

安徽省一次积层混合云增雨作业的综合效果评估

张泽群¹, 姚展予^{*1}, 刘臻², 曹亚楠³, 袁野³, 高金兰³, 乐天¹,
林大伟¹, 韩熠¹, 王思瀚¹

1 中国气象科学研究院中国气象局云降水物理与人工影响天气重点开放实验室, 北京 100081

2 山东省气象数据中心, 济南 250031

3 安徽省人工影响天气办公室, 合肥 230031

摘要 本文使用安徽省国家级和区域级自动雨量站逐小时降雨量数据、安庆 S 波段雷达基数据和安庆探空等资料, 对安徽省 2023 年 6 月 17 日一次积层混合云增雨作业进行了综合效果评估。结果显示, 在播云后短时间内, 观察到播撒高度上方 1km 范围内出现一狭窄的强回波区, 播云后 24min, 强回波面积扩大, 播撒高度处形成一强回波中心, 回波形态由条带状变为团块状, 强对流区集中。通过质心最优化匹配法和拉格朗日方法进行回波单元识别与追踪, 并根据相似离度选取了最佳对比单元, 进一步分析了作业单元与对比单元的 5 个雷达物理参量的时间序列变化。结果表明, 作业单元的雷达物理参量值在作业后显著增加, 并在 42min 内达到峰值并维持稳定, 而对比单元的相应参量值则表现出下降趋势。双比分析显示, 作业后 1h 内, 5 个参量的双比值均大于 1, 这表明对比单元强度逐渐减弱, 而作业单元的生命周期得以延长且发展更为旺盛, 作业效果显著。此外, 本文采用基于聚类的浮动区域历史回归法优化了作业影响区自然降雨量的估计。首先使用 K-Medoids 聚类算法结合 PCA 降维技术对安徽省南部的降水特征进行了精确划分, 接着通过交叉验证评估了六种回归模型的性能, 结果表明 ElasticNet 回归模型在影响区的降雨量预测上表现最优, 最后将回归模型应用于增雨个例, 得到作业后 3h 绝对增雨量为 2.92mm, 相对增雨率为 22.3%, 单样本 t 检验结果显示, 影响区的增雨效应在 95% 的置信水平下显著。

关键词: 单体追踪; 聚类分析; 回归模型; 人工增雨; 效果检验

文章编号: 2024140B

中图分类号: P481

文献标识码: A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2502.24140

Comprehensive Effect Assessment of a Convective-Stratiform Mixed Cloud Precipitation Enhancement Operation in Anhui Province

Zhang Zequn¹, Yao Zhanyu^{*1}, Liu Zhen², Cao Yanan³, Yuan Ye³, Gao Jinlan³, Luan
Tian¹, Lin Dawei¹, Han Yi¹, Wang Sihan¹

*1 Chinese Academy of Meteorological Sciences, China Meteorological Administration Cloud-Precipitation Physics
and Weather Modification Key Laboratory, Beijing 100081, China*

收稿日期 2024-12-19; **网络预出版日期**

作者简介 张泽群, 男, 2000 年出生, 硕士研究生, 从事云降水与人工影响天气研究。E-mail: 1540213736@qq.com

通信作者 姚展予, 男, 1964 年出生, 研究员, 从事云降水与人工影响天气研究。E-mail: yaozy@cma.gov.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 42375198

Funded by Natural Science Foundation of China (42375198)

2 Shandong Meteorological Data Centre, Jinan 250031, China

3. Anhui weather modification office, Hefei 230031, China

Abstract In this paper, a comprehensive effect assessment of a convective–stratiform mixed cloud precipitation enhancement operation in Anhui Province on June 17, 2023 was carried out using hourly rainfall data from national and regional automatic rainfall stations in Anhui Province, S-band radar data and sounding data in Anqing area. The results showed that shortly after cloud seeding, a narrow, strong echo region was observed within 1 km above the seeding height. This region expanded 24 minutes after the cloud seeding, formed an strong echo center at the seeding height. Additionally, the echo shape changed from strip to block, accompanied by a concentrated area of severe convection. The proper echo units were identified and tracked by the Centroid Optimization Matching method and the Lagrangian method, and the best comparison unit was selected based on the similarity measurement. Time-series variations of the five radar physical parameters of the seeded unit and the comparison unit were further analyzed. The results showed that following the operation, the radar physical parameter values of the seeded unit increased significantly, reaching their peaks within 42 minutes, and then remained stable. Conversely, the corresponding parameter values in the contrast unit exhibited a decreasing trend. The double-ratio values of the five radar physical parameters were greater than 1 within 1 h after the operation, indicating that the echo intensity of the contrast unit gradually decreased, while the seeded unit developed more vigorously with prolonged lifespan, demonstrating the obvious seeding effect. In addition, we optimized the estimation of natural rainfall in the affected area by using a cluster-based historical regression method for the floating area. Firstly, the K-Medoids clustering algorithm combined with PCA dimensionality reduction technology was used to accurately classify the precipitation characteristics in southern Anhui Province. Then the performances of six regression models were evaluated through cross-validation, and the results showed that the ElasticNet regression model had the best performance in predicting the rainfall in the affected area. Finally, the regression model was applied in the individual cloud seeding case, providing the results of 2.92mm rainfall increase in 3h after operation and 22.3% rainfall enhancement effect, the results of the one-sample t-test showed that the precipitation enhancement effect in the affected area was significant at the 95% confidence level.

Keywords: Cell Tracking; Cluster Analysis; Regression Models; Cloud Seeding; Effect Assessment

引言

安徽省地处北亚热带湿润气候与暖温带半湿润季风气候的过渡区,是中国粮油和各类经济作物的主产区之一。该省南北气候差异显著,降水时空分布不均,自然因素变化复杂,干

旱灾害频发,严重影响了安徽省的社会经济发展(谢五三等,2019)。人工增雨技术作为缓解干旱、改善水资源供应的有效手段,近年来在我国多地得到广泛应用。其中,人工增雨效果的评估是整个作业过程中必不可少的组成部分,世界气象组织(WMO)一再强调其结果的重要性(WMO,2003),科学、客观的检验方法可以优化增雨作业的技术手段,确保资源投入的合理性。

在人工增雨效果的统计检验方面,由于随机化试验需要对气象变量进行严格控制,并且二分之一的催化比例会消耗大量的资源和时间,因此实际的气象业务中通常采取更容易实施的非随机化作业方案(姚展予等,2016;王飞等,2022)。人工增雨效果的非随机化检验方法发展至今,从理论和方法上都有了很大的改进。叶家东等(1984)用自然复随机化方法对福建古田地区人工增雨试验的功绩进行了统计数值模拟,对不同的统计检验方法做了评估,提出区域相关性是影响功绩的重要因素。王婉和姚展予(2012)用自然复随机化方法对北京市人工增雨作业非随机化试验进行功绩数值分析,结果表明功绩会随着历史样本数和作业样本数的增加而增大,当作业样本数较多时对比试验功绩较高,反之区域历史回归试验是最优选择。

在上述检验方法的基础上,许多研究对人工增雨效果进行了实证分析。王婉和姚展予(2012)选择区域对比试验、双比分析和区域历史回归试验对北京市 2002—2007 年人工增雨作业进行评估后,结果均表明在 0.05 的显著性水平上达到 10%左右的相对增雨效果。Wang 等(2017)采用改进后的区域历史回归法分析了 2008—2014 年冬季江西地区 71 次飞机增雨作业效果,结果显示在作业目标区内有 17.3%的降雨量增加,并在 95%的置信水平下显著。房彬(2004)根据河南省 30 年常规观测资料和近 10 年人工增雨作业宏观记录,提出了基于聚类的浮动控制历史回归方法,加强了对比区和影响区的相关性。翟羽等(2008)利用该方法对河南 4 月 10 次飞机增雨作业进行评估,得到平均增雨率为 9.8%。吴香华(2014)通过聚类划分降水区域、选取物理协变量和控制降水自然变异的影响后,得到 1997—2007 年 4—7 月的 35 例作业平均效果为 11.95%。

在物理检验方面,常使用雷达和卫星等观测资料,检验过程中确定研究对象至关重要。准确识别和跟踪被催化云体能为我们提供其物理参数演变信息。目前主流的风暴识别追踪算法是以 TREC (tracking radar echoes by correlation) 为代表的交叉相关法和以 TITAN (Thunderstorm Identification, Tracking, Analysis, and Nowcasting)(Dixon et al., 1993)以及 SCIT (Storm Cell Identification and Tracking) 为代表的单体质心法(曹伟华等, 2019)。樊志超等(2018)采用 TREC 算法对一次积云飞机增雨作业进行了物理检验,划定两个面积相等的圆形移动区域,分别作为目标区和对比区,对区域内目标回波的变化进行跟踪,结果表明, TREC 矢量与回波移动方向的一致性较好,验证了该方法的合理性。贾烁和姚展予(2016)以及祝晓芸和姚展予(2017)对对流云火箭增雨作业个例进行了物理检验,使用拉格朗日方法,通过设定回波强度和回波体积阈值来识别追踪目标回波单体,并基于相似理论确定最优对比云,以进行比较分析。李德俊等(2022)在对武汉一次火箭增雨过程进行单体识别时,采用 SCIT 算

法, 在对比单元的选择过程中, 首先通过七个阈值初步筛选出与作业单元相近的待选单元, 随后应用相似离度原理(李开乐等, 1986), 确定与作业单元相似度最高的对比单元。

许多学者对典型增雨个例进行分析后均观察到了显著的物理响应, 进一步验证了人工增雨的有效性。唐仁茂等(2009)、李红斌等(2016)、邢峰华等(2023)均指出作业后 0.5 小时是目标云和对比云的数个雷达物理量出现显著差异的时间节点。王以琳等(2018)将雷达回波分为三层(播撒层和其上下两层), 通过统计各层内不同雷达回波强度范围内的像元个数, 分析催化后的物理响应特征, 结果表明催化作业后弱回波的响应较强回波更迅速, 且垂直累积液态水含量在低层的变化大于高层。孙玉稳等(2017)在一次飞机冷云(层状云)催化中, 通过对 FY-2E 卫星和雷达观测资料的分析, 得到云顶亮温降低、35dBZ 以上回波面积增加、强回波中心下沉等结果。Wang 等(2021)和 Li 等(2022)均通过对卫星多通道的假彩色合成, 观测到播云后存在明显云迹。French 等(2018)在一次飞机播撒作业后, 从平面位置显示图(PPI)上观测到符合播撒模式的间隔的雷达强回波带, 同时云雷达观测的剖面图显示垂直方向上增强带从播云高度向上和向下分别延伸发展。

