

胡淑萍, 林文, 林长城, 等. 2014—2022 年古田人工增雨随机试验物理检验. 应用气象学报, 2023, 34(6): 706-716.
DOI: 10.11898/1001-7313.20230606

2014—2022 年古田人工增雨随机试验物理检验

胡淑萍¹⁾ 林文^{2)3)4)*} 林长城²⁾ 李丹²⁾³⁾⁴⁾ 江善赐¹⁾ 冯宏芳²⁾³⁾⁴⁾

¹⁾(福建省宁德市古田县气象局, 宁德 352000)

²⁾(福建省气象科学研究所, 福州 350001)

³⁾(福建省灾害天气重点实验室, 福州 350001)

⁴⁾(中国气象局海峡灾害天气重点开放实验室, 福州 350001)

摘 要

基于 2014—2022 年福建古田地面火箭人工增雨随机试验样本, 利用回波强度、回波顶高和负温层厚度等雷达宏观参量以及双偏振参量差分反射率和差分相位差, 开展人工增雨随机试验物理检验及催化个例的物理响应研究。结果表明: 与作业后非催化样本回波强度小幅上升后快速减弱相比, 81.6% 的催化样本在作业后回波强度增强, 其中 52.6% 的样本最大增幅为 0~20% (不含 0), 21.1% 的样本增幅为 20%~50% (不含 20%), 7.9% 的样本增幅超过 50%; 作业后 52.6% 的催化样本出现回波顶高升高和负温层增厚现象, 其中 36.8% 的样本增长 0~20% (不含 0), 13.2% 的样本增长 20%~50% (不含 20%), 2.6% 的样本增长超过 50%; 催化样本的双偏振参量差分反射率和差分相位差在作业后也出现持续增强; 个例分析显示, 催化作业有助于云体发展、增强和维持, 促使降水量显著增加, 不仅降水粒子增多增大, 云体生命史也延长。

关键词: 人工增雨; 随机试验; 物理检验; 雷达; 雨滴谱

引 言

近年全球气候变暖加速, 气象干旱事件频发, 森林防火、水库增蓄、生态修复等方面对人工影响天气的需求越来越迫切。现阶段人工影响天气活动主要以人工增雨、防雹为主, 由于自然云雨的复杂性, 人工增雨效果检验评估成为人工影响天气的重要工作之一, 但至今仍是世界难题^[1-2]。目前主要采用统计检验、物理检验和模式检验方法评估^[3-6], 效果包含对云的微观和宏观物理参量变化和地面雨量变化。统计检验方法可定量研究人工增雨作业前后的降水效果, 但需要长时间历史资料支撑。物理检验虽然不能定量评估增雨作业的效果, 但可提供作业前后云系微观和宏观特征发生变化的物理学证据, 因需要使用数理统计方法, 故又称为物理效应的统计检验^[6-7]。模式检验通过比较定量预报云物理参量、地面降水和实际观测结果, 评估作业效果。观测物理

效应基础结合统计检验, 才能得到合理检验结果, 模式检验的可信度更依赖于模式对云与降水过程模拟的准确性。

随着探测技术进步, 我国人工影响天气技术和应用得到快速发展^[8-11], 国内学者主要利用天气雷达、卫星等观测资料进行人工增雨效果检验^[12-27]。黄彦彬等^[21]对 2015—2016 年地面烟炉随机暖云人工增雨试验开展统计检验和物理检验, 指出暖云增雨平均增雨量相差 $0.39 \text{ mm} \cdot (2 \text{ h})^{-1}$, 相对增加为 11.4%。贾烁等^[22-23]检验 2012—2013 年江淮对流云作业个例效果, 得出相对增雨率为 65.18%。查思佳等^[24]、何晖等^[25]、刘卫国等^[26]利用模式结果定量研究催化过程的云微物理结构和降水变化, 何晖等^[25]得到消减雨模拟的最大减雨率为 8%~12%, 刘卫国等^[26]得到的平均增雨率为 1.1%, 地面降水出现先减少后增加的变化特征。岳治国等^[27]定量估算一次飞机冷云增雨作业的增雨量, 得到增雨影响时间约为 4 h, 影响区内增雨率达 53%。

2023-07-09 收到, 2023-09-25 收到再改稿。

资助项目: 国家重点研发计划(2019YFC1510303), 中央引导地方科技发展专项(2021L3010040)

* 通信作者, 邮箱: donnakoon@foxmail.com

福建省宁德市古田县作为人工增雨随机试验基地,1975—1986年开展地面高炮作业人工增雨随机试验,利用711天气雷达、滤纸色斑测雨滴谱法对随机试验个例开展物理检验^[28-31]:催化后云宏观参量明显增加,促进中雨滴和大雨滴发展,地面降水增加,而非催化云呈减弱趋势。为了解新气候背景下人工增雨作业效果,2014年古田县重启开展人工增雨随机试验,以地面火箭为作业方式,截至2022年底共获取77个样本。本文利用S波段单偏振天气雷达、双偏振天气雷达以及地面激光雨滴谱仪对已获取的随机试验样本开展阶段性物理检验。

1 资料与方法

1.1 试验方案

2014—2022年福建古田人工增雨随机试验根据统一雷达指标,随机抽取签码决定催化与非催化。为避免催化剂扩散、残留以及云系合并等因素影响,每次随机试验作业间的时间间隔超过3h。作业采用BL-1型火箭开展冷云催化,作业对象为3—9月发展至成熟阶段对流云系(包含积云、积层混合云);火箭弹催化起播点均高于 -5°C 高度(根据当日临近时刻福州和邵武L波段探空资料插值计算得到),方位角为迎着云系来向,催化部位为云系的前部或中部;每次作业量均为4枚火箭弹。随机试验的雷达指标^[32]:最大回波强度大于35dBZ且大于25dBZ的回波面积大于 100 km^2 ,回波顶高大于5.5km,负温层厚度大于1.5km,垂直液态水含量大于 $1\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

2014—2019年作业地点主要在凤埔乡西溪村,由于西溪作业点作业条件改变,2020—2022年改在

凤埔乡石坑村,两个作业点直线距离约为8km。两个点作业催化后的试验样本云系均移入同一影响区。

1.2 资料及方法

2014—2022年古田人工增雨随机试验样本为77个,其中催化作业样本为38个,非催化样本为39个。本文的物理检验分析基于福州长乐和南平建阳S波段天气雷达资料,从作业前12min到作业后60min跟踪分析催化前后雷达参量的变化,雷达参量选取回波强度、最大回波顶高、负温层厚度等,并计算相关雷达参量的增幅;2020年福州长乐天气雷达新增双偏振参量,可观测差分反射率(Z_{DR})、差分相位差(K_{DP})等偏振参量,为分析降水演化过程提供物理基础^[33-34]。匹配的随机试验样本为24个(催化样本15个,非催化样本9个),本文选取双偏振参量 Z_{DR} 和 K_{DP} 对随机试验样本云内降水微物理特征进行跟踪分析。此外,本文还选取2021年5月4日的随机试验个例,基于福州长乐双偏振天气雷达资料、地面激光雨滴谱资料开展综合性物理检验分析,地面激光雨滴谱(PASIVEL2)资料参照文献^[35-37]进行质量控制,同时利用区域站雨量观测资料定量评估试验个例的降水效果,进一步佐证物理检验分析结果。

