

DOI:10.13718/j.cnki.xsxb.2021.12.010

湖南省飞机人工增雨预报技术研究^①

丁 莉^{1,4}, 丁元武², 唐 林¹,
汪 玲¹, 李 蔚³, 高 沁¹, 李 琼¹

1. 湖南省人工影响天气领导小组办公室, 长沙 410118; 2. 河南省南阳市气象局, 河南 南阳 473000;
3. 湖南省气象台, 长沙 410118; 4. 气象防灾减灾湖南省重点实验室, 长沙 410118

摘要: 为提高湖南省飞机人工增雨预报技术, 统计总结了湖南省多年飞机增雨作业个例, 得到适合湖南省飞机人工增雨的天气分型、天气指标和云模式云宏观作业指标. 为验证云模式的可靠性, 采用 TS 评分标准定量评估模式模拟降水结果, 并定性对比分析模式预报的云宏、微观场. 将有利于飞机人工增雨作业的天气系统归纳为 5 种类型: 热带低压型、副高边缘型、东风带系统型、高空低槽型和中低层切变型, 并初步建立了湖南省飞机人工增雨的作业指标. 利用总结的天气分型和作业指标, 设计飞机作业方案, 作业后对作业效果进行评估, 并检验模式预报结果. 发现应用总结的天气分型和指标设计飞机作业方案, 作业效果好, 模式预报结果较好, 可作为参考.

关 键 词: 飞机人工增雨; 天气分型; 作业指标; 模式检验

中图分类号: P481; S423 文献标志码: A 文章编号: 1000-5471(2021)12-0063-09

Study on Forecast Technology of Aircraft Artificial Precipitation in Hunan Province

DING Li^{1,4}, DING Yuanwu², TANG Lin¹,
WANG Ling¹, LI Wei³, GAO Qin¹, LI Qiong¹

1. Hunan Weather Modification Office, Changsha 410118, China;
2. Nanyang Meteorological Bureau, Nanyang Henan 473000, China;
3. Hunan Meteorological Observatory, Changsha 410118, China;
4. Hunan Key Laboratory of Meteorological Disaster Prevention and Reduction, Changsha 410118, China

Abstract: In order to improve the forecast technology of aircraft artificial precipitation in Hunan Province, a statistical summary was made of several aircraft precipitation enhancement cases in Hunan for many years, and the weather classification, weather index and cloud model cloud macro operation index suitable for artificial precipitation of aircraft in Hunan were obtained. In order to verify the reliability of the cloud model, TS scoring standard was used to quantitatively evaluate the simulated precipitation results and qualitatively compare the cloud macro and micro fields predicted by the model. The weather systems conducive to aircraft artificial precipitation were classified into five types: tropical low-pressure type, marginal

① 收稿日期: 2021-01-25
基金项目: 湖南省气象局项目(NLJS12); 湖南省气象局短平快课题(XQKJ18B077).
作者简介: 丁 莉, 硕士研究生, 工程师, 主要从事人工影响天气方面的研究.
通信作者: 丁元武, 工程师.

subtropical high type, easterly belt type, low-trough type and shear type. The indicators of artificial precipitation of aircraft in our province were preliminarily established. The aircraft operation scheme is designed with the summarized weather classification and operational indicators. After the operation, the operational effect is evaluated and the model forecast results are verified. It is found that the application of summarized weather types and indicators to design aircraft operation scheme has good operation effect. Model forecast result is good, which can be used as a reference.

Key words: artificial precipitation of aircraft; weather classification; operating indicators; model test

湖南降水变率大, 导致年、季尺度降水的时空差异性, 旱涝灾害多发^[1], 夏秋季(7~10月)主要受副热带高压天气系统控制, 常常出现持续高温少雨时段, 形成干旱造成人畜饮水困难、作物生长受限甚至死亡. 干旱季节适时开展人工增雨作业是防灾减灾的重要手段. 目前该省人工增雨主要有地面高炮、火箭和飞机作业等方式, 其中飞机人工增雨作业因其作业影响区域广泛, 作业效果良好, 是该省夏秋季增雨抗旱的主要手段. 近年来随着社会需求的增大, 飞机人工增雨作业也由以往的应急服务工作转化为常态化工作. 不同天气系统的云雨资源及人工增雨潜力差别很大, 认识不同天气系统的特征, 针对不同天气类型, 有效判断其是否适合开展飞机作业及适宜作业的区域范围, 将与作业效果有直接关系.

有学者针对这些问题开展了一系列研究: 王璠等^[2]、林长城等^[3-4]、贾效忠^[5]对当地天气影响系统进行了划分, 廖晓荔等^[6]建立了重庆市低槽云系人工增雨作业概念模型, 张一平等^[7]、周亦凌等^[8]应用雷达资料、气象资料建立了河南、山东省的作业指标. 各地也是根据自己的地域特点, 针对不同季节、云系统设计作业方案, 探索本省的作业技术. 游积平等^[9]、林丹^[10]、杜毓龙等^[11]、韦增岸等^[12]研究了广东、四川、陕西、广西飞机增雨作业技术, 何媛等^[13]、武艳等^[14]研究了海南、徐州的地面增雨作业技术, 白先达等^[15]提出了适合桂林地区不同季节的人工增雨作业方案, 孙晶等^[16]对南方三类云系云结构预报结果和增雨作业条件进行了分析.

