

湖南省夏秋季一次飞机人工增雨典型作业过程分析与评估

冷 谦¹, 李 琼²

¹郴州市北湖区气象局, 湖南 郴州

²湖南省人工影响天气领导小组办公室, 湖南 长沙

收稿日期: 2025年5月15日; 录用日期: 2025年6月24日; 发布日期: 2025年7月2日

摘 要

湖南省中南部夏秋之交的干旱加剧, 为缓解湘中南旱情, 在低槽切变影响下, 针对湘中湘北的一次系统性降水过程进行作业条件分析, 得出湘中南具备相应作业条件, 遂设计飞机人工增雨作业方案, 并适时开展, 将降水范围扩大至中南部干旱区域, 作业后根据微量物理变化、回波变化、降水量统计等方法, 对增雨效果进行评估分析。

关键词

人工增雨, 催化作业, 增雨率

Analysis and Evaluation of a Typical Aircraft Artificial Rain Enhancement Operation in Hunan Province during Summer and Autumn

Qian Leng¹, Qiong Li²

¹Beihu Meteorological Bureau, Chenzhou Hunan

²Hunan Weather Modification Office, Changsha Hunan

Received: May 15th, 2025; accepted: Jun. 24th, 2025; published: Jul. 2nd, 2025

Abstract

The drought in the central and southern parts of Hunan Province intensified at the end of summer

文章引用: 冷谦, 李琼. 湖南省夏秋季一次飞机人工增雨典型作业过程分析与评估[J]. 自然科学, 2025, 13(4): 716-722.
DOI: 10.12677/ojns.2025.134075

and the beginning of autumn. To alleviate the drought in the central and southern parts of Hunan, an analysis of the operational conditions was conducted for a systematic precipitation process in the central and northern parts of Hunan under the influence of a low trough shear. It was concluded that the central and southern parts of Hunan had the corresponding operational conditions. Therefore, an aircraft artificial rain enhancement operation plan was designed and carried out in a timely manner, expanding the precipitation range to the drought-stricken areas in the central and southern parts. After the operation, the rain enhancement effect was evaluated and analyzed based on methods such as microphysical changes, echo changes, and precipitation statistics.

Keywords

Artificial Rain Enhancement, Catalytic Operation, Rain Enhancement Rate

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

湖南省地跨长江中游江南地区, 为大陆性亚热带季风湿润气候, 这种气候给其带来了四季分明的季节特征, 冬季寒冷, 夏季酷热, 春夏多雨, 秋冬干旱。进入秋冬季节, 湖南省的降水量减少, 容易出现干旱天气, 尤其是夏秋连旱, 会对农作物的成熟和收获造成相当不利的影响。另外, 在夏秋季, 厄尔尼诺等气候事件、南亚高压、西太平洋副热带高压异常等因素都可能导致夏秋季节长江中下游降水偏少[1]-[3], 从而引发连日高温、夏秋干旱等严重的气象灾害, 对农业生产带来了极大的影响。黎祖贤指出, 特旱影响范围年际变化线性趋势显著增加, 表明特旱影响范围扩大[4], 极端干旱的情况下, 具备增雨条件的时期主要出现在下半年的 8~10 月, 在伏旱期, 各分区具备增雨条件的日数占总伏旱期的 16%到 20%, 因此湖南的旱季, 抓住具备天气潜势的过程, 则有效增雨次数能明显提高。已知目前增雨影响天气系统主要为中低层切变等[5]。

2. 作业环境综合分析

2.1. 作业需求说明

2020 年 8 月至 9 月, 湖南省中南部夏秋之交的干旱加剧, 8 月份湖南全省平均降水量为 104.9 毫米, 较常年同期(123.6 毫米)偏少 15.1%。降水北多南少, 除湘西北、湘东北降水偏多外, 其他地区降水均偏少五成以上, 其中怀化、邵阳、衡阳部分县市区偏少八成以上。9 月 2 日, 湖南中南部的气象干旱情况加重。