2 物理检验

2.1 S波段天气雷达参量

2.1.1 回波强度

图1为作业前后试验样本回波强度(组合反射率因子)的平均值变化,横坐标时间0表示作业时刻,负数表示作业前,正数表示作业后(下同)。由图1

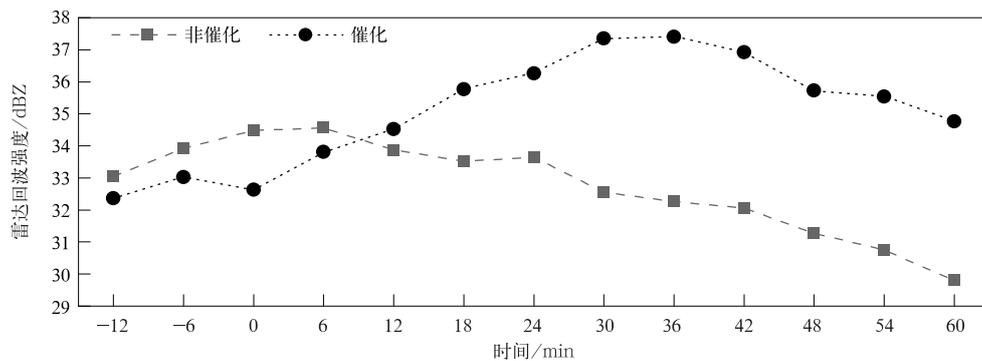


图1 作业前后雷达回波强度变化

Fig. 1 Change in radar echo intensity before and after operation

可见,作业前催化样本和非催化样本的回波强度均存在增强趋势,催化样本的回波强度稍弱于非催化样本。作业后催化样本回波强度逐步增强,至作业后 36 min 达到最大(37 dBZ),此后逐步减弱,作业后 60 min 回波强度减弱至 35 dBZ,仍高于作业时的 32.5 dBZ;由于地形抬升、局地辐合等原因,非催化样本自然发展增强,回波强度在 6 min 后达到峰值后逐渐减弱,12 min 后已减弱至与作业时的回波强度相当,至作业后 60 min 减弱至 30 dBZ 以下。与非催化样本相比,作业后催化样本回波强度增强,且云体生命史延长。

为进一步分析催化作业对雷达回波强度的影响程度,表 1 为作业后 60 min 催化样本和非催化样本回波强度的变化。由表 1 可见,作业后催化样本为增强状态(含先增强后减弱、增强后维持、持续增强 3 种情况)的样本为 31 个,占催化样本的 81.6%,非催化样本出现增强的仅为 30.8%(12 个);作业后催

化样本强度维持不变(维持 30 min 以上)的占比为 13.1%(5 个),非催化样本为 20.5%(8 个),高于催化样本;作业后催化样本呈减弱状态(含持续减弱、先减弱后维持两种情况)的仅占 5.3%(2 个),非催化样本为 48.7%(19 个),远高于催化样本。表 2 为作业后样本回波强度最大变化幅度与作业时刻的比率(r)。由表 2 可见,催化样本中负增幅的为 5.3%(2 个),零增幅的为 13.1%(5 个),最大增幅为 0~20%(不含 0,下同)的为 52.6%(20 个),20%~50%(不含 20%,下同)增幅的为 21.1%(8 个),增幅超过 50%以上的为 7.9%(3 个),回波强度的最大增幅可达 106%;非催化样本中负增幅的为 48.7%(19 个),零增幅的为 20.5%(8 个),一定程度增强的为 30.8%(12 个),大部分增幅在 20%以内。由此可见,除去自然因素使云体强度增强外,与非催化样本相比,大部分催化样本回波强度变化均为显著增强,表明引入人工冰核后云内降水粒子增多增大。

表 1 作业后 60 min 样本雷达回波强度变化

Table 1 Change in radar echo intensity within 60 min after operation

作业后状态	催化样本		非催化样本	
	样本量	比例/%	样本量	比例/%
增强	31	81.6	12	30.8
维持	5	13.1	8	20.5
减弱	2	5.3	19	48.7

注:增强含先增强后减弱、持续增强、先增强后维持 3 种情况,减弱含持续减弱、先减弱后维持两种情况,维持指参数连续 30 min 以上保持不变。

表 2 作业后 60 min 样本雷达回波强度增长率

Table 2 Radar echo intensity growth rate within 60 min after operation

增长率 r /%	催化样本		非催化样本	
	样本量	比例/%	样本量	比例/%
$r < 0$	2	5.3	19	48.7
$r = 0$	5	13.1	8	20.5
$0 < r \leq 20$	20	52.6	10	25.7
$20 < r \leq 50$	8	21.1	2	5.1
$r > 50$	3	7.9	0	0

注:参量 X 增长率: $r = (X_2 - X_1) / X_1 \times 100\%$, X_1 表示作业时样本的参量值, X_2 表示作业后样本参量 X 的极值。

2.1.2 最大回波顶高和负温层厚度变化

图 2 为作业前后最大回波顶高和最大负温层厚度变化。由图 2 作业前后最大回波顶高变化可见,作业前催化样本最大回波顶高较非催化样本略低,作业后催化样本的回波顶高先在 12 min 后开始小幅升高至 6.7 km,30 min 出现大幅升高,作业后 36~60 min 达到最高(6.9~7.2 km 之间浮动);非催化样本回波顶高最大值出现在作业前,作业后回波

顶高持续降低,虽然存在浮动,但整体为降低趋势。

由图 2 作业前后负温层厚度变化可知,作业前催化样本和非催化样本负温层厚度基本持平,并呈现小幅增加趋势,与回波顶高变化类似,作业后 6 min 催化样本负温层增厚,作业后 12 min 达到 2.5 km,随后维持小幅变化,作业后 60 min 仍高于作业时的负温层厚度;作业后 6 min 非催化样本负温层厚度逐步减小,作业后 12 min 已低于作业时。