之前学者的研究多集中在北方层状云系^[17-18], 针对层积混合云系的研究较少, 而湖南省夏秋季多受层积混合云系的影响. 层积混合云系的作业指标与层状云系的作业指标是否有差别, 如何更好地应用人工影响天气模式, 确定一套适合湖南的作业指标体系也是亟待解决的问题. 本文基于此开展研究, 初步建立了湖南省飞机人工增雨的作业天气分型和作业指标, 以期为湖南省飞机人工增雨作业提供科学性指导.

1 资料与方法

本文所用资料主要有: 中国气象局常规高空和地面观测资料, 湖南省自动站逐时加密的地面降水资料, 中国气象局人影中心的耦合 CAMS 复杂微物理方案的 GRAPES_CAMS(以下简称 GRAPES)和 MM5_CAMS(以下简称 MM5)中尺度模式^[19-20].

GRAPES 和 MM5 模式预报产品主要有云宏观场物理量(云带、垂直累积液态水、垂直累积过冷水、云顶高度、云顶温度等)、云微观场物理量(云水比含水量、雨水比含水量、冰晶数浓度等).

为定量评估模式模拟的降水结果, 采用 TS 评分标准^[21], 降水(W)划分为小雨($0.1 \text{ mm} \leq W < 10 \text{ mm}$)、中雨($10 \text{ mm} \leq W < 25 \text{ mm}$)、大雨($25 \text{ mm} \leq W < 50 \text{ mm}$)、暴雨($W \geq 50 \text{ mm}$), 将模式模拟的降水结果插值到湖南地区区域自动站, 然后做 TS 评分检验. TS 评分公式为

$$TS = \frac{N_A}{N_A + N_B + N_C}$$

式中, N_A 为预报正确的站点数, N_B 为空报的站点数, N_C 为漏报的站点数. TS 评分值反映了预报降水位于某一等级的准确率, 介于 0~1 之间, 越接近 1 代表预报越好.

2 天气分型和作业指标判别

分析湖南省 2013—2017 年共计 43 次飞机增雨作业天气影响系统(表 1), 地面影响系统主要有冷锋、气旋、冷高压、低压区(倒槽), 高空影响系统主要是低槽、切变线、低涡. 湖南省夏秋季飞机增雨作业地面系统主要是受低压区(倒槽)和冷锋的影响, 受气旋和冷高压影响的个例较少; 高空则受低槽、切变线和低

涡的影响, 次数最多的是地面受低压区(倒槽)影响, 高空受低槽影响, 此类天气多是受台风影响, 与夏秋季台风频发有关. 分析其主要影响系统, 得到 5 类主观的天气分型: 热带低压型、副高边缘型、高空低槽型、中低层切变型、东风带系统型.

表 1 湖南省 2013—2017 年夏秋季飞机增雨作业天气分型统计

地面影响系统	冷 锋			气旋	冷高压	低压区(倒槽)		
高空影响系统	低槽	切变线	低涡	低槽	低涡	低槽	切变线	低涡
次数	6	3	8	3	2	10	4	7
百分比/%	13.95	6.98	18.60	6.98	4.65	23.26	9.30	16.28

建立适用于本地的人影作业指标, 有利于提高人影作业水平和效果. 近年来, 基于 GRAPE, MM5 和 WRF 不同动力框架耦合 CAMS 云物理方案的高时空分辨率中(小)尺度人工影响天气模式系统已投入业务应用. 通过检验工作, 发现云模式模拟效果较好^[22], 可以通过模式来判别作业条件. 通过分析 2013—2018 年湖南省 82 次飞机增雨作业个例, 归纳总结出湖南省飞机增雨作业指标:

天气指标: 当湖南省处于热带低压型、副高边缘型、高空低槽型、中低层切变型、东风带系统型 5 种天气分型形势下, 850 hPa 相对湿度在 80% 以上, 700 hPa 相对湿度在 80% 以上, 适宜开展飞机增雨作业.

云宏观物理量主要有: 云带、垂直累积液态水、垂直累积过冷水、云顶高度、云顶温度. 云宏观指标中, 当云带值在 0.1 mm 以上, 垂直累积过冷水大于等于 0.01 mm, 垂直累积液态水大于等于 0.1 mm, 云顶高度在 5~10 km 之间, 云顶温度在-5℃~-40℃之间, 有利于开展飞机人工增雨作业, 其中垂直累积过冷水是判别作业条件的重要指标.

云微观物理量主要有: 云水比含水量、雨水比含水量、冰晶比含水量、雪比含水量、霰比含水量、冰晶数浓度、雨滴数浓度、雪数浓度、霰数浓度. 当云水比含水量和雨水比含水量大于等于 0.01 g/kg、冰晶数浓度小于等于 10 个/L 以及自然冰晶缺乏的情况下, 有利于开展飞机人工增雨作业. 表 2 列出了其中 10 次飞机增雨作业个例的具体数据.