2.2. 作业条件与潜力分析

根据多模式预报, 受中层西风带波动和低层切变影响, 预计 9 月 4 日湘中以北有一次中等量级降水过程, 其中湘中部分大雨、局地暴雨, 湘中偏南地区则以阵雨为主, 降水量级不大; 根据 EC 模式剖面, 4 日上午全省大部地区上空中层湿度条件较好。

根据 GRAPES 等多模式云微物理量预报: 4 日全省多云带(云水、雨水、冰晶、雪、霰比含水量的垂直积分)覆盖, 随系统自西向东移动。中午前后, 湘南地区云带带宽分布为 0.1 mm 到 5 mm, 并在垂直剖面上明显看到过冷水存在, 平均含量为 0.5 mm 左右, 云系分布表明存在一定增雨作业潜力。基于云降水

物理机制与人工影响天气原理, 沿永州-衡阳-郴州一带做垂直剖面分析(图略)可得当前大气层结满足地面增雨作业的催化条件: 其一, 根据 Bergeron-Findeisen 冷云降水理论, -10°C 层附近观测到一定的过冷水含量, 为冰晶异质核化提供充足相变潜热; 其二, 600 hPa 高度层出现水凝物混合比峰值(0.3 g/kg), 结合 WRF 模式模拟显示该层存在持续上升运动(图略), 有利于催化剂的垂直输送与扩散; 其三, 云顶温度 -20°C 高度下冰晶数浓度仅在 10/L 以下, 低于自然降水效率临界值 15/L, 说明云内存在显著冰晶匮乏区; 其四, 探空数据显示 0°C 层高度 5100 m (气压约 540 hPa), 符合地面 AgI 燃烧炉催化剂的活化高度要求($5000 \pm 300\text{ m}$), 确保气溶胶粒子在 $-5^{\circ}\text{C} \sim 15^{\circ}\text{C}$ 温区的充分驻留时间。

3. 作业条件监测及方案设计

基于 4 日 08 时 FY-2E 卫星多光谱融合反演(图略), 湘南区域云系在垂直结构、光学特性、动力演变上都呈现显著催化潜力: 湘南地区的云顶高度 2~7 km, 对应云顶温度梯度较大, 其中 $-10^{\circ}\text{C} \sim 15^{\circ}\text{C}$ 有效催化层厚度达 0.5~1 km 左右, 符合 Rosenfeld 冰相转化效率最优区间; 云光学厚度 8~52, 表明云内存在强烈微物理非均匀性; 从怀化模式探空分析其热力结构, 零度层高度 4858 m (570 hPa), -10°C 层位于 6100 m (480 hPa), 构成 AgI 核化最佳温区; 云系受 700 hPa 偏西引导气流(风速 12 m/s)驱动向东偏南移动, 模式预测系统云系移速 30 km/h。

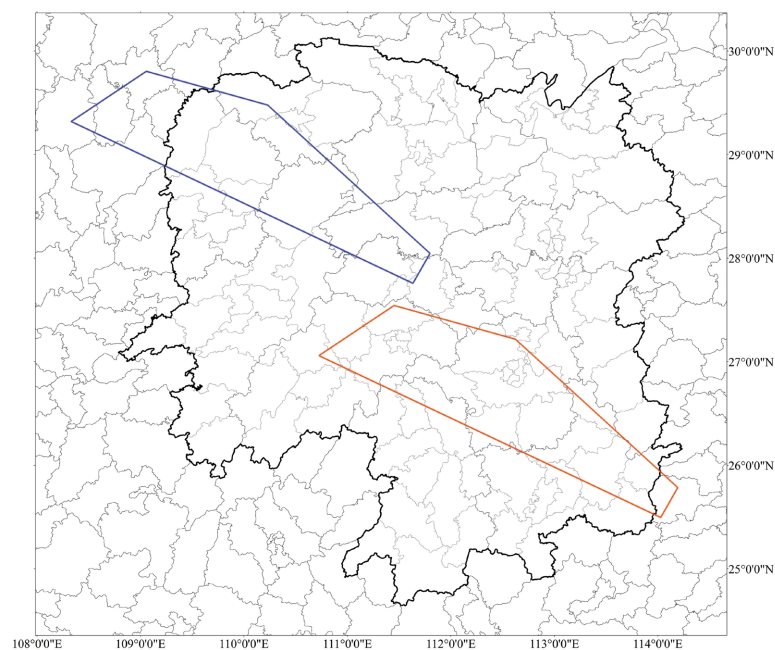


Figure 1. Flight operation affected area (red box) and contrast area (blue box)
图 1. 飞行作业影响区(红色框)与对比区(蓝色框)