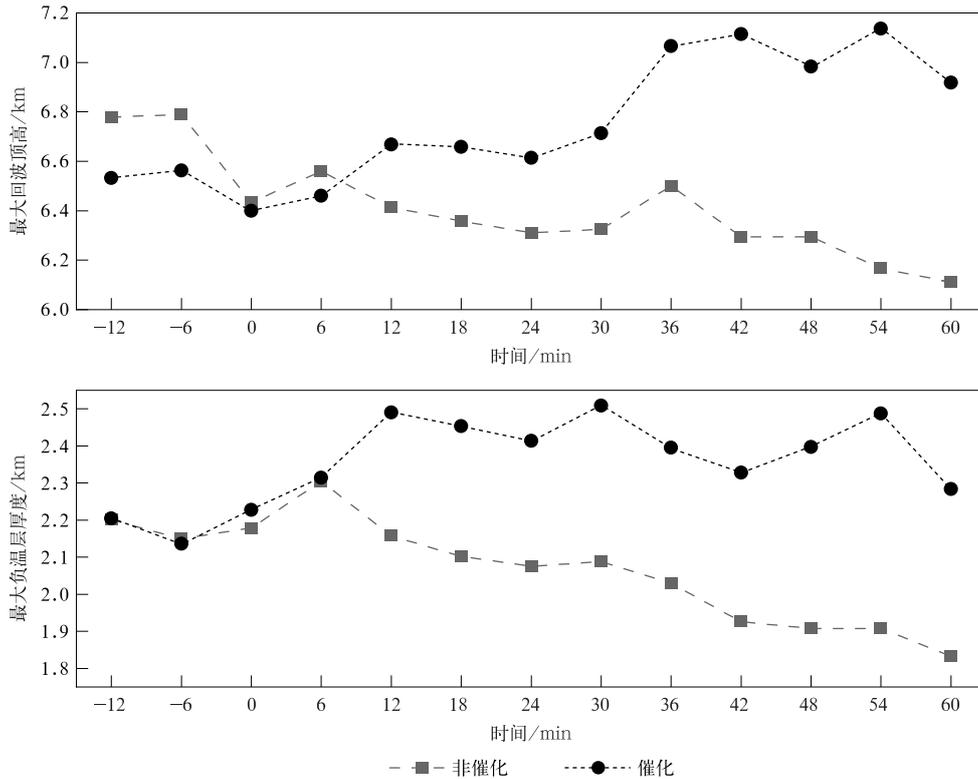


图 2 作业前后最大回波顶高和最大负温层厚度变化

Fig. 2 Changes in echo top height and negative temperature layer thickness before and after operation

表 3 为作业后 60 min 催化样本和非催化样本最大回波顶高变化。由表 3 可见,作业后催化样本回波顶高呈增长状态(含先增长后降低、先增长后维持、持续增长 3 种情况)的为 52.6%(20 个),非催化样本为 33.3%(13 个);作业后催化样本回波顶高维持不变(维持 30 min 以上)的占 42.1%(16 个),非

催化样本为 20.5%(8 个);作业后催化样本呈减弱状态(含持续降低、先降低后维持两种情况)的仅为 5.3%(2 个),远低于非催化样本的 46.2%(18 个)。表 4 为作业后样本最大回波顶高增长率。由表 4 可见,催化样本中负增长的仅为 5.3%(2 个),零增长的为 42.1%(16 个),增长率不超过 20%的为 36.8%

表 3 作业后 60 min 样本雷达最大回波顶高变化

Table 3 Change in radar echo top height within 60 min after operation

最大回波顶高变化	催化样本		非催化样本	
	样本量	比例/%	样本量	比例/%
增长	20	52.6	13	33.3
维持	16	42.1	8	20.5
降低	2	5.3	18	46.2

注:增长含先增长后降低、先增长后维持、持续增长 3 种情况,降低含持续降低、先降低后维持两种情况,维持指参数连续 30 min 以上保持不变。

表 4 作业后 60 min 样本雷达最大回波顶高增长率

Table 4 Radar echo top height growth rate within 60 min after operation

增长率 $r/\%$	催化样本		非催化样本	
	样本量	比例/%	样本量	比例/%
$r < 0$	2	5.3	18	46.2
$r = 0$	16	42.1	8	20.5
$0 < r \leq 20$	14	36.8	11	28.2
$20 < r \leq 50$	5	13.2	2	5.1
$r > 50$	1	2.6	0	0

(14个), 20%~50%增长率的为13.2%(5个), 有1个催化样本的回波顶高最大增幅达60%; 非催化样本中负增长的为46.2%, 维持的为20.5%, 正增长的为33.3%。作业后负温层厚度变化与回波顶高类似, 此处不再赘述。

综上所述, 作业后部分催化样本维持回波顶高不变, 该比例高于回波强度维持的样本, 说明该部分样本仅发生静力催化, 即云内微物理过程的改变; 作业后部分催化样本出现回波顶高明显升高, 说明该部分样本出现一定程度的动力催化效应, 即云中过冷水转化为冰晶释放的潜热, 促进上升气流发展, 使回波顶高和负温层厚度升高。

2.1.3 与1975—1986年随机试验对比

由于催化和非催化两组样本在作业前均存在差异, 同时为了与1975—1986年随机试验对比, 参考

文献[29], 采用双比分析检验作业前后回波参量的变化, 取双比值

$$\bar{D} = \frac{\overline{A_s/B_s}}{\overline{A_{ns}/B_{ns}}} \quad (1)$$

式(1)中, $\overline{A_s}$, $\overline{A_{ns}}$ 分别为催化、非催化样本在作业后每隔6 min的雷达回波参量算术平均值, $\overline{B_s}$, $\overline{B_{ns}}$ 分别为催化、非催化样本在作业前6 min的雷达回波参量算术平均值, 计算结果见表5。

由表5可见, 作业后3个雷达回波参量均为不同程度的增加; 作业后18 min 3个参数变化明显; 作业后30 min 雷达回波强度由12%快速增加至18%, 回波顶高在作业后42 min 快速增高, 负温层厚度在作业后6 min 迅速增厚; 作业后54 min 雷达回波参量的变化程度最大, 此时回波强度已增加19%, 回波顶高增加20%, 负温层厚度增加31%。

表5 催化样本与非催化样本的雷达回波参量双比值
Table 5 Double ratio of radar echo parameters between seeded and non-seeded samples

作业后时间	回波强度	回波顶高	负温层厚度
6 min	1.00	1.02	1.01
12 min	1.05	1.08	1.16
18 min	1.10	1.08	1.17
24 min	1.12	1.08	1.17
30 min	1.18	1.10	1.21
36 min	1.19	1.12	1.19
42 min	1.18	1.17	1.22
48 min	1.17	1.15	1.26
54 min	1.19	1.20	1.31
60 min	1.20	1.17	1.25

1975—1986年古田人工增雨随机作业和效果检验结果表明^[29, 38-39]: 作业后30~40 min 回波强度、回波顶高及厚度等参量变化明显, 作业后40~50 min 回波强度变化仍明显。与之相比, 本文样本在作业后的物理响应更早, 且变化幅度较大。

2.2 双偏振参量

双偏振参量可以提供降水粒子的形状、大小以及云内动力特征等云内微物理过程信息^[40-43], 雨滴越大形状越扁平, 对应的 Z_{DR} 越大, K_{DP} 也由液态降水大小所决定。图3为作业前后催化样本和非催化