本论文聚焦于安徽省积层混合云火箭增雨个例, 利用雷达资料分析催化作业后云体的回波演变, 通过拉格朗日方法追踪雷达物理参数变化并进行时间序列分析, 此外, 在聚类分析的基础上采用浮动区域历史回归法定量计算增雨效果, 从作业云体的回波物理参量变化和地面影响区的降雨统计量变化两个方面进行综合检验, 旨在提高评估结果的准确性和可信度。研究结果可以为增雨的业务化应用提供科学依据, 在创新人工影响天气作业效果检验技术方面也具有一定的应用价值。

1 资料来源

本文使用的天气分析资料来源于欧洲中期天气预报中心提供的 ERA5 数据集, 雷达资料来源于安徽安庆站 CINRAD/SAD 双偏振雷达, 历史雨量资料来源于中国气象局气象信息中心数据库, 由 CIMISS 系统获取。作业当天的探空资料以及站点实测小时雨量资料来自中国气象局“天擎”系统, 作业样本信息来自安徽省每次人工增雨作业后填写的“合理性分析数据信息表”。

2 研究方法

2.1 物理检验方法

2.1.1 回波识别与相似性分析方法

本文使用质心最优化匹配法和拉格朗日方法识别和追踪雷达回波单元(姚展予等, 2016),

并计算了关键的雷达物理参量，包括回波顶高、回波体积、最大反射率、垂直累积液态水含量（VIL）及降水通量。为了确保追踪的准确性，设置了特定的反射率阈值和回波体积阈值以筛选回波信号，其中作业单元于火箭作业点作业期的上空方选取；对比单元不能受到催化作业的影响，应在作业点上风方或垂直于风向的侧面选取，并且对比单元和作业单元需要处于同一个降水系统中，两者的回波参量在作业前的演变趋势应该相似。对比单元选择的合理性会直接影响物理检验的可信度，因此识别与作业单元最相似的对比单元是必要的，本文通过计算两者在作业前各个回波参量变化曲线的相似度实现这一目标。曲线相似性度量方法在过去已有大量研究，其中，李开乐(1986)综合考虑了两条曲线的变化趋势与曲线间距，提出了相似离度这一度量指标，并广泛应用于气象领域。在此基础上，本文选取作业前 n 个时次作为相似性检验时段，将 5 对回波参量曲线的总相似离度作为衡量两个回波单元相似程度的综合指标。回波单元 x 和 y 的总相似离度 C_{xy} 的计算公式如下：

$$C_{xy} = \sum_{k=1}^5 C_{xy}^k \quad (1)$$

$$C_{xy}^k = \frac{1}{2}(D_{xy}^k + S_{xy}^k) \quad (2)$$

$$D_{xy}^k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_k(t_i) - y_k(t_i)| \quad (3)$$

$$S_{xy}^k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_k(t_i) - y_k(t_i) - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [x_k(t_i) - y_k(t_i)]| \quad (4)$$

其中 $x_k(t_i)$ 和 $y_k(t_i)$ 分别表示回波单元 x 和 y 的第 k 个回波参量曲线在 t_i 时的值； D_{xy}^k 代表值系数，反映了曲线 x_k 和 y_k 的距离大小，值系数越小表明两曲线间距越小； S_{xy}^k 代表形系数，反映了曲线 x_k 和 y_k 的相关性，形系数越小表明两曲线相关程度越高； C_{xy}^k 表示曲线 x_k 和 y_k 的相似离度； C_{xy} 为回波单元 x 和 y 在 5 对回波参量曲线上的相似离度之和，其值越小表明相似度越高，将总相似离度最小的待选对比单元确定对比单元。

2.1.2 多参量双比值法

为了提供关于增雨效果的直接证据，本文采用多参量双比值法来探索不同雷达物理参量变化的细节。双比值 DR 的计算公式如下：

$$DR_i = \frac{P_{A,i} / (\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n P'_{A,k})}{P_{B,i} / (\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n P'_{B,k})} \quad (5)$$

式中， P 代表回波单元的雷达物理参量， $P_{A,i}$ 和 $P_{B,i}$ 分别表示作业单元和对比单元在作业开始后第 i 个时次的量值大小， $P'_{A,k}$ 和 $P'_{B,k}$ 则分别表示作业单元和对比单元在作业开始前第 k 个时次的参量值大小，其中雷达进行一次体扫所需的时间为一个时次。该方法通过对作业单元和对比单元同一时刻的参量值除以各自的基线值后进行比较，可以在一定程度上消除

自然变化对结果的影响,同时,为了降低单一时次数据波动的影响,将作业前 n 个时次的回波参量 P' 进行平均作为基线值,增强了结果的稳定性。作业后第 i 个时次的双比值 DR_i 揭示了在催化作业后的某个时刻,作业单元的各项雷达物理参量值相对其历史平均值的变化幅度与自然变化之间的差异性。数值上,在 $DR_i > 1$ 的情况下, DR_i 越大,表明作业的正效果在作业后第 i 个时次越显著,反之,若 $DR_i < 1$,则说明该时次下催化作用的效果不如自然变化明显。对上述 5 个雷达物理参量的时间序列进行分析,观察增雨作业前后作业单元与对比单元的演变情况。

2.2 统计评估方法

2.2.1 基于聚类的降水区域划分方法

为了提高对自然降雨量预估的准确性,作业影响区和对比区的雨量相关性需要尽可能高,若能采用合适的聚类方法对研究区域的降水特征进行划分,则每一个类别子区内站点的雨量相关性通常会较高。因此,本文采用基于聚类的浮动区域历史回归法建立作业影响站点与对比站点之间的降雨量回归模型,量化增雨效果。首先,针对安徽省南部作业个例,为了实现研究区域整体降水特征的划分,本文选取位于安徽省 32°N 以南的 45 个国家站 2016 年至 2021 年逐年 6 月的小时降水量数据作为特征数据源,对于数量庞大的区域站,将已分类的国家站作为类别中心,采用距离加权的 K 最近邻 (KNN) 算法进行二次分类。

考虑到每个站点含有 4320 个 (即 $6 \text{ 年} \times 30 \text{ 天} \times 24 \text{ 小时}$) 特征信息,而高维数据集中的聚类分析面临“维数灾难”问题,即随着数据维度增加,聚类方法的效能显著降低。为了优化聚类结果,本文采用降尺度结合 PCA (主成分分析) 技术对原始数据进行降维。首先将小时雨量累加为日雨量,将数据维度减少至 180 (即 $6 \text{ 年} \times 30 \text{ 天}$),随后采用 PCA 方法,将 180 维数据进一步降至 15 维,保留累计贡献率达到 95% 以上的前 15 个主成分变量,这 15 个主成分变量即作为后续聚类分析的输入变量,此方法显著减少了数据的维数,同时保留了大部分信息量。接着运用 K-中心点 (K-Medoids) 和凝聚层次聚类 (AGNES) 两个经典算法进行聚类分析,最后,通过聚类内部评价指标来确定最优的聚类结果,将区域站相对于聚类中心的距离作为权重,采用加权 KNN 算法将其整合到聚类结果中,从而实现对研究区域内所有雨量站的划分。

2.2.2 自变量与因变量的选取方法

对于每次增雨作业,作业影响站点和对比站点的确定遵循以下方法:将播撒的催化剂在一定高度范围内通过水平风输送而经过的区域作为总影响区,总影响区内的雨量站即作业影响站点;根据 2.2.1 节的聚类结果,研究区域被划分为 N 类子区,当作业影响站点分布于 n 个子区时 ($1 \leq n \leq N$),将总影响区视为 n 个副影响区的叠加。对于每个副影响区所在的子区,选取该子区内未受作业影响的站点作为对比站点。

收集作业影响站点和对比站点 2016—2021 年 6 月的小时降雨量数据作为历史雨量数据，数据有效时段大于 95% 的站点作为有效站点。对站点连续 3h 的雨量累加后得到 3h 累积降雨量数据集，当作业影响站点和对比站点的 3h 累积降雨量均不小于 0.1mm 时，视其为有效历史样本。本文将副对比区内站点的 3h 累积降雨量作为预测变量，构建副影响区内各站点 3h 累积降雨量的平均值 $\bar{y}'$ 的多元回归模型。

2.2.3 回归模型的优选与应用

为探究站点间降雨量潜在的非线性关系，本文选用了包括线性与非线性回归模型在内的六种多元回归模型。线性回归模型中，普通线性回归是最基础的回归方法，适用于自变量与因变量之间存在线性关系的情况。但由于对比区内站点数量较多，每个站点包含 15 个特征变量，自变量维度较高，且各站点间的降雨量具有一定相关性，而高维数据和自变量间的共线性都会导致回归系数估计不稳定。为此，本文引入了 Lasso 回归和 ElasticNet 回归，相较于普通线性回归，Lasso 与 ElasticNet 回归尤其适合处理高维自变量的情形。Lasso 回归通过引入 L1 正则化项实现变量选择，能够有效减少冗余变量，适用于高维自变量的稀疏建模 (Tibshirani, 1996)；而 ElasticNet 回归结合 L1 和 L2 正则化，既能执行变量选择，又能缓解 Lasso 在高度相关自变量情况下的局限性，因此在处理共线性数据时表现更优 (Friedman et al., 2010)。非线性模型方面，本文引入了常用的支持向量回归 (SVR)、决策树和随机森林。SVR 利用核函数将数据映射到高维特征空间，以解析数据中的非线性模式并优化高维数据的处理效果 (Smola and Schölkopf, 2004)。决策树回归利用树状结构进行决策建模，能够直观地描述数据特征 (Quinlan, 1996)，其优点在于不需要对数据进行假设，并可自动处理非线性关系。随机森林则通过构建多个决策树并整合其结果，降低单一决策树的过拟合风险，同时提高预测的稳定性。随机森林在降水预测中已被广泛应用，并表现出良好的鲁棒性 (Li et al., 2021)。以上三种非线性回归模型的性能均依赖于超参数的设定，因此，本文通过网格搜索优化超参数设置，以提高模型的泛化能力。最后，我们通过交叉验证选择最优的回归模型，使用绝对增雨量 $\Delta\bar{y}$ 和相对增雨量 R 两个指标对作业个例进行定量效果评估，指标计算公式如下：

$$\Delta\bar{y} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^n m_i (\bar{y}_i - \bar{y}'_i) \quad (6)$$

$$R = \frac{M \Delta\bar{y}}{\sum_{i=1}^n m_i \bar{y}'_i} \times 100\% \quad (7)$$