而怀化、衡阳雷达组合反射率拼图预报表明, 在 4 日早上, 湖南省湘中、湘南一带有回波覆盖, 我省湘中及偏南一带有回波覆盖, 雷达回波介于 15~35 dbz 之间, 局部反射率较强, 适宜 4 日上午飞机起飞, 期间需绕开强对流发展区。结合 4 日增雨潜力区的预报结果和作业前雷达回波实况分析, 考虑对衡阳、郴州等湘中南干旱地区进行人工催化作业, 作业目标区如图 1 中红色框选区域。综上, 为水库增蓄水、缓解湖南中南部秋季旱情, 制定作业计划如下: ① 预计飞行时间为 2020 年 9 月 4 日 08:30~12:30; ② 预计作业时间为 2020 年 9 月 4 日 09:00~12:00; ③ 作业高度为 5000~6000 m; ④ 催化剂类型和剂量为 24 根 AgI 烟条。航线如图 2。

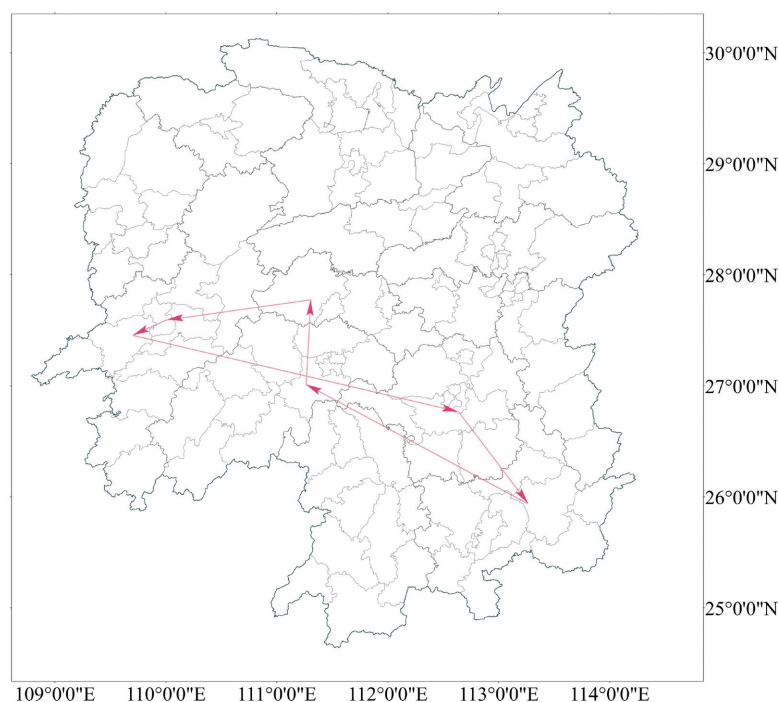


Figure 2. Designed flight route on September 4, 2020
图 2. 2020 年 9 月 4 日设计飞行航线

4. 飞机作业动态监测分析

4 日上午 8 点 50 分, 运七飞机起飞进行增雨作业, 催化增雨作业时段在 9 点 20 分到 11 点 50 分, 共消耗 24 根碘化银烟条, 实际飞行航线如图 3 中彩色折线所示。从催化增雨时段(09:20~11:50)邵阳、衡阳、郴州地区的雷达回波可以看出, 邵阳、衡阳、郴州北部等区域存在大范围结构密实的回波, 并逐渐向东南方向发展, 其覆盖范围与预计给出的作业目标区较为一致。作业目标区域的反射率因子强度分布在 10~40 dBZ, 适宜开展飞机增雨作业, 局部强对流达 50 dBZ。基于怀化与郴州双探空站同步观测(图略), 作业区 0℃层高度呈现北低南高特征(4.9 km~5.2 km), 作业方案中设计碘化银播撒高度为 5000~6000 m 冷云区, 播撒高度基本匹配。根据主要飞行航线上反射率因子剖面显示, 飞机前期飞行区域对应反射率因子较弱, 播撒凝结核有利于降水粒子的增加, 后期飞行路段受冷云催化过程影响, 过冷水冻结释放潜热, 提升了云内浮力并增强上升气流, 动力催化效应使得积云云顶升高, 云体寿命延长, 从而增加水汽辐合量, 降雨强度明显增强。综合雷达组合反射率因子实况(图略)、区域站降水、卫星遥感等相关数据资料反推实际飞行过程中的降水变化, 其强度随时间不断增加, 且范围扩张, 在系统性降水自然发展以及催化剂共同作用下, 主要作业目标区域降水增强。

根据不同时段(作业前后)作业影响区域(图 1 中红色框定区域)雷达组合反射率因子强度变化, 其回波状态在作业前中后三个时段存在明显的差别, 统计影响区域雷达回波强度分布(图 4), 过程中, 最强回波主要集中在天气系统配合较好的怀化-邵阳段, 回波整体呈带状, 作业影响区域仅位于降雨回波主雨带的尾部, 且反射率因子强度分布不均, 除北部存在少量中等强度块状回波, 大部分区域其余部分以 5~15 dBZ 的弱降水回波为主, 全区域平均回波强度仅为 17.24 dBZ; 增雨作业过程中, 反射率因子明显整体增强, 强回波区域和数量均明显增加, 随着空中凝结核的增加, 降水粒子逐渐增多, 雷达上体现为强回波向作业区域发展, 向南明显加强, 回波范围扩大, 强度最大达 55 dBZ; 作业结束后, 影响区域降水仍在发展增强, 反射率因子分布在 35~45 dBZ 区间的面积明显增加, 此时平均强度最强, 为 24.07 dBZ。