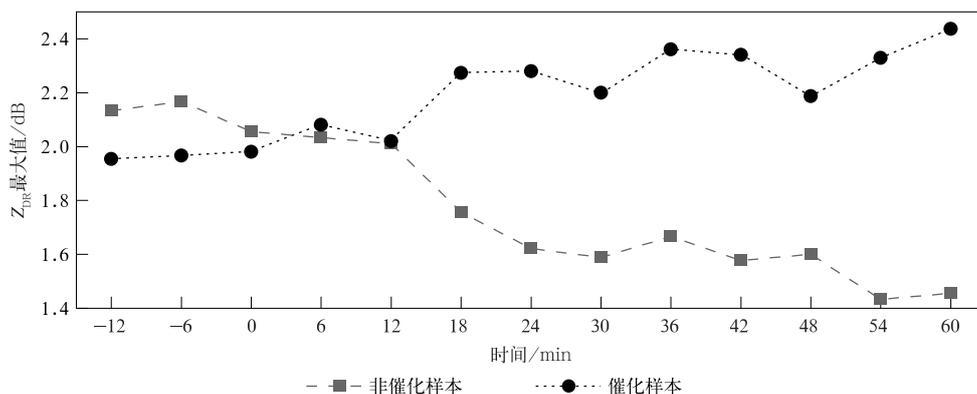
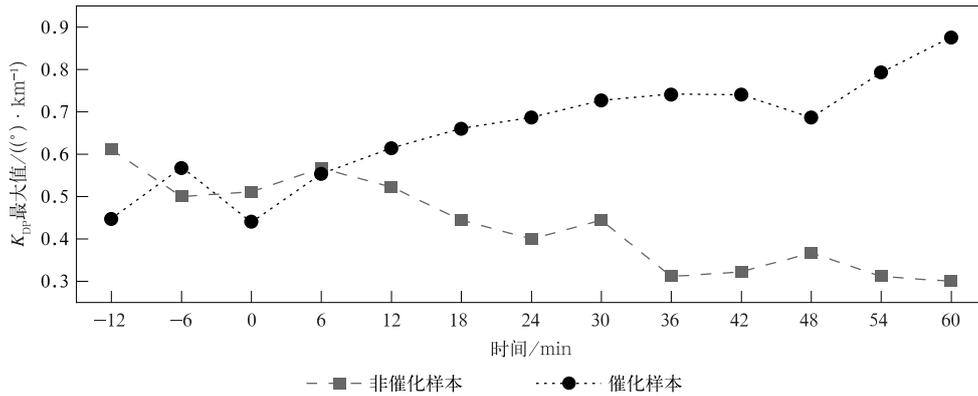


图3 催化样本和非催化样本的 Z_{DR} 和 K_{DP} 最大值变化

Fig. 3 Change in maximum of Z_{DR} and K_{DP} for seeded and non-seeded samples



续图 3

样本 Z_{DR} 最大值以及 K_{DP} 最大值变化。由图 3 可见, 作业前催化样本 Z_{DR} 最大值和 K_{DP} 最大值略低于非催化样本, 催化样本 Z_{DR} 最大值在作业后 12 min 显著增大, 随后出现小幅度的反复, 作业后 60 min 增大至 2.4 dB 以上; 催化样本 K_{DP} 最大值也在作业后逐步增大, 作业后 48 min 出现小幅下降后再次增大至最大值 $0.85^\circ \cdot \text{km}^{-1}$; 非催化样本 Z_{DR} 最大值和 K_{DP} 最大值在作业后均为持续减小趋势。上述分析表明, 催化作业使云内雨滴尺度增大且产生的液相降水增强。

3 个例分析

选取 2021 年 5 月 4 日的催化个例进行物理检

验。此次作业时段为 2021 年 5 月 4 日 17:03—17:05(北京时, 下同), 在古田县石坑作业点连续向 350° 发射 4 枚火箭弹, 作业仰角为 65° , 作业播撒范围为 $-10 \sim -5^\circ\text{C}$ 。此次作业位于高空槽和低层切变东移南压的天气系统内部, 作业云自西向东移动, 移向为 $95^\circ \sim 100^\circ$, 移速为 $45 \sim 55 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。作业前云体移动速度快, 作业后云体发展, 移速减慢, 因此截取作业前 1 个体扫至作业后每 2 个体扫组成的雷达回波强度时序拼图(图 4)。由图 4 可以看到, 作业云系在古田试验区东侧生成发展, 由西至偏东方向向作业点移动, 作业前最大回波强度超过 45 dBZ。作业后云系回波强度持续增加, 最大回波强度逐步增强至 55 dBZ, 大于 45 dBZ 的回波面积也较作业前显著增加。通过双偏振雷达参量剖面图

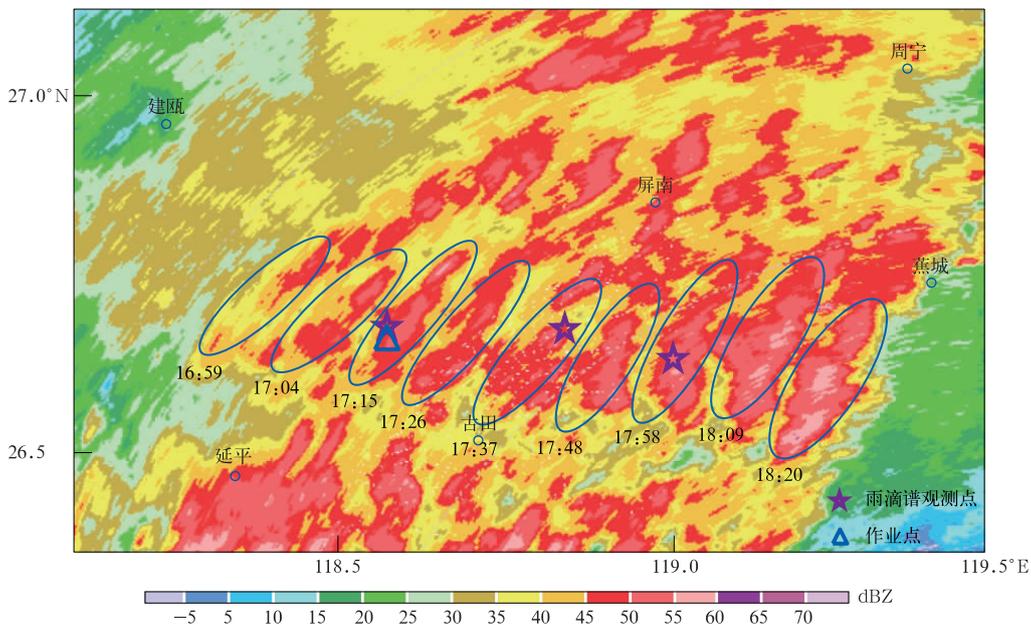


图 4 2021 年 5 月 4 日作业前后雷达回波强度时序拼图(作业时段为 17:03—17:05)

Fig. 4 Radar echo intensity sequence puzzle before and after operation on 4 May 2021(operation period is 1703—1705 BT)