其中 M 为总影响区内站点数量， n 为副影响区的数量， m_i 为副影响区 i 内站点数量， $\bar{y}_i$ 为作业期间副影响区 i 实测的平均降雨量， $\bar{y}'_i$ 为副影响区 i 根据回归模型预估的平均降雨量。为检验增雨效果的统计显著性，本文采用单样本 t 检验来评估实测降雨量均值与回归模型预测的自然降雨量均值之间的差异是否具有统计学意义。由于不同副影响区的回归方程各异，

因此每个副影响区的 t 检验统计量将分别计算，其计算公式如下：

$$t_i = \frac{\bar{y}_i - \bar{y}'_i}{s_i / \sqrt{N_i}} \quad (8)$$

其中 N_i 表示用于构建回归模型的样本数， s_i 表示第 i 个副影响区根据回归模型预估的平均降雨量的标准差，计算得到 t 值后，依据自由度 $df = N_i - 1$ ，通过 t 分布的累积分布函数来求解双侧 p 值，若 p 值小于或等于预设的显著性水平，则表明实测降雨量与模型预测的自然降雨量之间的差异达到统计显著性水平，即可认为该副影响区的增雨效果显著。

3 个例分析

3.1 天气背景和作业情况

根据图 1a 显示，2023 年 6 月 17 日 08 时，东亚地区 500hPa 高度场呈现出“两槽一脊”的形式，副热带高压北移，将孟加拉湾等地的暖湿气流输送至江淮地区。安徽位于 500hPa 槽前，提供了上升气流并引导北方的干冷空气南下。850hPa 上安徽南部有暖式切变线维持，切变线南侧的西南急流最大风速超过 12m/s，带来了充沛的暖湿气流。由图 1b 可见，700hPa 高度上作业点区域处有气流辐合，有利于水汽抬升凝结，相对湿度大于 90%，水汽条件充足。稳定的上升条件和水汽输送有助于形成持续性降水，该配置下具有一定的增雨作业潜力。

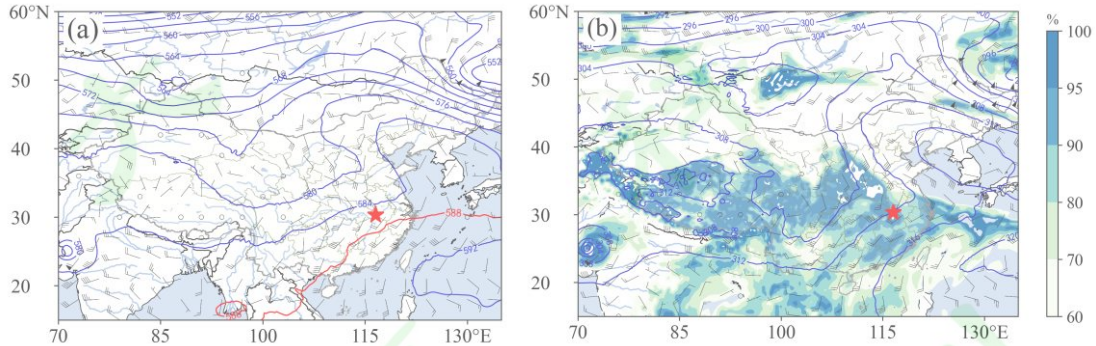


图 1 2023 年 6 月 17 日 08 时 (a) 500 hPa 高度场和 850 hPa 风场图、(b) 700 hPa 高度场叠加相对湿度图。

Fig. 1 Plots of (a) 500 hPa height field with 850 hPa wind field and (b) 700 hPa height field superimposed on relative humidity at 08:00 on June 17, 2023.

2023 年 6 月 17 日 11:13—11:14 在安徽省安庆市望江县鸦滩镇开展了一次火箭增雨作业，增雨目的为农业抗旱，火箭弹用量 2 枚，发射仰角为 71° ，方位角为 251° ，预估播撒高度为 5km。

3.2 物理检验

3.2.1 回波特征分析

图 2 展示了火箭增雨作业前后安庆 S 波段多普勒雷达的组合反射率 (CR)，使用组合反

射率来观察回波的演变可以有效地捕捉强降水和对流活动。由图 2a 和 b 可见，作业区域上空存在一条西南至东北延伸的带状回波，强度为 30~45 dBZ，目标云系于 11:09 左右进入催化作业影响范围，11:13 进行了火箭增雨作业，催化时机较为合理，以红色方框标识的目标云区域受到播云作用显著，整体沿东北方向移动，速度约为 40km/h。图 2c 和 d 显示，目标云区的最大反射率持续上升，直至播云后 24min 达到 48 dBZ 的峰值，且 45 dBZ 以上的强回波面积扩大至近 50km²，回波形态从条带状逐渐转为团块状，表明强对流区集中，对流活动增强。图 2e 和 f 显示，目标云回波强度和面积维持不变，对流活动趋于稳定。

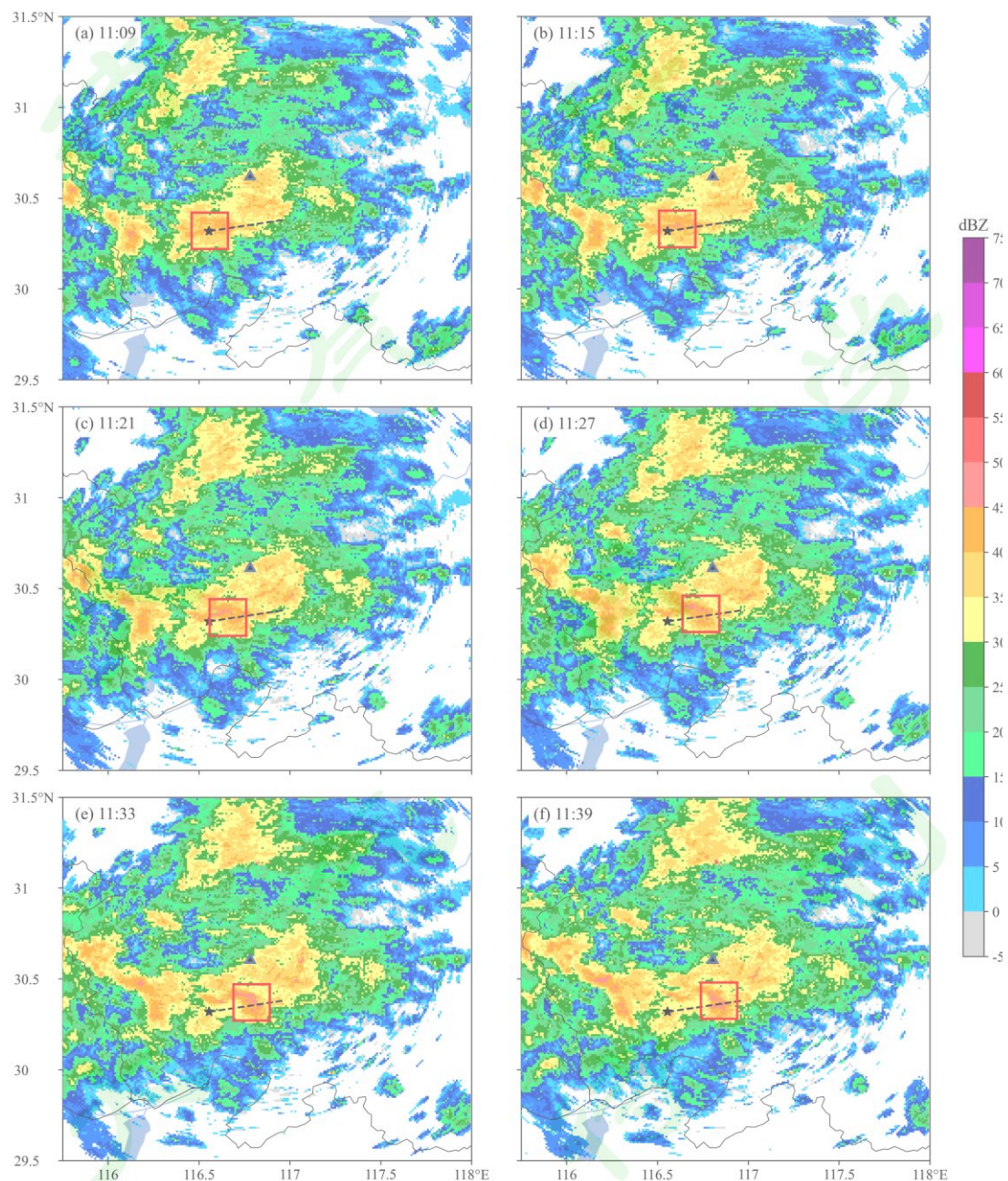
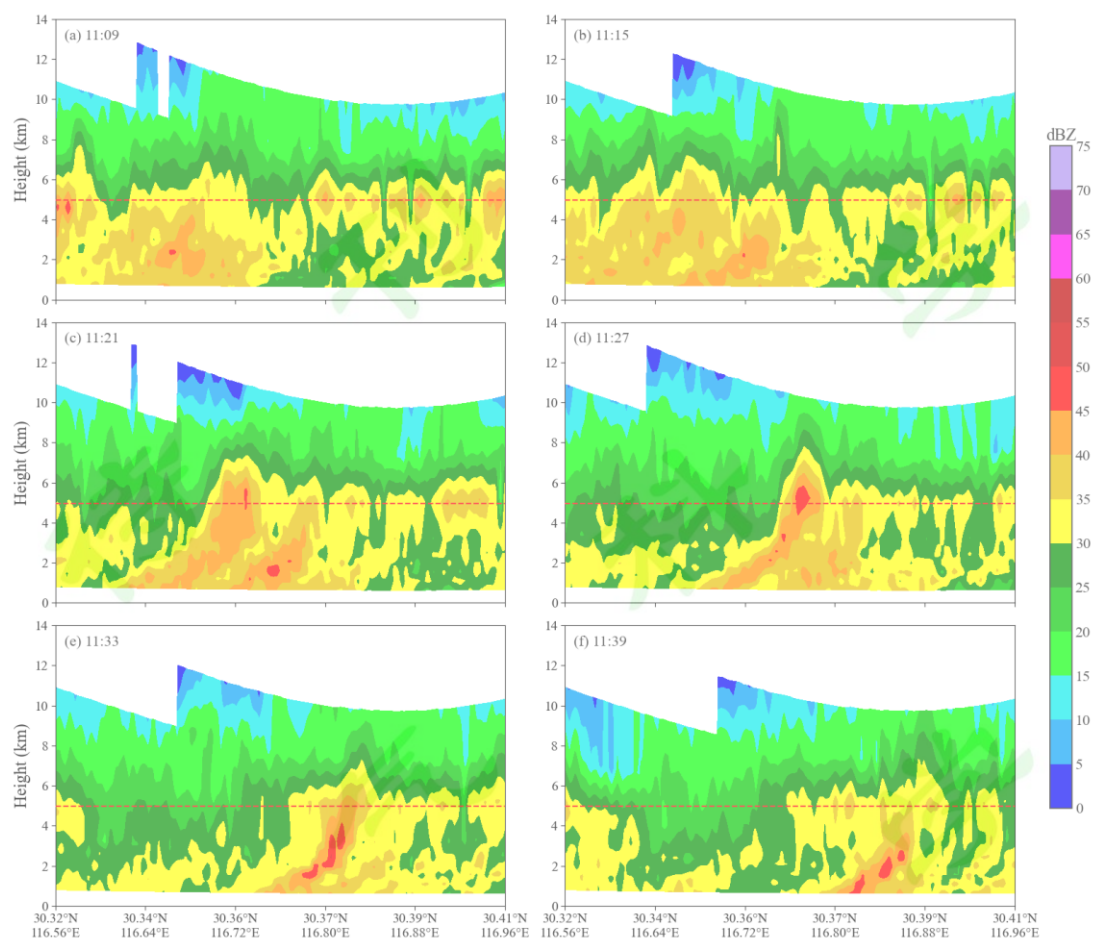