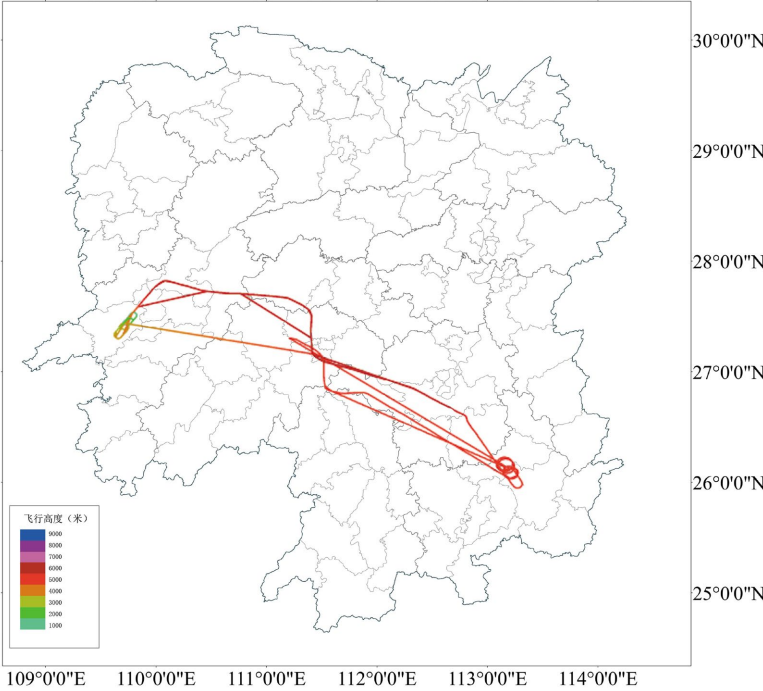


Figure 3. Actual flight route on September 4, 2020
图 3. 2020 年 9 月 4 日实际飞行航线

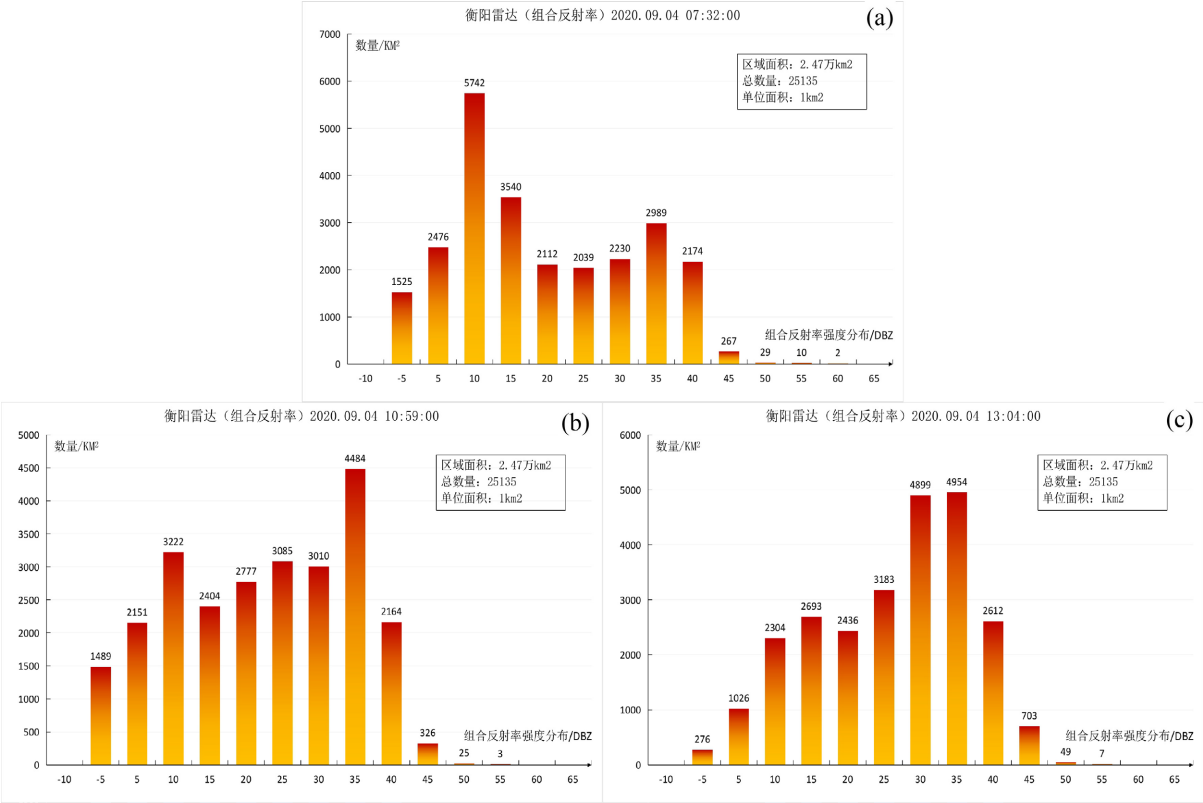


Figure 4. Radar echo changes before and after operation (Upper left: 1h before operation, upper right: During operation, Bottom: 1 h after operation)
图 4. 作业前后雷达回波变化统计图。左上: 作业前 1 小时(07:32), 右上: 作业中(10:59), 下: 作业后 1 小时(13:04)

5. 作业效果对比分析

根据分析 500 hPa 的风向风速，作业时刻引导气流均为偏西风，平均风速 14 米每秒，考虑碘化银播撒效果滞后性以及高空引导气流影响，估算飞行作业影响区域为作业区域下游，即图 1 中红框所示。通过 CPAS 平台分析计算本次作业扩散影响区，累计作业影响面积约为 2.61 万平方公里。根据主要影响天气系统整体移向，在其移动方向的垂线上在作业影响区域的上游选取对比区域(图 1、蓝框)，两个区域受天气系统影响基本一致，采用多参数区域动态对比分析法，对比两个选取区域的平均雨量之比得表 1。

Table 1. Results data of multi-parameter region dynamic comparative analysis method