(图 5, 截取时段同图 4) 可分析作业前后云内的微物理特征变化: 作业后 10 min (17:15) 作业云回波强度发生第 1 次增强且回波顶高增高, 作业后 40 min 回波强度和回波顶高仍持续增强且增幅显著。由于双偏振参量 Z_{DR} 大小对应降水粒子形状进而反映云内上升气流情况^[44-45]。当作业云系第 1 次增强时, 融化层 (4.3 km 高度) 以上 Z_{DR} 最大值由 1 dB 增强至 2 dB, 说明此时云内上升气流增强且过冷层的液态水滴较之前有所增大; 云系第 2 次显著增强时 (17:58) 融化层上的 Z_{DR} 最大值达 3 dB, 云内出现 Z_{DR} 柱结构, 表明上升气流持续增强^[40-41, 45-46] 使回波顶高上升, 接近 15 km 高度。同时, 双偏振参量 K_{DP} 与液态降水相关度较好, 其强度也在作业后 10 min 持续增强, 形成典型 K_{DP} 柱结构 (融化层上的 K_{DP} 最

大值超过 $2^\circ \cdot \text{km}^{-1}$), 由于 K_{DP} 柱内包含大雨滴与融化的冰粒子^[47], K_{DP} 柱强度增强也表明了该作业云系在作业后的液态降水强度增强。

作业期间作业云系经过作业点布设的雨滴谱观测点, 作业后 30 min 和 50 min 分别经过位于古田县吉巷乡韦端村和卓洋乡树兜村的 2 个雨滴谱观测点, 作业点与韦端村直线距离约为 23 km, 与树兜村直线距离约为 34 km。通过对比作业云系经过作业点上空与作业后分别经过的两个观测点的雨滴平均尺度谱 (图 6) 可知, 作业后 30 min 作业云系平均雨滴谱较作业时出现一定程度增宽, 小中雨滴 (直径小于 3 mm) 数浓度增加较大滴端 (直径大于 3 mm) 更为明显; 作业后 50 min 作业云系的雨滴谱较作业后 30 min 大雨滴 (大于 3 mm) 数浓度显著增多, 雨滴

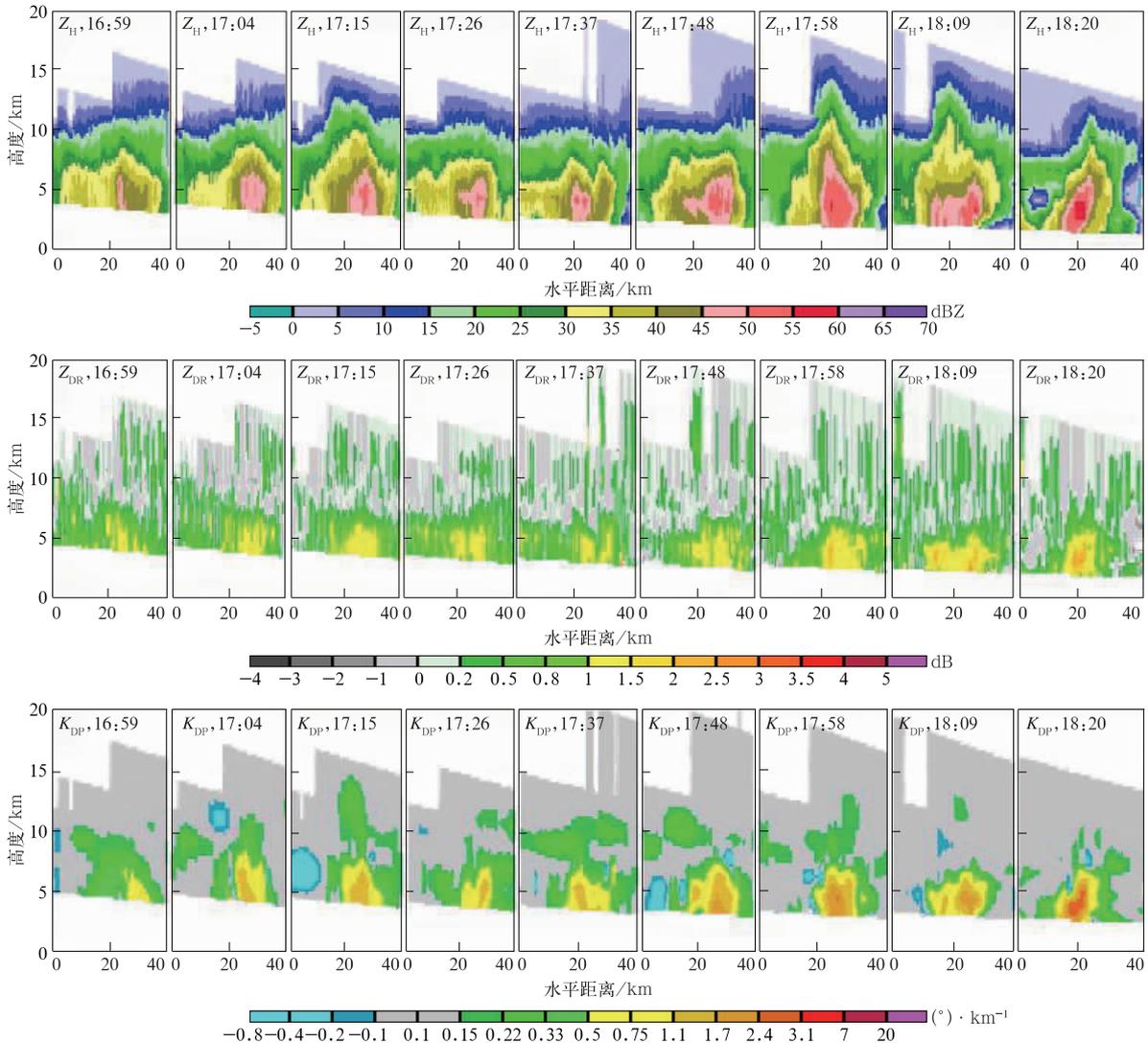


图 5 2021 年 5 月 4 日催化作业回波顶高 Z_H 、差分反射率 Z_{DR} 和差分相位差 K_{DP} 剖面
 Fig. 5 Cross-sections of Z_H , Z_{DR} and K_{DP} of the seeded sample on 4 May 2021

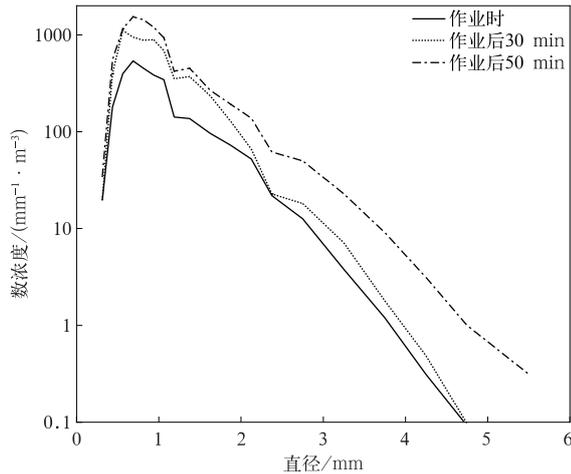


图6 作业前后雨滴尺度平均谱对比

Fig. 6 Comparison of raindrop-scale mean spectra before and after operation

谱增宽明显。

地面雨量资料显示,作业云系经作业点时雨强最大为 $1.1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$,作业后 30 min 韦端村地面最大雨强为 $1.5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$,作业后 50 min 树兜村最大雨强为 $2.7 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。云系移出树兜村后,树兜村区域站降水量为 14.3 mm,与作业点的 9.6 mm 降水量相比,地面降水量增加 49%,证明此次作业有效增加了地面降水量。