图 2 2023 年 6 月 17 日，安庆 SA 雷达于 11:09 - 11:39 的组合反射率图。（红色方框：目标云体，黑色五角星：火箭作业点位置，黑色三角形：雷达位置，黑色虚线：垂直剖面线）

Fig. 2 Composite reflectivity map of the Anqing SA radar from 11:09 to 11:39 on June 17,

2023. (Red box: target cloud unit, black pentagram: rocket operating spot, black triangle: radar spot, black dashed line: vertical profile line)

图 3 显示了沿着图 2 中黑色虚线的雷达反射率垂直剖面，由于体扫数据中仰角分辨率较低，直接获取的雷达回波数据在垂直方向上存在较大的高度间隔，因此对每个径向建立新的高度网格，通过线性插值得到连续的反射率分布，用于跟踪播云回波特征的垂直演变，其中虚线与回波移动方向平行。图 3a 和 b 显示了播云前的情况，目标云层的垂直分布相对均匀，雷达反射率高值区较为稀少，主要集中在云层的中下部。在 5 km 高度处可见一层融化层亮带特征，其雷达反射率显著高于上下层。亮带形成的主要原因是雪花和冰晶在零度层附近融化时，介电常数增大，即对电磁波的散射能力增大，导致反射率急剧上升(Fabry and Zawadzki, 1995)，通常情况下，亮带位于零度层高度下方数百米。根据安庆站当日 08:00 的探空资料，零度层高度约为 4.8 km，而图中亮带的上界达到 6 km。这是由于体扫模式采用固定仰角扫描，且观测剖面距离雷达约 40—50 km，远距离探测时，雷达波束的垂直分辨率降低，高仰角波束在高空的采样间隔增大，导致垂直方向上的数据离散度增加(Hu et al., 2025)。在此背景下，插值方法虽然能够改善回波结构的连续性，但在高空区域仍会拓宽回波的垂直范围，导致亮带在插值处理后呈现更厚的结构，并使其上界位置被高估。图 3c 显示了播云作业后 6 分钟的云层变化，作业播撒高度为 5km，处于云中过冷层，作业高度合理，目标云层中强回波的分布更为密集，尤其是在 4 至 6km 的高度范围内，平均回波强度从 30dBZ 显著增加至 40 dBZ 以上。此外，图中红色方框可见 5—6km 处出现一狭窄的强回波区，这可能源于上升气流对水汽以及催化剂的垂直输送，从而促进了云滴凝结和冰晶增长(郭学良等, 2021)。这一现象在 11:27 (图 3d) 更为明显，回波顶高进一步上升，45dBZ 以上的强回波区域显著扩大，强回波中心于 5km 附近维持。图 3e 和 f 中观察到强回波中心开始下沉，这表明云内部开始形成足够大的水滴或冰晶，这些降水粒子在重力作用下下落，从云中脱离并形成降水。通过对水平和垂直方向雷达播云特征的演变观察，可见人工增雨作业对云内的微物理过程和降水效率都具有重要影响。



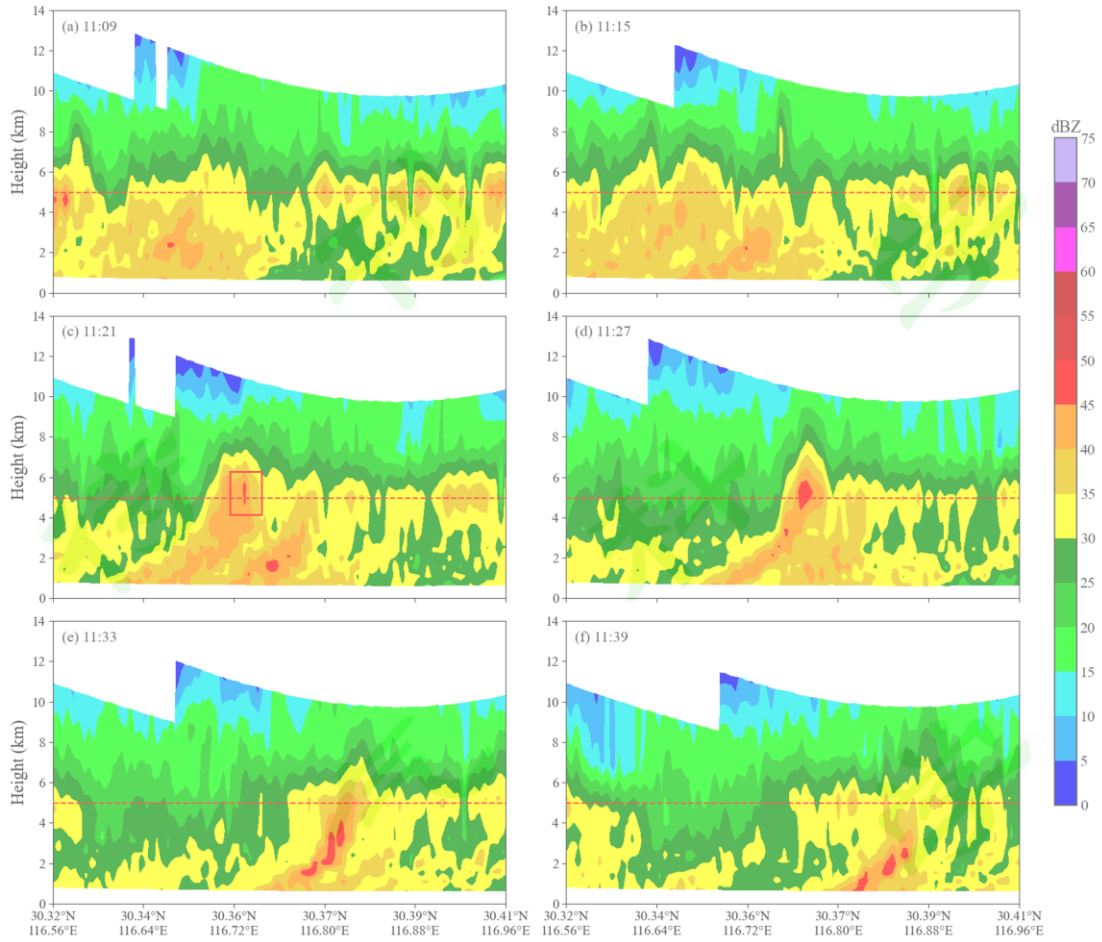


图 3 2023 年 6 月 17 日，安庆 SA 雷达在 11:09—11:39 沿图 2 所示剖面获取的垂直剖面图。红色虚线对应的高度为播撒高度，红色方框标注了强回波区的生成位置。

Fig. 3 Vertical profiles acquired by the Anqing SA radar from 11:09 to 11:39 on June 17, 2023 along the profile line shown in Fig. 2. The height corresponding to the red dashed line is the seeding height, the red box indicates where the strong echo region was generated.