表 2 湖南省飞机增雨作业个例数据

日期	20150918	20151028	20160831	20160909	20161012	20170808	20170823	20170904	20180830	20181010
飞行区域	岳阳、常德、张家界	湘西、张家界、常德、岳阳	衡阳、株洲、邵阳、娄底	衡阳、邵阳、娄底	常德、怀化、张家界、湘西	湘西、张家界、常德、岳阳	衡阳、永州、邵阳	永州、郴州	邵阳、怀化、娄底、益阳	邵阳、永州、郴州、衡阳
天气分型	中低层切变型	高空低槽型	高空低槽型	高空低槽型	副高边缘型	高空低槽型	热带低压型	热带低压型	热带低压型	中低层切变型
850 hPa 相对湿度/%	80	80	80	80	90	80	80	80	90	90
700 hPa 相对湿度/%	80	80	80	80	90	80	80	80	90	80
云带/mm	1~1.5	1~1.5	0.1~1.0	0.1~1.5	0.1~0.5	0.5~4.0	0.1~0.5	0.1~1.0	0.1~10.0	0.1~0.5
垂直累积液态水/mm	0.1	0.1~1.0	0.1	0.1	0.1	0.1~2.5	0.1	0.1	0.1	0.1
垂直累积过冷水/mm	0.01	0.01	0.01	0.01	0.30	0.01	0.01	0.01	0.01~2.00	0.01~0.10
云顶高度/km	9	5	5~6	5~6	6	7~8	5~6	5~6	10	5~7
云顶温度/℃	-20~0	-20~0	-10~0	-25~0	-5	-20~0	-25~0	-25~0	-40	-30~0
云水比含水量/(g·kg ⁻¹)	0.01~0.05	0.01~0.10	0.01~0.05	0.01	0.01	0.10~0.30	0.01~0.10	0.01	0.01~0.70	0.01
雨水比含水量/(g·kg ⁻¹)	0.01~0.05	0.01~0.10	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01~0.50	0.01
冰晶数浓度/(个·L ⁻¹)	0~10	1	1	1~10	10	1~10	1	1	1~10	1

3 个例应用

2016 年 8 月湖南降水空间分布不均, 湘西北降水偏多, 湘东北至湘南一带大部降水偏少 2 成左右, 其中岳阳、株洲北部、衡阳南部、郴州西北部、永州中部降水偏少 2~5 成, 全省有 18 县市达到气象干旱标准, 气象干旱区主要维持在衡阳、永州、郴州地区, 针对旱情湖南开展了飞机增雨作业。

以 2016 年 9 月 1 日的一次飞机增雨作业为例, 应用研究的天气分型和作业指标, 分析此次作业的天气条件, 确定作业方案, 作业后对作业效果进行评估, 并检验模式的预报性能。

3.1 作业指标判别及作业方案制定

此次作业是一次高空低槽型天气过程, 高空槽配合中低层切变, 700 hPa 和 850 hPa 湘中以南地区相对湿度超过 90%(图 1), 符合开展飞机增雨的天气分型和指标。