4 结论与讨论

本文基于 2014—2022 年福建古田地面火箭人工增雨随机试验,利用雷达回波强度、回波顶高和负温层厚度等雷达宏观参量对试验样本进行阶段性物理检验,并利用部分样本分析双偏振参量演变特征,同时结合雨滴谱对催化个例开展多源资料的物理检验,得到以下主要结论:

1) 大部分催化样本在作业后出现回波强度增强且增幅明显高于非催化样本,作业后 24~30 min 回波强度增强速率最快,平均值在作业后 36 min 达到最高值后逐步减弱,但作业后 60 min 的回波强度仍高于作业时刻,其中有 52.6% 催化样本最大增幅为 0~20%,21.1% 样本增幅为 20%~50%,7.9% 样本增幅超过 50%。

2) 半数催化样本在作业后出现回波顶高升高且增幅也高于非催化样本,作业后 30 min 出现大幅升高后维持相对稳定。作业后 60 min,36.8% 的样本增长 0~20%,13.2% 的样本增长 20%~50%,

2.6% 的样本增长超过 50%;催化样本负温层厚度变化与回波顶高类似,但其增厚起始时刻较回波顶高变化更早,作业后 12 min 负温层厚度出现大幅增加。

3) 雷达回波强度、回波顶高以及负温层厚度等参量变化表明,催化作业有助于云体的增强和维持,不仅云内降水粒子增多增大,云体生命史也相应延长。同时,催化样本的双偏振参量 K_{DP} 最大值在作业后逐步增大, Z_{DR} 最大值在作业后 12 min 显著增大,印证了催化能促使云内降水粒子尺度增大及液相降水强度增强。

4) 从催化个例的物理响应特征看,作业后回波强度持续增加,云内出现 Z_{DR} 柱表明云内上升气流增强使回波顶高升高,同时出现 K_{DP} 柱也表明作业后云内大雨滴或半融化冰粒子增多;与作业时刻相比,作业后 30 min 和 50 min 地面获取的雨滴谱出现谱宽增宽、中小雨滴先增加随后大雨滴增加的特征;作业后 50 min 云系的分钟雨强显著提升,降水量较作业时刻增加 49%,证明增雨效果明显。

参考文献

- [1] 姚展予. 中国气象科学研究院人工影响天气研究进展回顾. 应用气象学报, 2006, 17(6): 786-795.
Yao Z Y. Review of weather modification research in Chinese Academy of Meteorological Sciences. *J Appl Meteor Sci*, 2006, 17(6): 786-795.
- [2] 毛节泰, 郑国光. 对人工影响天气若干问题的探讨. 应用气象学报, 2006, 17(5): 643-646.
Mao J T, Zheng G G. Discussions on some weather modification issues. *J Appl Meteor Sci*, 2006, 17(5): 643-646.
- [3] 曾光平, 刘峻. 人工降水试验效果检验的统计模拟方法研究. 气象学报, 1993, 51(2): 241-247.
Zeng G P, Liu J. A research on a statistical simulation method for the test of the artificial rainfall effect. *Acta Meteor Sinica*, 1993, 51(2): 241-247.
- [4] 孙旭映, 王劲松, 王静. 火箭增雨效果雷达回波分析. 干旱气象, 2005, 23(3): 39-41.
Sun X Y, Wang J S, Wang J. Analysis of radar echoes on effects of rain enhancement by AgI-loading rockets. *J Arid Meteor*, 2005, 23(3): 39-41.
- [5] 于丽娟. 人工增雨效果物理检验适用方法研究和个例分析. 北京: 中国气象科学研究院, 2009.
Yu L J. The Research of Physical Approaches for Effectiveness Evaluation of Artificial Precipitation Enhancement and Case Studies. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences, 2009.
- [6] 叶家东. 人工降水的试验设计和效果检验. 气象, 1979, 5(2): 26-29.
Ye J D. Experimental design and effect test of artificial precip-