3.2.2 雷达物理参量对比分析

在雷达覆盖的整个区域中，设定回波强度阈值为 35 dBZ，体积阈值为 25 km^3 ，运用质心最优化匹配法和拉格朗日方法，在作业前 0.5 小时至作业后 1.5 小时的时间段内，识别并追踪符合条件的各回波单元，通过计算得到回波单元中雷达物理参量的变化曲线。火箭作业点上空的回波单元被确定为作业单元，根据公式（1）至（4），计算各回波单元与作业单元之间的总相似离度。结果显示，位于作业单元正西方 50km 的回波单元与作业单元的总相似离度最小，两回波单元处于同一片降水系统中，由于作业期间盛行西风，该回波单元不受催化作业的影响，因此被选为对比单元。为了追踪嵌入广泛的层状云中的单个对流单元的演变，采用了移动封闭区域检验法。这一方法涉及划定目标区和对比区，在这些区域内识别符合条件的回波单元，并设置合适的移动速度和方向，以确保移动区域在各个时间点覆盖目标回波单元。图 4 展示了移动区域内回波识别与跟踪的示意图，背景回波为 2023 年 6 月 17 日 11:15 安庆 SA 雷达 3000m 高度处的雷达等高面位置显示图(CAPPI)。

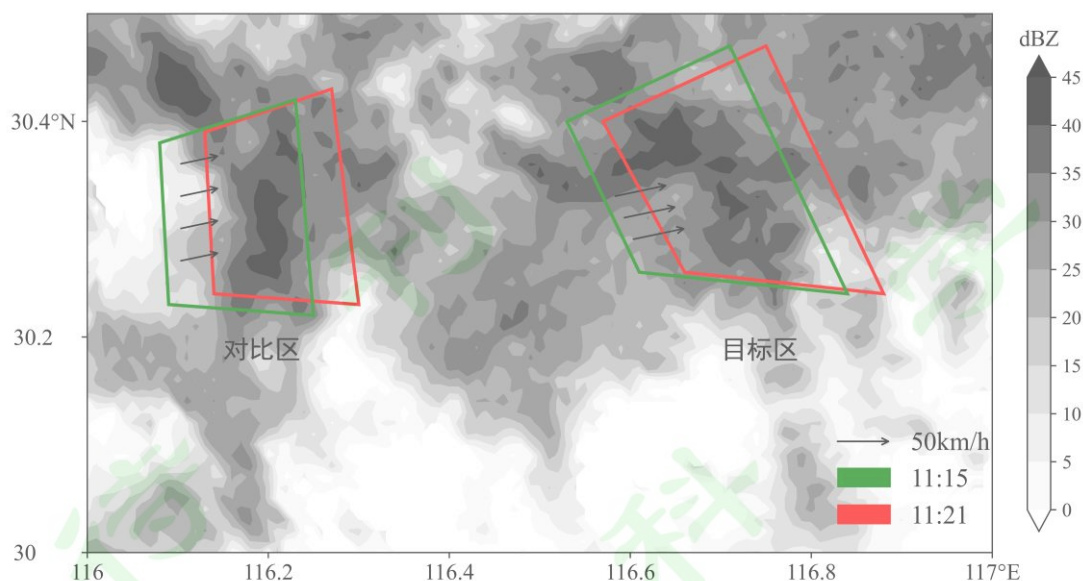


图 4 2023 年 6 月 17 日火箭增雨对比区和目标区回波识别与跟踪示意图。背景回波时间为 11:15，绿色框和红色框内分别表示 11:15 和 11:21 的移动区域范围，黑色箭头表示区域移动速度和方向。

Fig. 4 Schematic diagram of identification and tracking of the comparison area and target area echoes of rocket operation on June 17, 2023. The background echo time is 11:15, the green and red boxes indicate the range of moving areas at 11:15 and 11:21, respectively, and the black arrows indicate the speed and direction of area movement.

图 5 呈现了作业单元与对比单元在作业前后的雷达物理参量演变，包括回波顶高、回波体积、最大反射率、VIL 和降水通量，此外还计算了作业后各时次雷达物理参量的双比值，以详细分析其变化趋势。结果表明，作业单元的各参量值在作业后显著增加，均于 42min 内达到峰值并维持，相比之下，对比单元的各参量值在作业后短时间内有小幅提升，此后整体呈下降趋势。

具体来看，作业单元的回波顶高在作业前基本保持稳定，作业后则持续增高，并于第 36 分钟达到峰值 9km；回波体积在作业前即呈现出增长趋势，并在第 6 分钟达到初步高峰，虽在随后的 12min 略有回落，但从第 24 分钟开始迅速恢复并于第 42 分钟达到约 1000km³ 的峰值；最大反射率在作业前维持在约 43dBZ，作业后在 30min 内逐渐增大至峰值，达到 48dBZ；VIL 从第 6 分钟起的增长速度显著超过作业前，于第 24 分钟增长一倍，达到 5 kg/m²，此后在 4kg/m² 上下震荡维持；降水通量从作业时刻的 600m³/s 增加到 700m³/s，并于第 30 分钟后一直维持。这些变化表明了云体总体积的扩展，被催化云体在水平和垂直方向均发展旺盛，宏观结构显著增强，水汽凝结效率以及降水效率均有提高。相对地，对比单元的回波顶高在第 24 分钟被作业单元超越，之后呈波动性下降至大约 6km；回波体积在第 6 分钟前与作业单元趋势一致，但从第 12 分钟开始两者趋势完全相反，对比单元从最高的 500 km³ 减小至 190 km³；最大反射率在作业前持续稳定增长，并在第 6 分钟超过作业单元，之后持续减少至 36dBZ；VIL 在第 6 分钟增至与作业单元相同的 2.5 kg/m²，但随后不断下降至 1 kg/m² 以下；降水通量在第 12 分钟前递增至峰值，此后持续降低。总体而言，作业单元在作业前与对比单元在演变趋势上有良好的一致性，作业后对比单元强度逐渐走弱，而作业单元寿命得

到延长, 发展更加旺盛。

双比值分析显示, 作业后 1h 内, 5 个雷达物理参量值的双比值均显著增加并超过了阈值 1, 值得注意的是, 在作业后第 6 分钟, 所有参量的双比值较上一时次均有所下降, 这反映了作业效果可能存在滞后性。此外, 回波体积和 VIL 相较于自然背景的变化表现出最为显著的增幅, 双比值在某些时刻甚至超过了 2, 表明增雨作业对云体的宏观尺度和微观特性均产生了积极影响。相比之下, 最大反射率的双比值增幅较为有限, 这与云中降水粒子的尺寸分布有关, 相对于增加大粒子尺寸, 本次增雨作业可能更多地促进了云中中小尺寸粒子的形成。

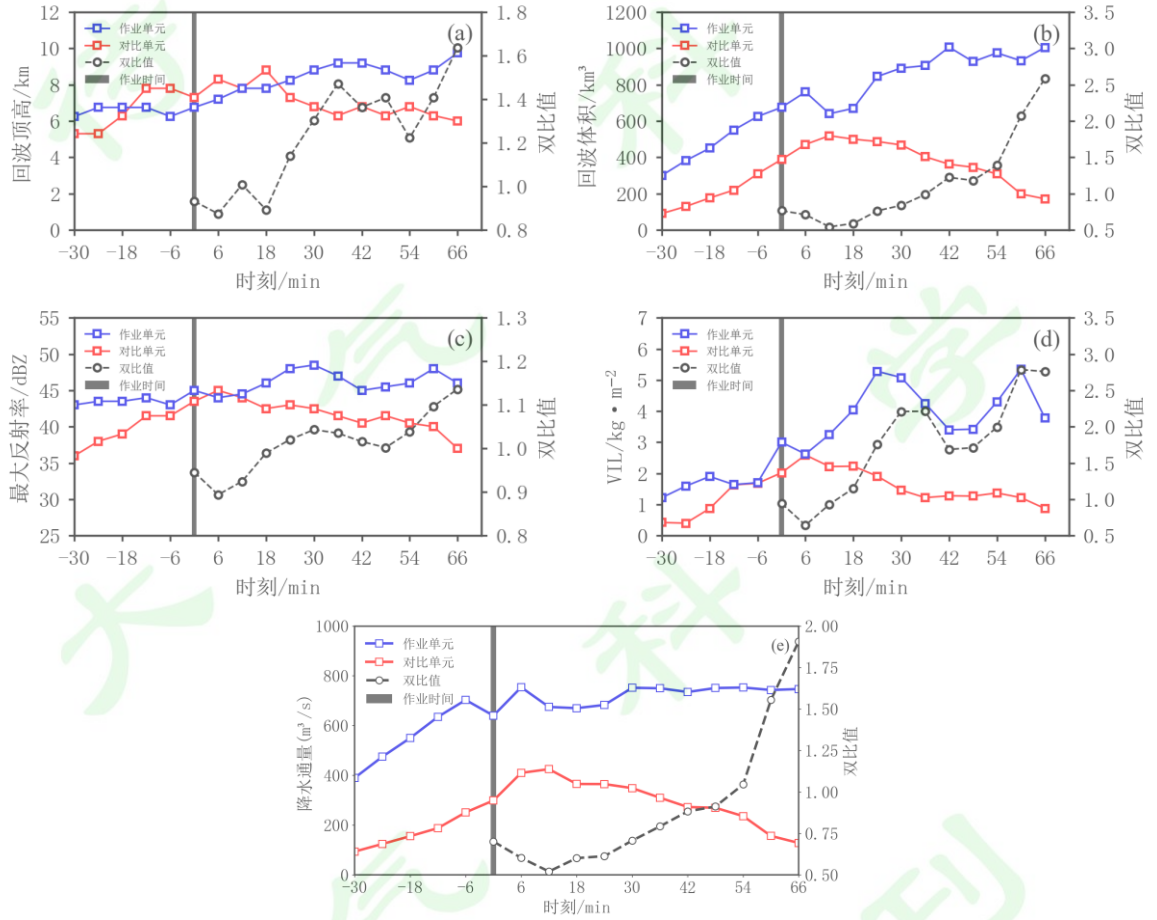


图 5 作业单元 (蓝色实线) 和对比单元 (红色实线) 五个雷达探测特征物理量的时间序列变化对比, 黑色虚线为双比值。(a) 回波顶高, (b) 回波体积, (c) 最大反射率, (d) VIL, (e) 降水通量。

Fig. 5 Comparison of the time-series variation of five radar-detected characteristic physical quantities between the operational unit (blue solid line) and the comparison unit (red solid line), with the black dashed line showing the double ratio variation. (a) echo top height, (b) echo volume, (c) maximum reflectivity, (d) vertical cumulative liquid water content (VIL), and (e) precipitation flux.