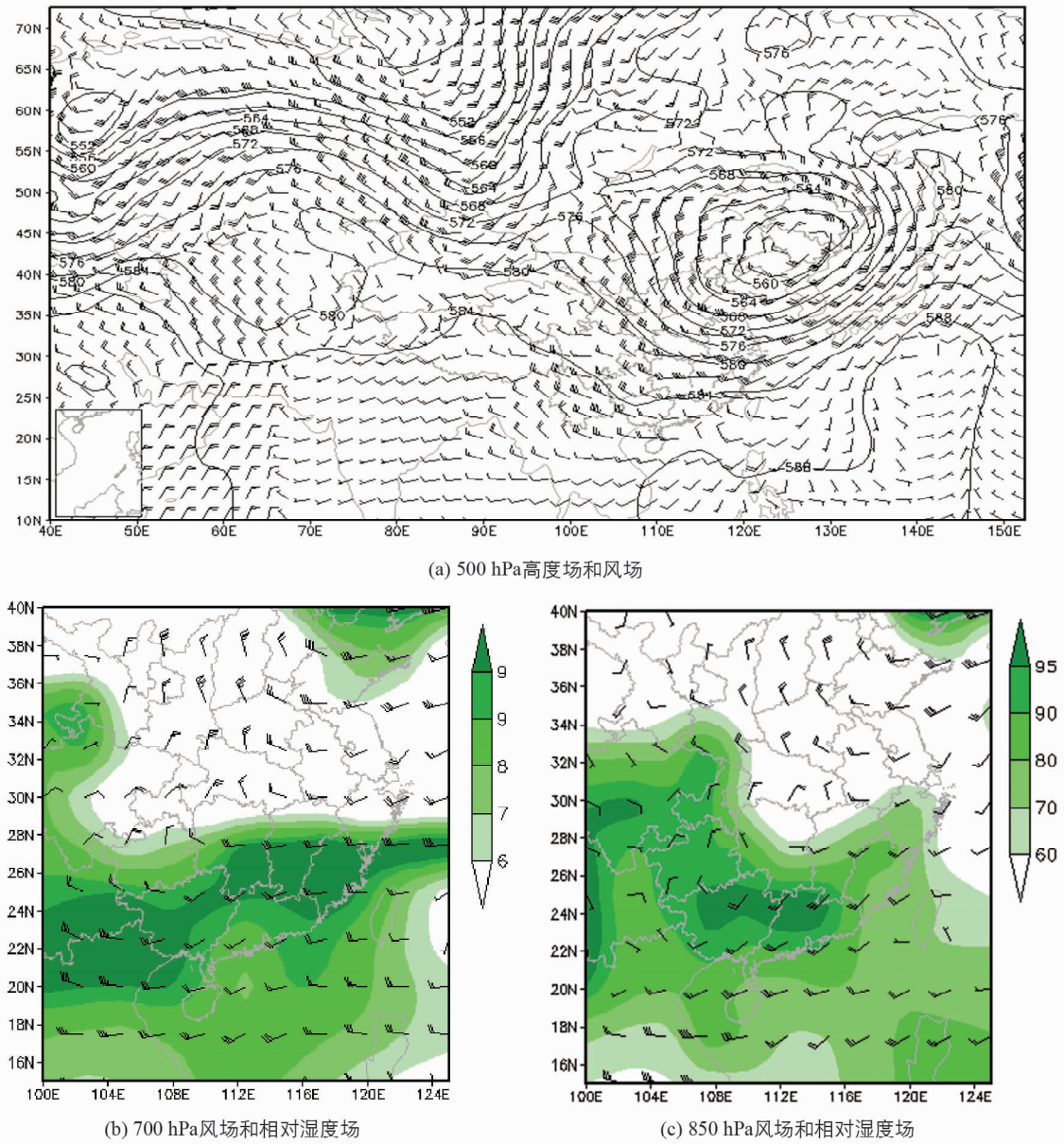


图 1 2016 年 9 月 1 日 08 时天气形势

综合 GRAPES_CAMS 模式预报结果: 长沙、衡阳、邵阳、娄底一带云带在 0.2~1.5 mm 之间, 垂直累积过冷水为 0.01~0.30 mm, 垂直累积液态水为 0.1~1.0 mm. 进一步对 27.5°N 做剖面, 湘中一带为冷暖混合云降水, 云水丰富在 0.1~0.7 g/kg 之间, 0 °C 高度位于 5 000 m 左右, 冰晶数浓度不足 10 个/L; 雪和霰主要分布在 700 hPa 以上, 在 0 °C 高度以下的暖区存在尚未融化的雪和霰, 分布大量的雨水. 有一

定的增雨潜力,符合云宏、微观指标,典型时刻云系分布特征见图 2 和图 3.