- itation. *Meteor Mon*, 1979, 5(2): 26-29.
- [7] 王飞, 李集明, 姚展予, 等. 我国人工增雨作业效果定量评估研究综述. *气象*, 2022, 48(8): 945-962.
Wang F, Li J M, Yao Z Y, et al. Advances of quantitative evaluation studies of artificial precipitation enhancement in China. *Meteor Mon*, 2022, 48(8): 945-962.
- [8] 郭学良, 方春刚, 卢广献, 等. 2008—2018年我国人工影响天气技术及应用进展. *应用气象学报*, 2019, 30(6): 641-650.
Guo X L, Fang C G, Lu G X, et al. Progresses of weather modification technologies and applications in China from 2008 to 2018. *J Appl Meteor Sci*, 2019, 30(6): 641-650.
- [9] 楼小凤, 傅瑜, 苏正军. 人工影响天气碘化银催化剂研究进展. *应用气象学报*, 2021, 32(2): 146-159.
Lou X F, Fu Y, Su Z J. Advances of silver iodide seeding agents for weather modification. *J Appl Meteor Sci*, 2021, 32(2): 146-159.
- [10] 郭学良, 付丹红, 郭欣, 等. 我国云降水物理飞机观测研究进展. *应用气象学报*, 2021, 32(6): 641-652.
Guo X L, Fu D H, Guo X, et al. Advances in aircraft measurements of clouds and precipitation in China. *J Appl Meteor Sci*, 2021, 32(6): 641-652.
- [11] 樊志超, 周盛, 汪玲, 等. 湖南秋季积层混合云系飞机人工增雨作业方法. *应用气象学报*, 2018, 29(2): 200-216.
Fan Z C, Zhou S, Wang L, et al. Methods of aircraft-based precipitation enhancement operation for convective-stratiform mixed clouds in autumn in Hunan Province. *J Appl Meteor Sci*, 2018, 29(2): 200-216.
- [12] 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. *干旱气象*, 2016, 34(2): 362-369.
Li D J, Tang R M, Jiang H, et al. Analysis on comprehensive observation of an artificial precipitation enhancement operation for convective clouds in Wuhan. *J Arid Meteor*, 2016, 34(2): 362-369.
- [13] 王以琳, 姚展予, 林长城. 一次火箭人工增雨作业雷达回波响应探讨. *气象科技*, 2016, 44(6): 1053-1059.
Wang Y L, Yao Z Y, Lin C C. Radar echo response to rocket precipitation enhancement in a field operation. *Meteor Sci Technol*, 2016, 44(6): 1053-1059.
- [14] 朱明佳, 袁野, 刘姝媛, 等. 基于雷达回波的江淮夏季对流云人工增雨效果分析. *中国气象学会年会*, 2016.
Zhu M J, Yuan Y, Liu S Y, et al. Analysis of Artificial Precipitation Enhancement Effect of Convective Cloud in Jianghuai Summer Based on Radar Echo. Annual Meeting of China Meteorological Society, 2016.
- [15] 王以琳, 姚展予, 林长城. 人工增雨作业前后不同高度雷达回波分析. *干旱气象*, 2018, 36(4): 644-651.
Wang Y L, Yao Z Y, Lin C C. Analysis of radar echoes at different heights before and after precipitation enhancement. *J Arid Meteor*, 2018, 36(4): 644-651.
- [16] 崔丹, 黄彦彬, 肖辉, 等. 多普勒雷达数据在海南省人工增雨效果评估中的应用. *大气科学学报*, 2012, 35(1): 87-94.
Cui D, Huang Y B, Xiao H, et al. Application of Doppler-radar data in the effect evaluation of artificial precipitation enhancement in Hainan Province. *Trans Atmos Sci*, 2012, 35(1): 87-94.
- [17] 王以琳, 王俊. 地面人工增雨随机试验方法的探讨. *干旱气象*, 2015, 33(5): 756-760.
Wang Y L, Wang J. Discussion on random experiment method of ground precipitation enhancement operation. *J Arid Meteor*, 2015, 33(5): 756-760.
- [18] 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. *气象与环境科学*, 2017, 40(1): 11-20.
Zhou Y L, Yao Z Y. Weather condition analysis and radar echo evaluation of precipitation enhancement operation for a stratiform mixed clouds. *Meteor Environ Sci*, 2017, 40(1): 11-20.
- [19] 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. *气象*, 2009, 35(8): 70-75.
Tang R M, Xiang Y C, Ye J Y, et al. Application of data observed by several instruments in effective verification of artificial precipitation enhancement. *Meteor Mon*, 2009, 35(8): 70-75.
- [20] 胡雯, 申宜运, 曾光平. 南方夏季对流云人工增雨技术研究. *应用气象学报*, 2005, 16(3): 413-416.
Hu W, Shen Y Y, Zeng G P. Study on artificial precipitation enhancement technology of convective clouds in summer in southern China. *J Appl Meteor Sci*, 2005, 16(3): 413-416.
- [21] 黄彦彬, 毛志远, 邢峰华, 等. 海南岛西部山区人工催化暖底积云随机化效果检验. *气象科技*, 2019, 47(3): 486-494.
Huang Y B, Mao Z Y, Xing F H, et al. Randomized effectiveness evaluation of artificially catalyzing heating-bottom cumulus in mountainous western Hainan Island. *Meteor Sci Technol*, 2019, 47(3): 486-494.
- [22] 贾烁, 姚展予. 江淮对流云人工增雨作业效果检验个例分析. *气象*, 2016, 42(2): 238-245.
Jia S, Yao Z Y. Case study on the convective clouds seeding effects in Yangtze-Huaihe Region. *Meteor Mon*, 2016, 42(2): 238-245.
- [23] 贾烁. 江淮对流云人工增雨作业效果检验技术方法研究和个例分析. 北京: 中国气象科学研究院, 2015.
Jia S. Technical Methods Study and Cases Analysis on the Testing of Convective Clouds Seeding Effects in Yangtze-Huaihe Region. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences, 2015.
- [24] 查思佳, 张慧娇, 李道潇, 等. 2014年南京青奥会开幕式日降水过程数值模拟研究. *大气科学*, 2020, 44(6): 1258-1274.
Zha S J, Zhang H J, Li X X, et al. Numerical simulation of precipitation processes during the opening ceremony of the Nanjing 2014 Youth Olympic Games. *Chinese J Atmos Sci*, 2020, 44(6): 1258-1274.
- [25] 何晖, 金华, 李宏宇, 等. 2008年奥运会开幕式日人工消减雨作业中尺度数值模拟的初步结果. *气候与环境研究*, 2012, 17(1): 46-58.
He H, Jin H, Li H Y, et al. Preliminary study of the mesoscale numerical simulation of the rain mitigation operation during the opening ceremony of the 2008 Beijing Olympic