3.3 统计评估

3.3.1 降水区域的划分

在降水区域的聚类过程中, 距离度量的选择以及聚类数目的确定对最终聚类效果有显著

影响。为此，我们在两种聚类算法中分别应用了欧氏距离（L2 范数）和曼哈顿距离（L1 范数），并调整聚类数目从 2 到 20，以探索不同的聚类算法和聚类数目如何影响聚类效果。最后，聚类的效果通过计算轮廓系数（Silhouette Coefficient）来评估，轮廓系数是衡量簇内紧密程度与簇间分离程度的指标，系数值介于-1 与 1 之间，系数值越大表明聚类效果越理想。

图 6a 给出了不同聚类方法和聚类数目下的轮廓系数值，红色虚线显示了最大轮廓系数值对应的组合。结果表明，类别数较少时 AGNES 算法表现优于 K-Medoids，然而随着类别数的增加，K-Medoids 的效果更佳；在大多数情况下，使用欧氏距离的聚类效果优于曼哈顿距离。基于上述分析，我们最终选择在欧氏距离度量下，应用 K-Medoids 算法将安徽省南部降水区域划分为 11 类。图 6b 通过插值直观地展示了聚类划分结果，其中各个网格点的类别划分是通过加权 KNN 算法估计得到的。

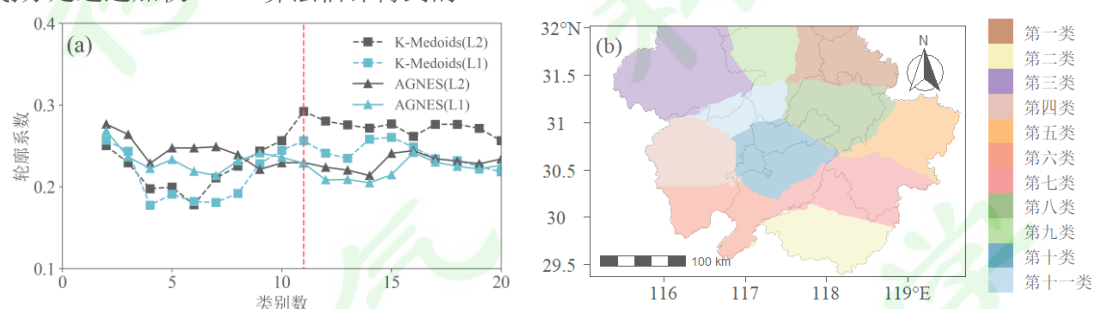


图 6 (a) 不同聚类方法和聚类数目下的轮廓系数值，(b) 安徽省南部 6 月份降水区域化结果。

Fig. 6 (a) Values of contour coefficients under different clustering methods and number of clusters, and (b) results of regionalization of precipitation in southern Anhui Province in June.

3.3.2 作业影响雨量站点和对比雨量站点的确定

安徽省安庆探空站当日 08 时的探空数据显示催化层高度的风速及风向约为 17m/s 和 247°，根据周毓荃和朱冰(2014)对火箭催化扩散规律的研究，考虑以下一般情况：火箭播撒的催化剂可看作瞬时线源，播撒长度为 5km，其中与作业点水平距离为 3km 至 8km 处为催化剂高浓度区，扩散宽度固定为 6km，不随时间变化，扩散时间为 2h。杨慧玲等(2024)对高炮作业影响区的研究中提到，催化剂可能被云下环境的上升气流带入对流云中，进而由对流云输送至对流中上层，因此对流层中层以及低层的水平风也应纳入考虑。再结合火箭作业信息，本文对此次作业的总影响区定义如下：由火箭弹发射的方位角确定线源具体位置，在线源处根据扩散宽度做出矩形面源，考虑 850hPa 到 500hPa 高度的水平风对催化剂的平流输送作用，对各个高度上的矩形面源在扩散时间内扫过的多边形区域取并集，即总影响区的范围。

如图 7 所示，白色封闭区域代表计算得到的总影响区，影响区内的雨量站点用空心圆表示，对比区雨量站点则以叉号标记。根据雨量站点聚类结果，总影响区内的雨量站点分布于第四类和第十类降水区域，因此可以被视为两个副影响区的叠加，其中副影响区 1 及其对应的副对比区 1 中的雨量站点位于第四类降水区域内，副影响区 2 及其对应的副对比区 2 内

的雨量站点位于第十类降水区域中。

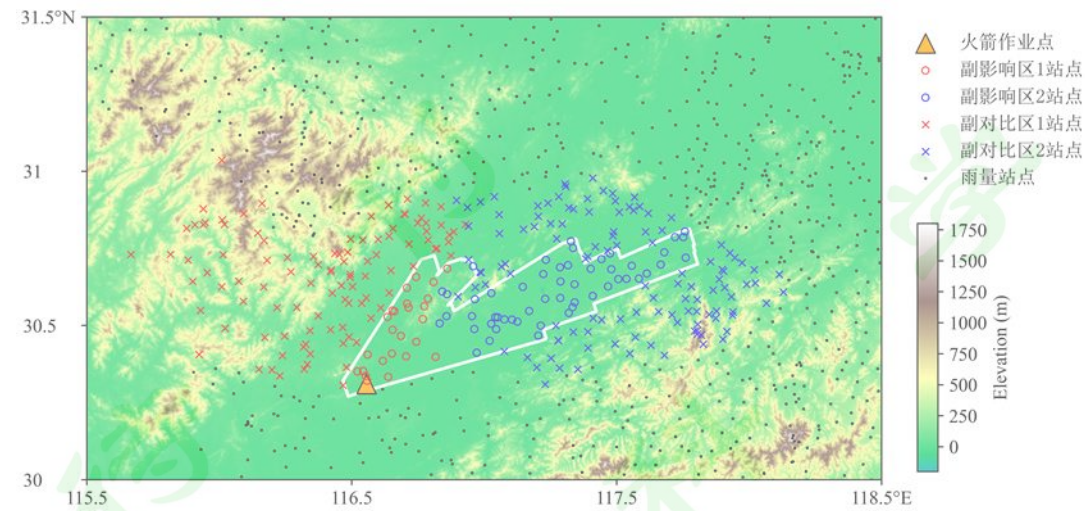
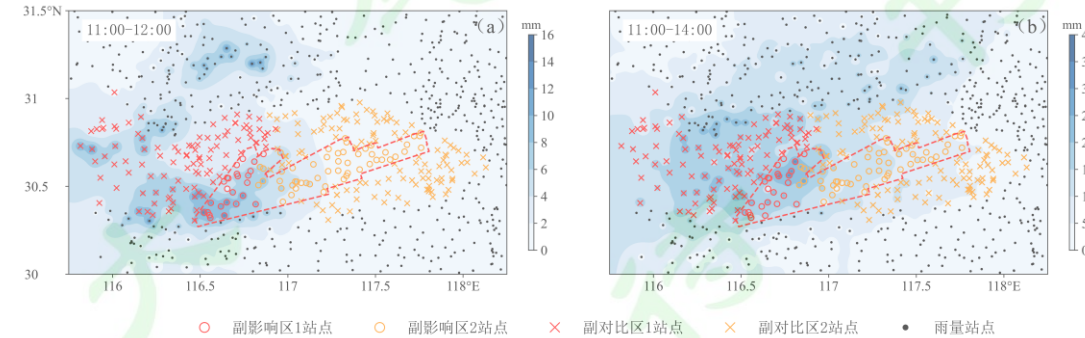


图 7 2023 年 6 月 17 日安徽省鸦滩镇火箭增雨作业个例的影响雨量站点及对比雨量站点位置示意图。

Fig. 7 Diagram of the impact rainfall stations and comparative rainfall stations for rocket rain enhancement operation case in Yatan Town, Anhui Province on June 17, 2023.

3.3.3 作业后雨量实况分析

图 8a 和 b 分别展示了通过反距离权重法插值计算得到的作业后 1h 和作业后 3h 的累积降雨量分布。由图 8a 可见，在作业后 1h，作业点附近形成了一个明显的降水中心，主要覆盖副影响区 1 以及部分副对比区 1 的雨量站。图 8b 所示的 3h 累积降雨量分布显示，该降水中心沿下风方向移动了约 40 公里，依然位于作业影响区内。图 8c 和 d 给出了两个副影响区和副对比区内站点每小时雨量的箱线图，结果显示作业后 1h 内副影响区 1 的增雨效果最为显著，其雨强的中位数比副对比区 1 高了近 7mm/h，且副影响区 1 内所有站点在作业后 3h 内每小时降雨量均大于 0（图 8c）；而副影响区 2 由于距离作业点较远，其增雨效果主要在作业后第二个小时表现较为明显（图 8d）。总体而言，除了 12—13h 时段副影响区 1 的整体降雨量低于其对比区外，在其他时间段，影响区站点的雨量中位数、第 25 和第 75 百分位数均超过对比区，这表明增雨作业取得了良好的效果。



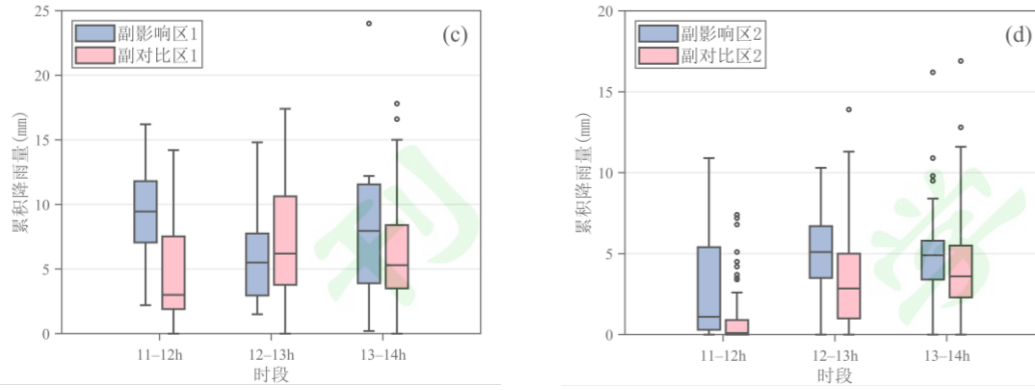


图 8 2023 年 6 月 17 日 (a) 11:00—12:00、(b) 11:00—14:00 累积降雨量分布图, (c) 副影响区 1 和副对比区 1、(d) 副影响区 2 和副对比区 2 的 11:00-14:00 逐小时雨量箱线图。

Fig.8 Cumulative rainfall distribution map for (a) 11:00-12:00, and (b) 11:00-14:00, as well as hourly rainfall box plots from 11:00 to 14:00 for (c) sub-impact zone 1 and sub-comparison zone 1, and (d) sub-impact zone 2 and sub-comparison zone 2 on June 17, 2023.