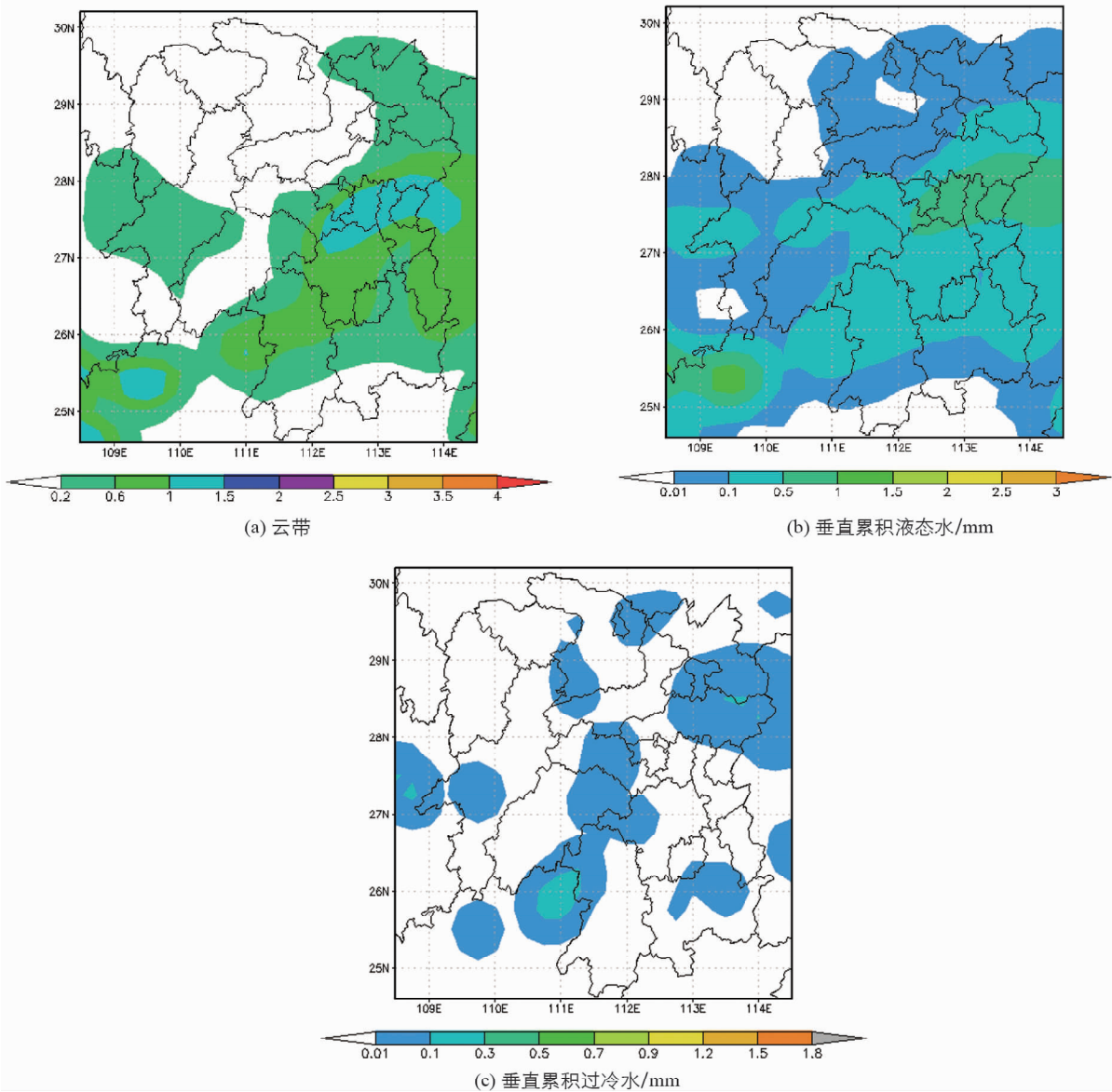


图 2 2016 年 9 月 1 日 08 时模式预报的云宏、微观场

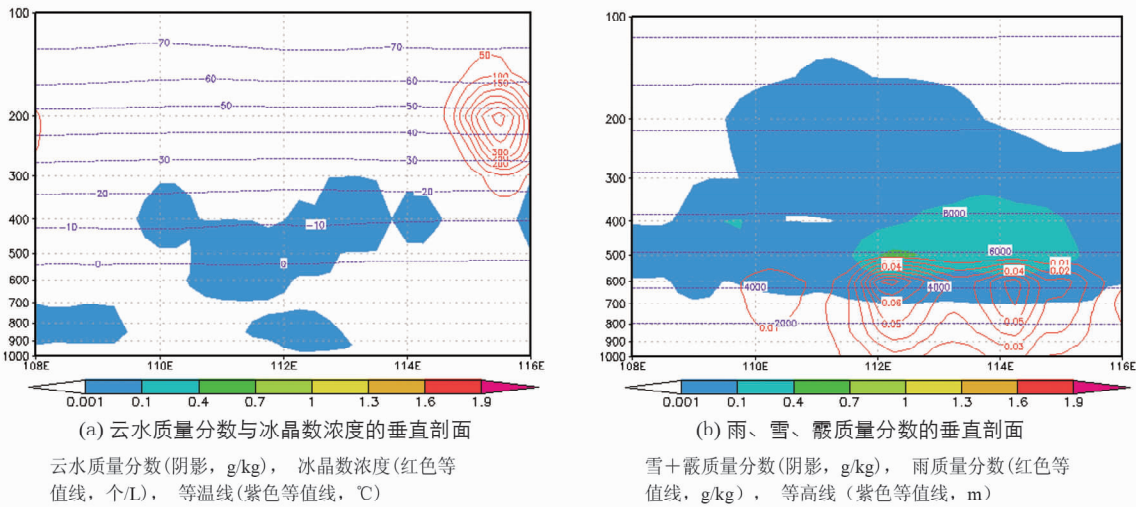


图 3 2016 年 9 月 1 日 08 时沿 27.5°N 东西向水成物垂直剖面

3.2 作业方案制定及实际作业情况

根据指标判别结果并结合实际作业需求,选择增雨条件较好的区域进行飞行航线设计(图 4)。计划于 2016 年 9 月 1 日 09:30 在长沙、衡阳、邵阳、娄底、湘潭一带开展飞机增雨作业,作业高度为 5 500 m,催化剂使用 10 根 AgI 烟条,实际飞行作业概况见表 3。