- Games. *Clim Environ Res*, 2012, 17(1): 46-58.
- [26] 刘卫国,陶玥,周毓荃.层状云催化宏微观物理响应的数值模拟研究. *大气科学*, 2021, 45(1): 37-57.
Liu W G, Tao Y, Zhou Y Q. Numerical simulation of the macro and micro physical responses of stratiform cloud seeding. *Chinese J Atmos Sci*, 2021, 45(1): 37-57.
- [27] 岳治国,余兴,刘贵华,等.一次飞机冷云增雨作业效果检验. *气象学报*, 2021, 79(5): 853-863.
Yue Z G, Yu X, Liu G H, et al. Effect evaluation of an operational precipitation enhancement in cold clouds by aircraft. *Acta Meteor Sinica*, 2021, 79(5): 853-863.
- [28] 曾光平,吴章云.人工降水.福州:福建科学技术出版社,1997.
Zeng G P, Wu Z Y. Artificial Precipitation. Fuzhou: Fujian Science & Technology Publishing House, 1997.
- [29] 曾光平,吴明林,林长城,等.古田水库人工降雨效果的综合评价. *应用气象学报*, 1993, 4(2): 154-161.
Zeng G P, Wu M L, Lin C C, et al. A comprehensive evaluation of the effect of artificial precipitation in Gutian Reservoir area. *J Appl Meteor*, 1993, 4(2): 154-161.
- [30] 曾光平,朱鼎华,王祖炉.古田人工降雨应用研究. *气象*, 1997, 23(12): 34-38.
Zeng G P, Zhu D H, Wang Z L. An application study on the artificial rainfall over Gutian Reservoir region. *Meteor Mon*, 1997, 23(12): 34-38.
- [31] 林祥明,郑淑贞,黄文娟,等.催化作业对炮点雨滴谱的影响. *南京气象学院学报*, 1988, 11(3): 356-362.
Lin X M, Zheng S Z, Huang W J, et al. The influence of seeding operation on the raindrop spectrum at the worksite. *J Nanjing Inst Meteor*, 1988, 11(3): 356-362.
- [32] 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. *大气科学学报*, 2017, 40(1): 138-144.
Lin C C, Yao Z Y, Lin W, et al. Analysis on cloud echoes characteristics and operational conditions of precipitation enhancement in Gutian of Fujian. *Trans Atmos Sci*, 2017, 40(1): 138-144.
- [33] 刁秀广,李芳,万夫敬.两次强冰雹超级单体风暴双偏振特征对比. *应用气象学报*, 2022, 33(4): 414-428.
Diao X G, Li F, Wan F J. Comparative analysis on dual polarization features of two severe hail supercells. *J Appl Meteor Sci*, 2022, 33(4): 414-428.
- [34] 王俊,王文青,王洪,等.山东北部一次夏末雹暴地面降水粒子谱特征. *应用气象学报*, 2021, 32(3): 370-384.
Wang J, Wang W Q, Wang H, et al. Hydrometeor particle characteristics during a late summer hailstorm in northern Shandong. *J Appl Meteor Sci*, 2021, 32(3): 370-384.
- [35] Yuter S E, Kingsmill D E, Nance L B, et al. Observations of precipitation size and fall speed characteristics within coexisting rain and wet snow. *J Appl Meteor Climatol*, 2006, 45(10): 1450-1464.
- [36] Friedrich K, Kalina E A, Masters F J, et al. Drop-size distributions in thunderstorms measured by optical disdrometers during VORTEX2. *Mon Wea Rev*, 2013, 141(4): 1182-1203.
- [37] Jia X C, Liu Y G, Ding D P, et al. Combining disdrometer, microscopic photography, and cloud radar to study distributions of hydrometeor types, size and fall velocity. *Atmos Res*, 2019, 228: 176-185.
- [38] 林长城,高步云.福建古田地区人工降水试验效果的回波参量统计分析. *南京气象学院学报*, 1987, 10(3): 355-360.
Lin C C, Gao B Y. Statistical analysis of radar echo parameters for the appraisal of rain-making experiments over Gutian area, Fujian Province. *J Nanjing Inst Meteor*, 1987, 10(3): 355-360.
- [39] 曾光平,方仕珍,肖锋.1975—1986年古田水库人工降雨效果总分析. *大气科学*, 1991, 15(4): 97-108.
Zeng G P, Fang S Z, Xiao F. The total analysis of the effect of artificial rainfall in Gutian Reservoir area, Fujian (1975—1986). *Chinese J Atmos Sci*, 1991, 15(4): 97-108.
- [40] Kumjian M R, Ryzhkov A V. The impact of size sorting on the polarimetric radar variables. *J Atmos Sci*, 2012, 69(6): 2042-2060.
- [41] 何清芳,林文,张深寿,等.闽西南地区一次春季降雹过程的双偏振参量及降水粒子谱特征. *气象*, 2022, 48(7): 856-867.
He Q F, Lin W, Zhang S S, et al. Dual polarization parameters and precipitation particle spectrum characteristics of a spring hail event in southwestern Fujian. *Meteor Mon*, 2022, 48(7): 856-867.
- [42] Bringi V N, Chandrasekar V(李忱,张越,译).偏振多普勒天气雷达原理和应用.北京:气象出版社,2010:263-349.
Bringi V N, Chandrasekar V(Li C, Zhang Y, Trans). Polarimetric Doppler Weather Radar: Principles and Applications. Beijing: China Meteorological Press, 2010: 263-349.
- [43] Kumjian M R, Mishra S, Giangrande S E, et al. Polarimetric radar and aircraft observations of saggy bright bands during MC3E. *J Geophys Res Atmos*, 2016, 121(7): 3584-3607.
- [44] 孙跃,任刚,孙鸿娉,等.一次高炮防雹的相控阵双偏振雷达观测特征. *应用气象学报*, 2023, 34(1): 65-77.
Sun Y, Ren G, Sun H P, et al. Features of phased-array dual polarization radar observation during an anti-aircraft gun hail suppression operation. *J Appl Meteor Sci*, 2023, 34(1): 65-77.
- [45] 林文,张深寿,罗昌荣,等.不同强度强对流云系S波段双偏振雷达观测分析. *气象*, 2020, 46(1): 63-72.
Lin W, Zhang S S, Luo C R, et al. Observational analysis of different intensity severe convective clouds by S-band dual-polarization radar. *Meteor Mon*, 2020, 46(1): 63-72.
- [46] Kumjian M R, Ryzhkov A V, Melnikov V M, et al. Rapid-scan super-resolution observations of a cyclic supercell with a dual-polarization WSR-88D. *Mon Wea Rev*, 2010, 138(10): 3762-3786.
- [47] Loney M L, Zrnić D S, Straka J M, et al. Enhanced polarimetric radar signatures above the melting level in a supercell storm. *J Appl Meteor*, 2002, 41(12): 1179-1194.

Physical Inspection of Randomized Trial for the Artificial Rain Enhancement Experiment at Gutian from 2014 to 2022

Hu Shuping¹⁾ Lin Wen²⁾³⁾⁴⁾ Lin Changcheng²⁾ Li Dan²⁾³⁾⁴⁾ Jiang Shanci¹⁾ Feng Hongfang²⁾³⁾⁴⁾

¹⁾ (*Gutian Meteorological Station of Ningde, Fujian, Ningde 352000*)

²⁾ (*Fujian Institute of Meteorological Sciences, Fuzhou 350001*)

³⁾ (*Fujian Key Laboratory of Severe Weather, Fuzhou 350001*)

⁴⁾ (*Key Laboratory for Strait Disaster Weather of CMA, Fuzhou 350001*)

Abstract

The verification of the effectiveness of artificial rain enhancement is a worldwide challenge. Based on random experiments of ground-based rocket artificial rain enhancement at Gutian from 2014 to 2022, physical verification of stage samples is carried out using radar macro parameters such as radar echo intensity, echo top height, and thickness of the negative temperature layer. The evolution characteristic analysis of dual-polarization parameters Z_{DR} and K_{DP} is conducted. The physical characteristic response of seeded cases is studied by combining ground raindrop size distribution data. The analysis results show that the non-seeded samples have a small increase in echo intensity, echo top height, and negative temperature layer thickness after hypothetical artificial precipitation enhancement operation, but then quickly decrease. Seeded samples generally show an increase in echo intensity after operation, reaching a peak after 36 minutes. There are 52.6%, 21.1% and 7.9% of seeded samples with maximum growth rates of 0–20% (excluding 0), 20%–50% (excluding 20%) and above 50%, respectively. Half of seeded samples show an increase in echo top height and negative temperature layer thickness, with the former showing a significant increase after 30 minutes and maintaining stability, while the latter increase significantly after 12 minutes. Among them, 36.8%, 13.2% and 2.6% of seeded samples increase with maximum growth rates of 0–20% (excluding 0), 20%–50% (excluding 20%) and over 50%, respectively. At the same time, the dual-polarization parameters Z_{DR} and K_{DP} show sustained enhancement after operation. From the physical response characteristics of seeded individual case, Z_{DR} column appearing in the cloud after operation indicates that the upward airflow in the cloud has increased, causing the echo top height to rise and the echo intensity to increase or maintain. At the same time, K_{DP} column also indicates that there are more large raindrops or partially melted ice particles in the cloud after operation. The ground rainfall size distribution shows a characteristic of increasing first with small and medium drops and then with large drops, resulting in an increase in spectral width. The maximum minute rainfall intensity generated by the cloud system within 50 minutes after the operation increases significantly, and the cumulative rainfall has increased by 49% compared to the operation time. In summary, cloud seeding helps the development, enhancement, and maintenance of clouds, not only increasing the number and size of precipitation particles, but also to some extent prolonging the life of the cloud.

Key words: artificial rain enhancement; randomized experiments; physical testing; radar; raindrop size distribution