3.3.4 雨量回归模型的评估及优选

本文使用副对比区内各雨量站点的 3h 累积降雨量作为自变量, 以副影响区内雨量站点的 3h 累积降雨量平均值作为因变量, 通过交叉验证的方法评估六种回归模型的预测性能。交叉验证的过程中, 数据集被随机分割, 其中 80% 作为训练集用于模型训练, 剩余的 20% 则作为测试集, 用于评估模型的泛化能力。图 9(a)、(b) 使用泰勒图分别展示了副影响区 1 和副影响区 2 在测试集上应用六种模型得到的回归预估值与观测值的统计比较, 泰勒图提供了一个较为直观的方式来比较观测数据和模型预测数据之间的匹配程度(Taylor and Karl, 2001)。泰勒图上的每个点可以同时表示标准差、相关系数和中心均方根误差, 图中标记为“OBS”的黑色散点表示实测数据, 其他颜色的散点代表不同的回归模型。

由图 9a 可见, ElasticNet 回归在六种模型中表现最佳。准确性方面, 其预测值与观测值的相关系数超过 0.95, 中心均方根误差约为 1.5mm/3h, 均优于其他模型, 随机森林次之。而一致性方面, 线性回归、Lasso 回归及 ElasticNet 回归的标准差与观测数据的标准差 (5mm/3h) 相当, 展现出较高的数据匹配度; 相比之下, 随机森林在捕捉数据的变异性上有所不足, 标准差约为 4.5mm/3h, 这表明在该测试集上, 线性回归模型相对于随机森林在模拟数据波动幅度方面更为准确。在性能较差的模型中, SVR 和决策树显示出与观测值较低的相关性, 并产生了相对较大的中心均方根误差 (约 3.5mm/3h), 这表明站点之间的降雨量关系可能更倾向于线性。图 9b 的分析结果与图 9a 相似, 有所区别的是, 相比于前一样本, 随机森林和决策树模型在此样本中的相对预测性能均有提升, 这可能源于副影响区 2 和副对比区 2 之间极高的雨量相关性, 减少了过拟合问题。尽管如此, 线性回归模型的表现依旧优越, 其中 ElasticNet 回归提供了与观测数据最接近的预测, 并表现出最优的一致性。因此, 本文选择采用 ElasticNet 回归模型进行增雨效果的定量估计。

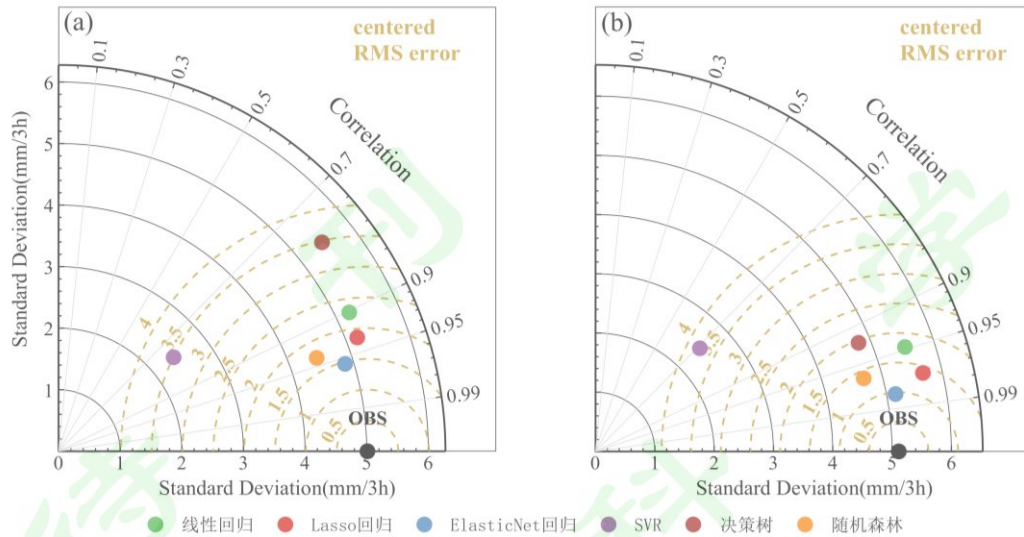


图 9 2023 年 6 月 17 日 (a) 副影响区 1 和 (b) 副影响区 2 在测试集中的六种模型预估值与观测值的统计比较泰勒图。(黑色实线圆形轨迹表示标准差, 黄色虚线圆形轨迹代表中心均方根误差, 灰色辐射线表示相关系数)

Fig.9 Taylor plots of statistical comparison among the six models' estimated values and observed values for (a) sub-impact zone 1 and (b) sub-impact zone 2 in the test set on June 17, 2023. (The black solid circular trajectories represent the standard deviations, the yellow dashed circular trajectories represent the central root mean square errors, and the gray radiation lines represent the correlation coefficients.)

3.3.5 增雨作业效果的定量估计

图 10a 展示了副影响区 1 的雨量站点平均 3h 累积降雨量的预测值与实际观测值之间的关系, 结果显示, 共有 613 个有效样本, 考虑自变量数量对 R^2 (决定系数) 的影响后, 计算得到 R_{fit}^2 (校正决定系数) 为 0.894, 表明模型解释了大部分变异。同时, 采用 10 折交叉验证, 用 $\bar{R}_{cv}^2$ 代表交叉验证得到的 R_{fit}^2 的平均值, 结果显示 $\bar{R}_{cv}^2$ 接近 0.7, 验证了模型在未知样本上的预测能力。均方根误差 RMSE 和 10 折交叉验证的平均均方根误差 $\overline{RMSE}_{cv}$ 分别为 1.72mm/3h 和 2.7mm/3h, 远低于样本的标准差 5.64mm/3h。由图 10b 所示, 副影响区 2 的历史有效样本数为 752, R_{fit}^2 和 $\bar{R}_{cv}^2$ 分别高达 0.952 和 0.864, 表明副影响区 2 与副对比区 2 的站点雨量相关性高, 模型有很强的解释能力。RMSE 和 $\overline{RMSE}_{cv}$ 分别为 0.99mm/3h 和 1.57mm/3h, 反映出模型预测的准确性很高。此外, 通过 F 检验评估了 ElasticNet 回归模型的有效性, 结果显示, 副影响区 1 的 F 统计量为 232.52, 副影响区 2 的 F 统计量为 910.66, 两者的 p 值均接近于 0, 表明回归模型整体显著。综上所述, ElasticNet 回归模型在两个副影响区的应用中表现稳定, 能够提供较为准确且一致的预测结果。

最后, 将回归模型应用到本次火箭增雨作业个例中, 通过式 (6) 和式 (7) 进行定量评估。结果显示, 作业影响雨量站点的实测平均 3h 累积降雨量为 16.02mm, 而通过 ElasticNet 回归模型预测的 3h 累积自然降雨量为 13.10mm, 由此可得绝对增雨量为 2.92mm, 相对增雨率为 22.3%, 根据公式 (8), 分别对两个副影响区的实测降水量与回归模型预测降水量之间的差异进行单样本 T 检验, 结果显示, 副影响区 1 的 t 值为 2.12, 副影响区 2 的 t 值为

2.37，其对应的 p 值分别为 0.034 和 0.018，均小于显著性水平 0.05。这表明，在 95% 置信水平下，两个副影响区均有显著的增雨效应，增雨作业取得了良好效果。

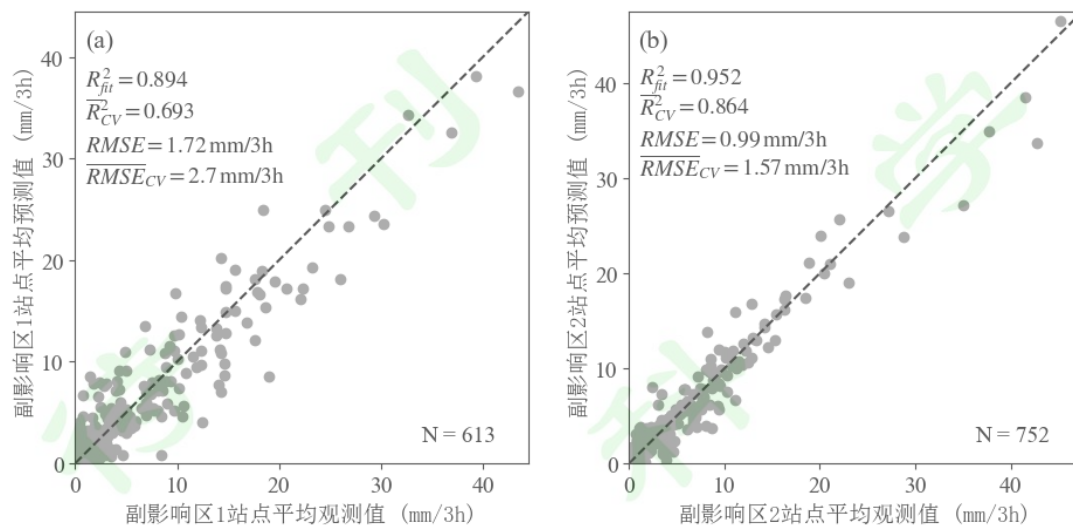


图 10 (a) 副影响区 1 和 (b) 副影响区 2 内雨量站点历史平均 3h 累积降雨量的 ElasticNet 回归预测值和观测值对比图。

Fig. 10 Comparison of predicted and observed ElasticNet regression values for historical average 3-h cumulative rainfall at rainfall stations in (a) sub-impact zone 1 and (b) sub-impact zone 2.