表 1. 多参数区域动态对比分析法结果数据

	作业前三小时	作业中	作业后三小时
影响区面雨量	5.35	9.08	7.99
对比区面雨量	9.8	7.18	5.53
K 值	0.55	1.26	1.44

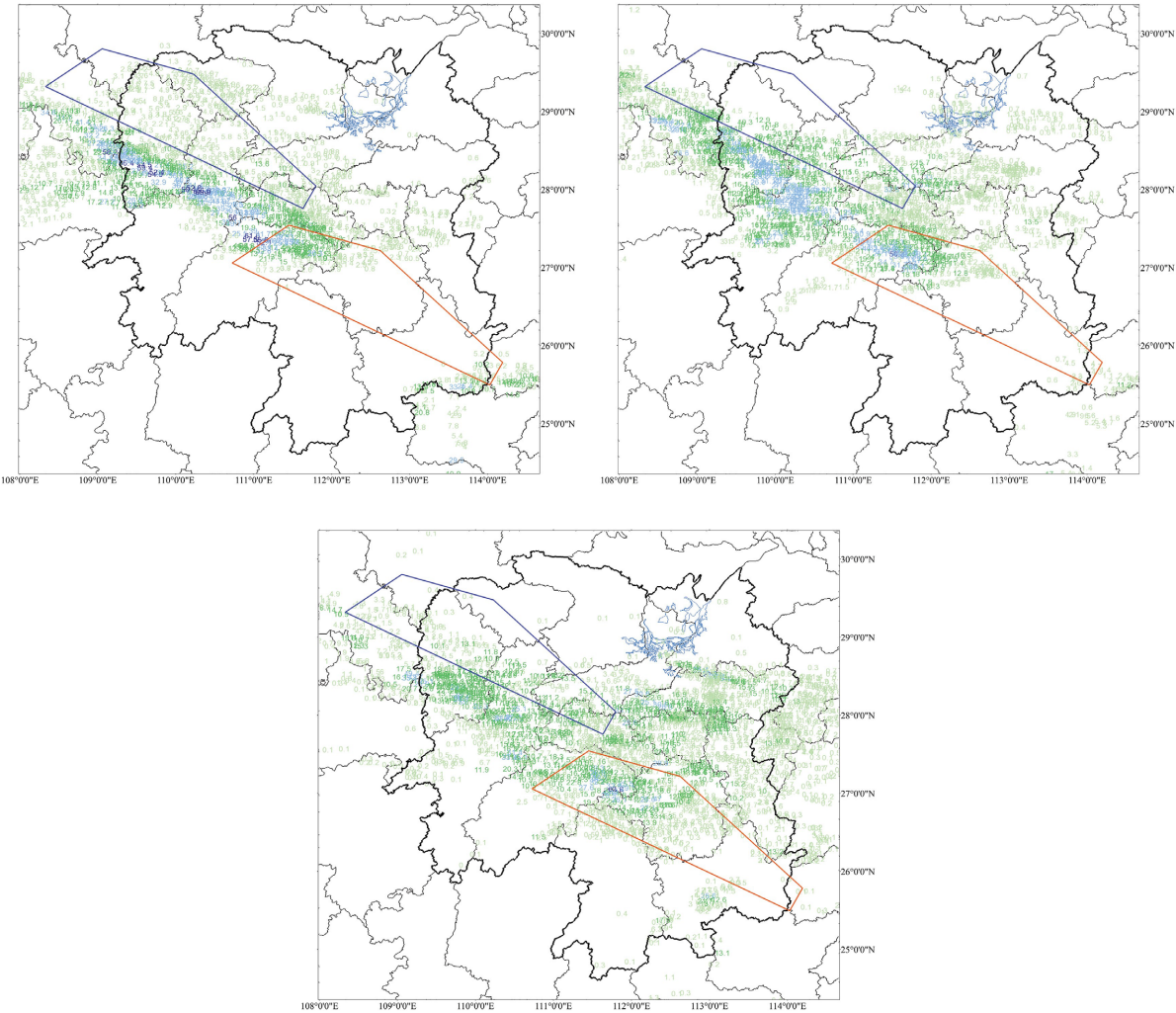


Figure 5. Rainfall statistics at automatic stations before and after operation (upper left: 3 h before operation, upper right: during operation, bottom: 3 h after operation)

