与未播撒基本一致,说明巴南站上空水汽输送条件比沙坪坝站上空水汽输送条件好,消耗的液态水凝物能够得到较快的补充,不影响其随后降雨量。方案 1 和 2 都播撒后(图 10f),在方案 2 播撒后的增雨时段(15 日 17:00—20:00),云中微物理量

和地面雨量变化与沙坪坝站一样,过冷液态水凝物被大幅消耗,固态水凝物明显增加,地面有较强降水出现。与沙坪坝站不同的是,巴南站上空液态水补充较为迅速,播撒的冰晶被完全消耗,没有剩余冰晶存在,液态水被播撒冰晶完全转化成固态水,释放潜热使得云中上升运动加强,地面降水增量较沙坪坝站明显,最大雨量达到 1.5 mm 。其后未播撒的主要降水时段(15 日 22:00 至 16 日 02:00),空中水凝物也有所补充,但含水量较未播撒前少,自然冰晶形成的固态水凝物含量也减少,地面降水也随之减少,小时降雨量在 0.5 mm 左右。

2.6 单站实况降水分析

从沙坪坝站和巴南站逐小时实况雨量分布图(图 11)可以看出,沙坪坝站和巴南站在 24 h 降水过程中,都有 4 个降水峰值区,沙坪坝站是在 15 日 09:00、12:00、18:00 和 22:00,对应降水较大的阶段分别为 08:00—09:00、12:00—15:00、17:00—20:00 和 21:00 至 16 日 01:00,降水在 16 日 03:00 结束。巴南站降水峰值在 09:00、14:00、19:00 和 21:00,对应降水较大阶段是 08:00—09:00、14:00—15:00、18:00—19:00 和 21:00—23:00,降水在 16 日 02:00 基本结束,其后有 0.1 mm 微量降水。将单站实况与方案 1 和 2 都催化后雨强分布进行对比,可以看出,由于模式需要一定起转时间,播撒催化后出现 3 个降水增雨时段,08:00—09:00 较强降水时段未能模拟出来,但其余时段与实况降水较强时段比较一致,除巴南站实况 14:00 降水在催化模拟 12:00 出现。数值模拟的降水强度较实况小,但由于模式本身模拟较实况也偏小,数值模拟催化结果还是有一定的可信度的,这次飞机播撒一定

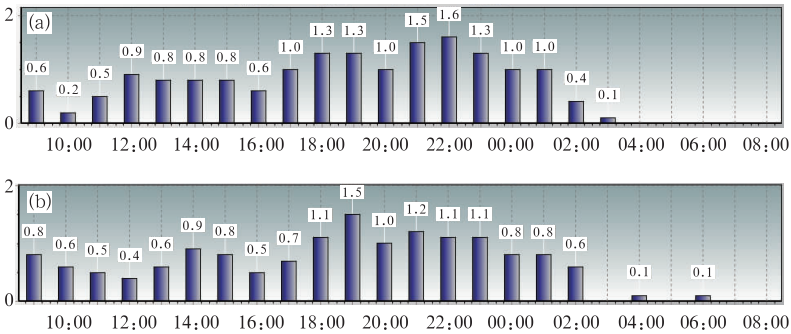


图 11 沙坪坝站(a)和巴南站(b)逐小时实况雨量分布
Fig. 11 Hourly observed rainfall at Shapingba Station (a)
and Banan Station (b)

程度上取得了较好的增雨效果。

3 结 论

利用国家气象中心 GRAPES 业务模式耦合混合相双参数云微物理方案,对 2010 年 12 月 15 日的两次飞机人工增雨作业过程进行了催化数值模拟分析。分析得出以下结论。

(1) GRAPES 业务模式基本能给出正确的中低层天气形势场,能较好地模拟本次降水的动力结构,模式模拟的降水量较实况偏小,也略小于 3 家全球模式,这可能与模式的起转时间有关,但较大降水落区和范围基本可信。

(2) 按照实况飞行的路径、高度和剂量设计催化数值方案,对两次飞行播撒进行数值模拟,发现两次播撒都取得了增加降雨量的效果,24 h 平均增雨量在 3~5 mm,最大增雨量达到 7 mm,二次播撒后增雨作业区累计降水总量较未播撒时增加约一倍,第二次播撒在自然降水时段出现明显的减雨现象。