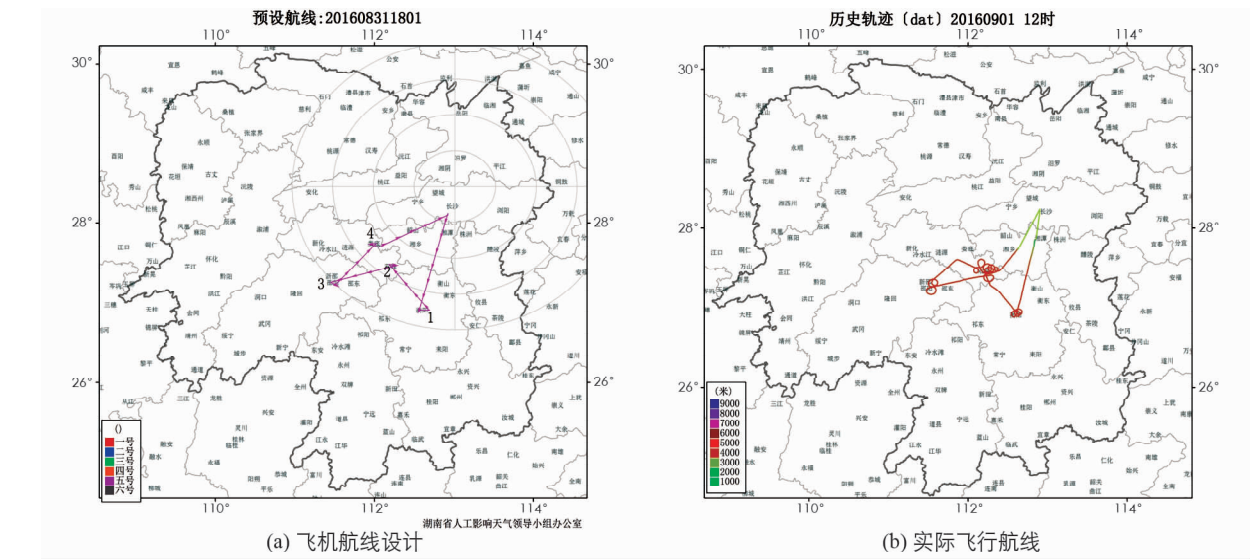


图 4 设计飞行航线和实际飞行航线

表 3 飞行作业概况

飞行作业	参 数
飞行时间	09:30—12:40
催化时间	10:09—12:06
催化层高度/m	约 5 500
催化层风向/°	220
催化层风速/(m·s ⁻¹)	12
催化剂(AgI 烟条)用量/根	10
催化剂型号	RFY-1, AgI 量为 12.5 g/根, 成核率(−10 ℃)为 1.03×1 015 个/g

3.3 作业效果分析

作业期间邵阳、衡阳、娄底一带产生了明显降水,根据催化剂扩散选定作业影响区,并在作业影响区的上风向选取对比区,利用多参数区域动态对比分析法(K 值法),计算作业前、作业时的 K 值

$$K=R_1/R_2$$

式中 R_1 为影响区平均雨量, R_2 为对比区平均雨量。作业前 1 h 的 K 值为 1.16, 作业时的 K 值为 1.46。若没有催化作业则假设作业时的 K 值与作业前的 K 值一致,估算出无催化作业情况下影响区的降水量,实际影响区降水量较估算的无催化作业情况下影响区的降水量增加了 0.9 mm,整个过程影响区增雨约 22%。

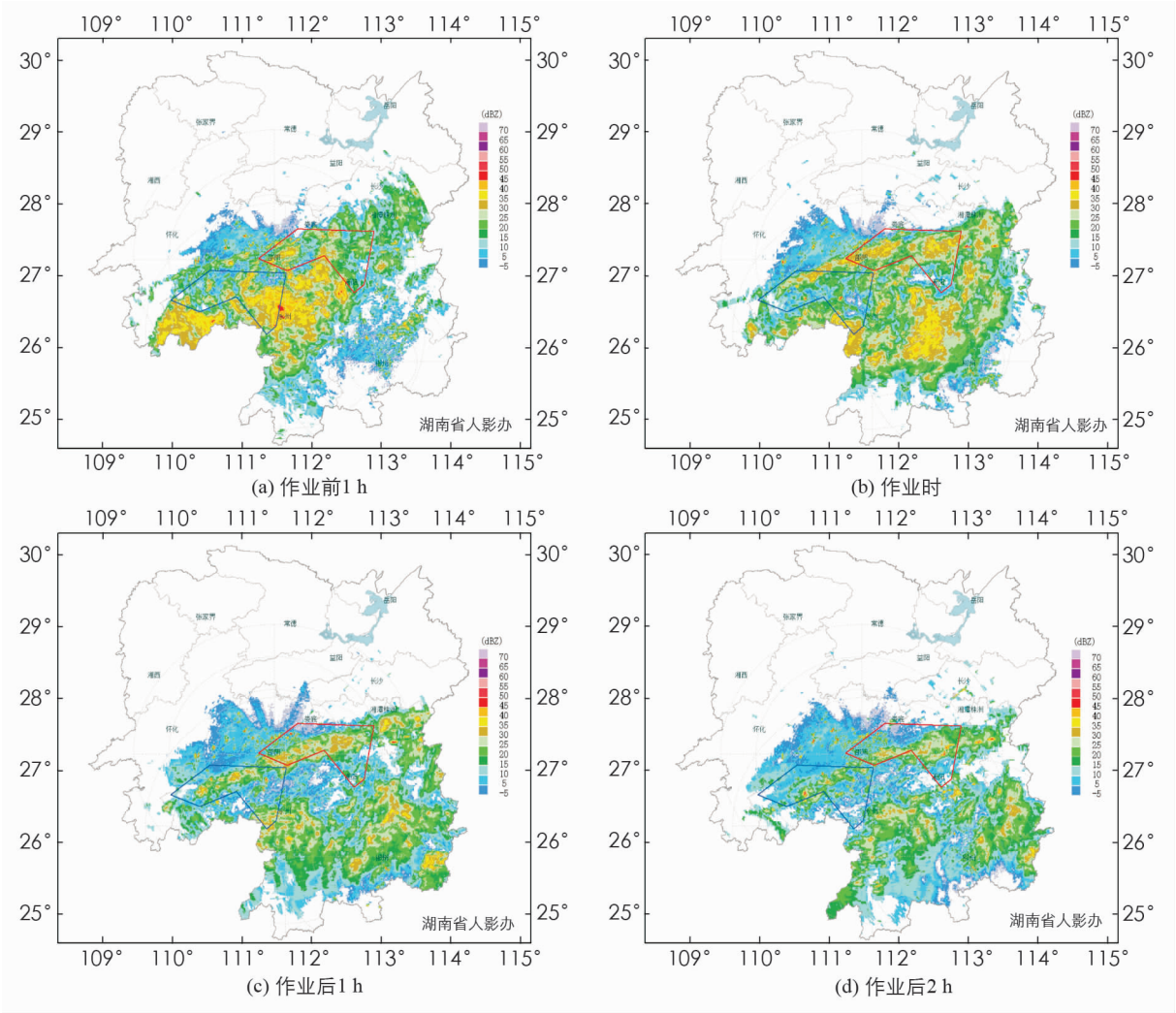
通过直观物理对比检验,对比作业前后影响区和对比区雷达参数变化,可以发现作业时影响区雷达回波有明显增强(图 5),而对比区雷达回波没有增强,作业后影响区雷达回波逐渐减小。