图 5. 作业前后自动站雨量统计。左上：作业前(6:00~9:00)，右上：作业中(9:00~12:00)，下：作业后(12:00~15:00)

根据区域雨量分析(见图 5), 作业前 3 小时, K 为 0.55; 播撒作业到作业结束后三小时影响区雨量持续增加, 面雨量最大为作业时刻的 9.08 mm, K 值最大为作业后 1.44。根据区域对比, 整个过程中, 影响区增雨为 41.38%, 增加水量约: 影响区总降水量 $\times (1 - 1/(1 + \text{增雨率})) = 13,036$ 万吨。

6. 结论与展望

本文针对 2020 年 8 月至 9 月, 湖南省中南部夏秋之交的加剧的旱情, 评估分析了一次在低槽切变等天气系统影响下进行的飞机人工增雨作业过程, 根据各项条件分析, 得出湘中具备相应作业条件并设计飞机人工增雨作业方案, 适时开展播撒作业, 缓解湘中湘南发展的旱情, 作业后根据微量物理变化、回波变化、降水量统计等方法, 对增雨效果进行评估分析。

(1) 2020 年 9 月 4 日, 湘中以北受 500 hPa 西风带波动和低层切变影响有一轮中等强度降水过程, 基于云降水物理机制与人工影响天气原理, 分析过程时段大气层结、云系垂直结构、动力演变等方面条件, 湘南呈现出显著催化增雨潜力。综合计划在衡阳、郴州等湘中南干旱地区进行人工增雨作业, 旨在为水库增蓄水、缓解旱情。

(2) 根据飞行前中后期实况监测, 作业目标区域在作业后雷达回波显示大范围密实结构, 反射率因子 10~40 dBZ, 局部强对流达 50 dBZ, 作业区 0℃层高度与作业方案中设计碘化银播撒高度播撒高度匹配, 雷达剖面显示, 飞机播撒后降雨强度明显增强, 评估认为此次增雨作业合理有效。

(3) 增雨作业过程中反射率因子明显整体增强, 强回波区域和数量均明显增加, 雷达上体现为强回波向作业区域发展, 向南明显加强, 回波范围扩大, 有明显的催化效果。根据区域站实况监测, 播撒作业到作业结束后三小时影响区雨量持续增加, 此次增雨过程影响区增雨率为 41.38%。

(4) 人工增雨效果评估一直是人工影响天气作业的关键问题和难题, 如何将作业后的增雨效果从自然降雨变化中剥离出来存在较大的不确定性。目前对于作业效果评估方式多采用多参数区域动态对比分析法, 在影响对比区域的选取中偏主观, 未来可根据历史作业分布情况, 确定作业目标区和相关性较好的对比区(相关系数 ≥ 0.6), 采用区域历史回归检验方法开展较长时间序列的效果评估检验。

基金项目

湖南省人影办科研课题(HNRYB2021005)资助。

参考文献

- [1] 李刚, 李崇银, 晏红明, 江晓华, 鞠永茂. 南太平洋和北太平洋年代际振荡与华北盛夏降水的关系及可能物理机制[J]. 地球物理学报, 2020, 63(11): 3952-3966.
- [2] 黄平, 黄荣辉. El Nino 事件对其衰减阶段夏季中国降水季节内演变的影响及其机理[J]. 大气科学学报, 2010, 33(5): 513-519.
- [3] 张玲, 智协飞. 南亚高压和西太副高位置与中国盛夏降水异常[J]. 气象科学, 2010, 30(4): 438-444.
- [4] 黎祖贤, 周盛, 樊志超, 徐靖宇, 兰明才, 蒋元华. 湖南特大干旱时空变化特征分析[J]. 干旱气象, 2018, 36(4): 578-582+616.
- [5] 周盛, 周长青, 樊志超, 蒋元华, 刘红武, 汪玲. 湖南极端干旱气候时段人影作业潜力分析[J]. 气象科技, 2020, 48(2): 307-312.