(3) 每次播撒增雨效果在 4 h 内,播撒后 1~2 h 雨量增加最大,小时最大增雨量在 3~4 mm,增雨区域初期与播撒区域一致,随时间延长而在播撒区附近扩散。第一次播撒后未出现明显减雨现象,第二次播撒后 5~8 h 出现减雨,减雨最大为 1 mm,在第二次播撒后第六小时出现,减雨区位于主城区中心略偏东。

(4) 播撒作业不会改变播撒区域水汽净减少—净增加—净减少大的主体趋势,但可以短时间内改变水汽净增加流出速度,影响空中水汽总量变化。第一次播撒时,区域水汽处于从净减少向净增加转换阶段,播撒冰晶消耗液态水,转化成固态水,水汽流入速度加大,向液态水转化加快,液态水迅速恢复。第二次播撒时,区域内液态水被进一步消耗,此时处于区域内水汽补充最迅速时期,但云中固态水争食水汽增长,液态水得不到补充,含量持续减少,其后虽然随着自然水物质转化过程,云中液态水仅补充至未播撒时的一半。

(5) 单站微物理量时空分布演变也显示了播撒后冰晶通过消耗大量过冷液态水,转化为固态水凝物,释放潜热,增强上升运动,增加降水量。当空中

水汽输送充沛,有足够液态水凝物补充消耗时,播撒作业能持续增加降水。当空中水汽输送较弱,液态水凝物补充有限时,播撒使得播撒阶段增加降雨量,在其后自然降水时段,云中水汽向液态水转化较弱,上升运动随之减弱,自然降水阶段降雨量减弱,出现减雨,但增雨量要大于减雨量,播撒效果仍为增加降水。

(6) 设计的催化播撒方案进行播撒模拟后,与实况降水在较强降水区域有较好的对应性,催化模拟具有一定的可信度。

参考文献

- 陈小敏,刘奇俊,章建成. 2007. 祁连山云系云微物理结构和人工增雨催化个例模拟研究. 气象, 33(7): 33-43.
- 陈小敏,邹倩,李轲. 2011. 重庆地区夏季一次降水过程及增雨潜力的数值模拟分析. 气象, 37(9): 1070-1080.
- 方春刚,郭学良,王盘兴. 2009. 碘化银播撒对云和降水影响的中尺度数值模拟研究. 大气科学, 33(3): 621-633.
- 高茜,王广河,史月琴. 2011. 华北层状云系人工增雨个例数值研究. 气象, 37(10): 1241-1251.
- 花丛,刘奇俊. 2011. 登陆台风“罗莎”中云物理特征的数值模拟研究. 热带气象学报, 27(5): 626-638.
- 李大山,章澄昌,许焕斌,等. 2002. 人工影响天气现状与展望. 北京: 气象出版社, 325-355.
- 马占山,刘奇俊,秦琰琰,等. 2009. 利用 TRMM 卫星资料对人工增雨云系模式云微观场预报能力的检验. 气象学报, 67(2): 206-271.
- 毛节泰,郑国光. 2006. 对人工影响天气若干问题的探讨. 应用气象学报, 17(5): 644-646.
- 史月琴,楼小凤,邓雪娇,等. 2008. 华南冷锋云系的人工引晶催化数值试验. 大气科学, 32(6): 1256-1275.
- 孙晶,楼小凤,史月琴,等. 2009. 祁连山冬季降雪个例模拟分析(II): 人工催化试验. 高原气象, 28(3): 496-506.
- 严采繁,陈万奎. 2001. 统计评估人工增雨效果的一些问题研究. 应用气象学报, 12(Z1): 80-87.
- 叶家东,范蓓芬. 1982. 人工影响天气的统计数学方法. 北京: 科学出版社, 264-336.
- 曾光平. 1999. 非随机化人工增雨试验效果的统计模拟研究. 应用气象学报, 10(2): 255-256.
- 郑国光,陈跃,王鹏飞,等. 2005. 人工增雨天气研究中的关键问题. 北京: 气象出版社, 27-31.
- Rosenfeld D, Woodley W L. 1993. Effects of cloud seeding in west Texas: Additional results and new insights. J Appl Meteor, 32(12): 1848-1866.
- Meyers M P, DeMott P J, Cotton W R. 1995. Comparison of seeded and non-seed orographic cloud simulations with an explicit cloud model. J Appl Meteor, 34: 834-846.