根据作业设计的外场飞机作业方案,增雨效果较好,指标可行,实用性强,能够为外场作业设计提供依据。

3.4 模式检验

首先对湖南省应用的两个人影模式 GRAPES 模式和 MM5 模式做 2016 年 9 月 1 日 24 h 降水 TS 评分检验(表 4),可以看到 GRAPES 模式模拟的小雨和晴雨预报明显优于 MM5, GRAPES 模式的晴雨预报 TS

评分达到了 0.794, 小雨量级 TS 评分达到 0.667, 模式降水预报准确率较高, 对预报较好的 GRAPES 模式的云宏、微观物理量做定性对比检验结果见表 5.



红色框为影响区, 蓝色框为对比区.

图 5 作业前、作业时和作业后雷达回波变化

表 4 两种模式降水 TS 评分

	小雨	中雨	大雨	暴雨	晴雨预报
GRAPES	0.667	0.182	0	0	0.794
MM5	0.604	0.344	0	0	0.629

表 5 2016 年 8 月 31 日至 9 月 1 日降水过程预报的湖南地区云和降水特征与实况对比检验结果

云系特征	预报	实况
云系性质	层积云	层积云
系统进入湖南省时间	1 日 08 时	1 日 08 时
系统移出时间	1 日 14 时	1 日 14 时
云系移动方向	东南	东南
云系移动速度/(km · h ⁻¹)	40	30
云顶高度范围/km	5~13	3~12
云顶温度范围/℃	-60~-5	-40~-5
24 h 地面累积降水量	小雨	小到中雨

对比雷达回波垂直剖面 and 对应位置的模式云垂直结构剖面(图 6), 实况层积云系深厚, 具有冷暖混合云结构, 云顶高度约为 10 km, 回波大值区位于 4~7 km, 模式预报的层积云云顶高度和水凝物质量分数大值区位置与实况回波高度位置基本一致, 但预报水平位置整体偏东, 西边出现空报。

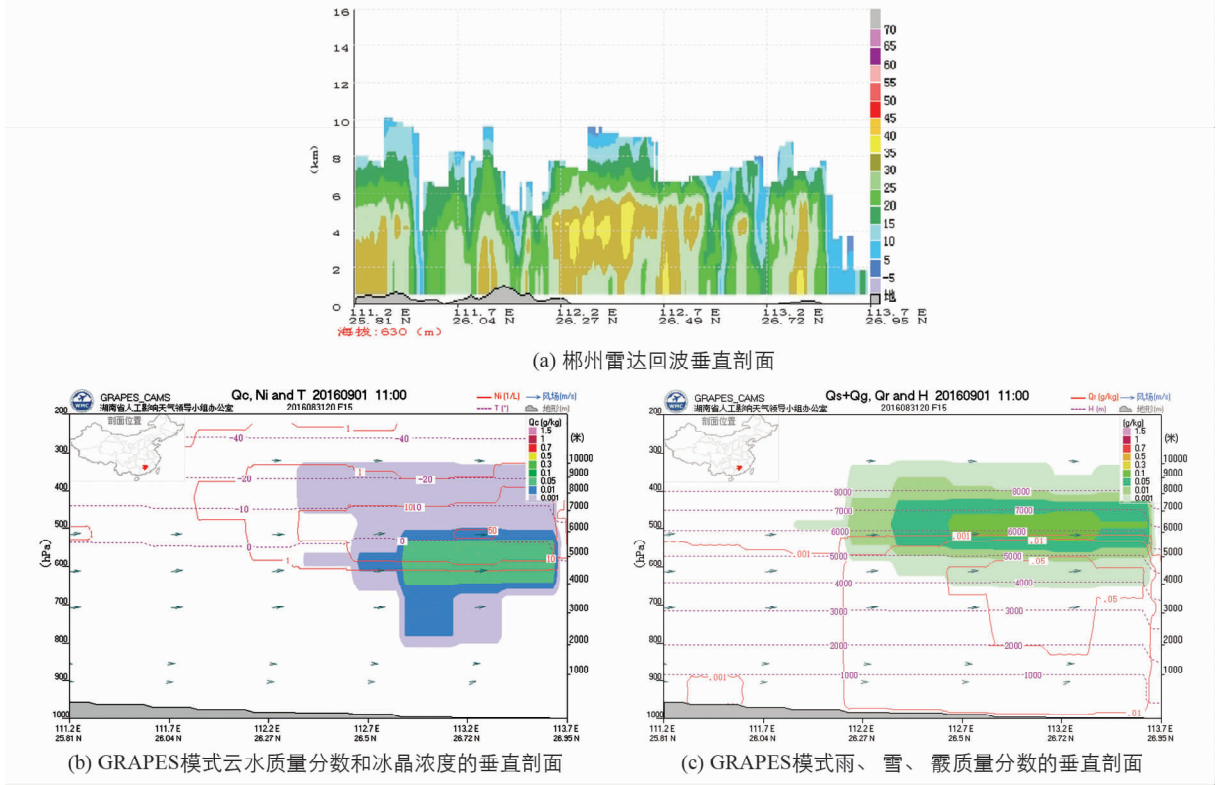


图 6 2016 年 9 月 1 日 11 时雷达回波与模式预报云垂直结构对比

4 结论与讨论

湖南省有利于人工增雨的天气形势主要有 5 种类型：热带低压型、副高边缘型、东风带系统型、高空低槽型和中低层切变型。建立了有利于飞机人工增雨作业指标：850 hPa 相对湿度在 80% 以上，700 hPa 相对湿度在 80% 以上；云宏、微观指标参考意义较大的参量主要是云带、垂直累积过冷水和冰晶数浓度。通过 2016 年 9 月 1 日飞机人工增雨作业个例检验，作业区降水明显，效果较好。

由于受到探测装备的限制，利用模拟结果分析的作业条件判别指标与实际条件存在差异以及在实际应用中存在不确定性，在后期应注意模式结果的修订。

参考文献：

[1] 符 静, 旷 微, 邓运员, 等. 湖南省近 56 年降水变化趋势及空间特征 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2021, 43(2): 110-119.

[2] 王 璘, 李宗龚, 王劲松, 等. 甘肃省秋季飞机人工增雨天气系统分型 [J]. 气象, 2007, 33(1): 94-98.

[3] 林长城, 姚展予, 林 文, 等. 福建省古田试验区云系回波特征与人工增雨作业条件分析 [J]. 大气科学学报, 2017, 40(1): 138-144.

[4] 林长城, 陈彬彬, 隋 平, 等. 闽西北地区降水回波特征和人工增雨作业条件分析 [J]. 气象科技, 2011, 39(6): 697-702.

[5] 贾效忠. 甘肃临夏地区人工降雨气候背景分析 [J]. 灾害学, 2000, 15(4): 34.

[6] 廖晓荔, 夏 杰, 廖向花. 重庆市低槽云系人工增雨作业概念模型 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2018,

43(3): 116-124.

[7] 张一平,牛淑贞,王国安,等. 河南飞机增雨作业时机和区域的短时预测 [J]. 气象与环境科学, 2009, 32(S1): 180-184.

[8] 周亦凌,姚展予. 一次积层混合云增雨作业天气条件分析和雷达回波效果检验 [J]. 气象与环境科学, 2017, 40(1): 11-20.

[9] 游积平,冯永基,杨今冬. 广东省 2005 年春季飞机增雨作业技术分析 [J]. 广东气象, 2005, 27(3): 17-19.

[10] 林 丹. 四川省春季一次飞机增雨作业个例分析 [J]. 成都信息工程大学学报, 2017, 32(2): 208-213.

[11] 杜毓龙,雷崇典,陈保国. 陕西省飞机增雨作业典型天气个例分析 [J]. 气象科技, 2005, 33(5): 456-459.

[12] 韦增岸,张正国,程 鹏,等. 广西一次飞机增雨过程个例分析 [J]. 气象研究与应用, 2019, 40(3): 90-93, 116.

[13] 何 媛,黄彦彬,李春鸾,等. 海南省暖云烟炉设置及人工增雨作业条件分析 [J]. 气象科技, 2016, 44(6): 1043-1052.

[14] 武 艳,孙建印,段培法,等. 徐州地区层状云火箭人工增雨潜势区判别 [J]. 气象科技, 2014, 42(6): 1137-1142.

[15] 白先达,张雅昕,杨经科. 广西桂林人工增雨抗旱作业方案设计 [J]. 灾害学, 2013, 28(1): 98-101.

[16] 孙 晶,史月琴,蔡 森,等. 南方三类云系云结构预报和增雨作业条件分析 [J]. 气象, 2015, 41(11): 1356-1366.

[17] 高 茜,王广河,史月琴. 华北层状云系人工增雨个例数值研究 [J]. 气象, 2011, 37(10): 1241-1251.

[18] 郑 凯,安英玉,韩书新,等. 高纬地区一次飞机人工增雨作业综合分析 [J]. 气象与环境学报, 2017, 33(6): 105-111.

[19] 高文华,赵凤生,胡志晋,等. CAMS 云微物理方案的改进及与 WRF 模式耦合的个例研究 [J]. 地球物理学报, 2012, 55(2): 396-405.

[20] 孙 晶,楼小凤,胡志晋,等. CAMS 复杂云微物理方案与 GRAPES 模式耦合的数值试验 [J]. 应用气象学报, 2008, 19(3): 315-325.

[21] 丁明月,王俐俐,辛 渝,等. WRF 云微物理参数化方案对新疆暴雨模拟能力的 TS 评分分析 [J]. 干旱区研究, 2019, 36(6): 1411-1418.

[22] 丁 莉,丁元武,李 蔚,等. 湖南夏秋季不同天气类型人影天气模式预报检验 [J]. 气象研究与应用, 2020, 41(2): 50-54.

责任编辑 周仁惠