4 结论与讨论

本文使用安徽省 2016—2021 年逐年 6 月份国家级和区域级自动雨量站逐小时降雨量数据、安庆 S 波段雷达基数据和安庆探空等资料，从作业单元的回波物理参量变化和地面影响区的降雨统计量变化两个方面对安徽省 2023 年 6 月 17 日一次积层混合云火箭增雨作业进行了综合效果评估，结果如下：

(1) 在播云后短时间内，观察到播撒高度上方 1km 范围内出现一狭窄的强回波区，播云后 24min，强回波面积扩大，播撒高度处形成一强回波中心，回波形态由条带状变为团块状，强对流区集中。

(2) 作业单元在作业前与对比单元在演变趋势上具有良好的一致性，作业后对比单元强度逐渐走弱，而作业单元寿命得到延长，发展更加旺盛，表明增雨作业对云体宏观结构和降水效率的显著影响。

(3) 作业后 1h 内，5 个雷达回波参量的双比值均大于 1，进一步验证了作业的有效性。其中回波体积和 VIL 的双比值在某些时刻甚至超过了 2，表明增雨作业对云体的宏观尺度和微观特性均产生了积极影响，而最大反射率的增幅相对较小，暗示作业可能更多地促进了云中中小尺寸的降水粒子的形成。

(4) 作业当天雨量实况显示，催化作业后作业影响区内出现降水中心；在作业后的大部分时间段，影响区内站点的雨量中位数、第 25 和第 75 百分位数普遍高于对比区，表明增

雨作业取得了良好的效果。

(5) 交叉验证结果显示 ElasticNet 回归模型在影响区的降雨量预测上表现最优, 将回归模型应用于增雨个例, 得到 3h 绝对增雨量为 2.92mm, 相对增雨率为 22.3%, 单样本 t 检验结果显示, 两个副影响区的 t 值分别为 2.12 和 2.37, p 值均小于 0.05, 表明增雨效应在 95%置信水平下显著。

参考文献

- 曹伟华, 陈明轩, 高峰, 等. 2019. 雷暴区域追踪矢量与雷暴单体追踪矢量融合临近预报研究[J]. 气象学报, 77(6): 1015-1027. Cao Weihua, Chen Mingxuan, Gao Feng, et al. 2019. A vector blending study based on object-based tracking vectors and cross correlation tracking vectors[J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 77(6): 1015-1027.
- Dixon, Michael, Gerry W. 1993. TITAN: Thunderstorm Identification, Tracking, Analysis, and Nowcasting—A Radar-based Methodology. J. Atmos. Oceanic Technol., 10(6): 785-797.
- 樊志超, 周盛, 汪玲, 等. 2018. 湖南秋季积层混合云系飞机人工增雨作业方法[J]. 应用气象学报, 29(2): 200-216. Fan Zhichao, Zhou Sheng, Wang Ling, et al. 2018. Methods of aircraft-based precipitation enhancement operation for convective-stratiform mixed clouds in autumn in Hunan Province[J]. J. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese), 29(2): 200-216.
- 房彬, 肖辉, 王振会, 等. 2005. 聚类分析在人工增雨效果检验中的应用[J]. 大气科学学报, 28(6): 739-745. Fang Bin, Xiao Hui, Wang Zhenhui, et al. 2005. Application of Cluster Analysis to the Statistical Assessment of the Effect of Artificial Rain Enhancement[J]. Trans. Atmos. Sci. (in Chinese), 28(6): 739-745.
- Fabry F, Zawadzki I. 1995. Long-Term Radar Observations of the Melting Layer of Precipitation and Their Interpretation[J]. J. Atmos. Sci., 52(7): 838-851.
- French J R, Friedrich K, Tessendorf S A, et al. 2018. Precipitation formation from orographic cloud seeding[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 115(6): 1168-1173.
- Friedman J, Hastie T, Tibshirani R. 2010. Regularization Paths for Generalized Linear Models via Coordinate Descent[J]. Journal of Statistical Software, 33(1): 1-22.
- 郭学良, 付丹红, 郭欣, 等. 2021. 我国云降水物理飞机观测研究进展[J]. 应用气象学报, 32(6): 641-652. Guo Xueliang, Fu Danhong, Guo Xin, et al. 2021. Advances in aircraft measurements of clouds and precipitation in China[J]. J. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese), 32(6): 641-652.
- Hu P, Kou L, Wang W, et al. 2025. Vertical microphysical structures of summer heavy rainfall in the Yangtze-Huaihe River Valley from GPM DPR data[J]. Atmospheric Research, 315(3): 107833-

107833.

- 贾烁, 姚展予. 2016. 江淮对流云人工增雨作业效果检验个例分析[J]. 气象, 42(2): 238-245.
- Jia Shuo, Yao Zhanyu. 2016. Case Study on the Convective Clouds Seeding Effects in Yangtze Huaihe Region[J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 42(2): 238-245.
- Li D, Zhao C, Li P, et al. 2022. Macro-and micro-physical characteristics of different parts of mixed convective-stratiform clouds and differences in their responses to seeding[J]. Advances in Atmospheric Sciences (in Chinese), 39(12): 2040-2055.
- Li X , Yang Y , Mi J ,et al. 2021. Leveraging machine learning for quantitative precipitation estimation from Fengyun-4 geostationary observations and ground meteorological measurements[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 14(11): 7007-7023.
- 李德俊, 王飞, 柳草, 等. 2022. 基于区域多参量动态对比法的地面人工增雨作业技术优化研究[J]. 暴雨灾害, 41(5): 588-597. Li Dejun, Wang Fei, Liu Cao, et al. 2022. Study on optimization of cloud seeding ground operation technology based on regional multi-parameters dynamic contrast method[J]. Torrential Rain and Disasters (in Chinese), 41(5): 588-597.
- 李红斌, 傅瑜, 王秀萍, 等. 2016. 一次层状云火箭增雨作业效果分析[J]. 气象, 042(011): 1402-1409. Li Hongbin, Fu Yu, Wang Xiuping, et al. 2016. Effect Verification and Analysis for Artificial Precipitation Enhancement of Stratiform Cloud by Rocket in Dalian[J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 42(11): 1402-1409.
- 李开乐. 1986. 相似离度及其使用技术[J]. 气象学报, 44(2): 174-183. Li Kaile. 1986. A new similarity parameter and its application[J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 44(2): 174-183.
- Quinlan J R. 1996. Improved use of continuous attributes in C4.5[J]. Journal of Artificial Intelligence Research, 4(1): 77-90.
- Smola A J, Schölkopf B. 2004. A tutorial on support vector regression[J]. Statistics and Computing, 14(3): 199-222.
- 孙玉稳, 银燕, 孙霞, 等. 2017. 冷云催化宏微观物理响应的探测与研究[J]. 高原气象, 036(005): 1290-1303. Sun Yuwen, Yin Yan, Sun Xia, et al. 2017. Observation and Study of Macro and Micro Response in Cold Cloud Catalysis[J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 36(5): 1290-1303.
- 唐仁茂, 向玉春, 叶建元, 等. 2009. 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, 35(8): 70-75. Tang Renmao, Xiang Yuchun, Ye Jianyuan, et al. 2009. Application of Data Observed by Several Instruments in Effective Verification of Artificial Precipitation Enhancement[J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 35(8): 70-75.
- Taylor, Karl E . 2001. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 106(D7):7183-7192.

- Tibshirani R. 1996. Regression shrinkage and selection via the lasso[J]. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, 58(1): 267-288.
- 王飞, 李集明, 姚展予, 等. 2022. 我国人工增雨作业效果定量评估研究综述[J]. *气象*, 48(8): 945-962. Wang Fei, Li Jiming, Yao Zhanyu, et al. 2022. Advances of Quantitative Evaluation Studies of Artificial Precipitation Enhancement in China[J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 48(8): 945-962.
- Wang J, Yue Z, Rosenfeld D, et al. 2021. The Evolution of an AgI Cloud-Seeding Track in Central China as Seen by a Combination of Radar, Satellite, and Disdrometer Observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126(11): e2020JD033914.
- 王婉, 姚展予. 2012. 非随机化人工增雨作业功效数值分析和效果评估[J]. *气候与环境研究*, 17(6): 855-861. Wang Wan, Yao Zhanyu. 2012. Numerical Analysis of Statistical Power in Precipitation Enhancement Experiment in Beijing and Estimation of Operational Cloud Seeding Effectiveness[J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 17(6): 855-861.
- Wang W, Yao Z, Guo J, et al. 2019. The Extra-Area Effect in 71 Cloud Seeding Operations during Winters of 2008–14 over Jiangxi Province, East China[J]. *Journal of Meteorological Research*, 33(3): 528-539.
- 王以琳, 姚展予, 林长城. 2018. 人工增雨作业前后不同高度雷达回波分析[J]. *干旱气象*, 36(4): 644-651. Wang Yilin, Yao Zhanyu, Lin Changcheng. 2018. Analysis of Radar Echoes at Different Heights Before and After Precipitation Enhancement[J]. *Journal of Arid Meteorology (in Chinese)*, 36(4): 644-651.
- WMO. WMO statement on the status of weather modification[M], 2003
- 吴香华, 牛生杰, 金德镇, 等. 2015. 自然降水变异对人工增雨效果评估的影响[J]. *中国科学: 地球科学*, 45(07): 1011-1019. Wu Xianghua, Niu Shengjie, Jin Dezhen, et al. 2015. Influence of natural rainfall variability on the evaluation of artificial precipitation enhancement[J]. *Science China: Earth Sciences (in Chinese)*, 45(07): 1011-1019.
- 谢五三, 唐为安, 宋阿伟. 2019. 多时间尺度 SPI 在安徽省气象干旱监测中的适用性研究[J]. *气象*, 45(11): 1560-1568. Xie Wusan, Tang Weian, Song Awei. 2019. Applicability Study of SPI in Multiple Time Scales in Meteorological Drought Monitoring in Anhui Province[J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 45(11): 1560-1568.
- 邢峰华, 黄菲婷, 李光伟, 等. 2023. 海南岛中部山区暖云人工增雨催化试验物理效果分析[J]. *干旱气象*, 41(1): 114-122. Xing Fenghua, Huang Feiting, Li Guangwei, et al. 2023. Physical effect analysis of warm cloud-seeding experiment for artificial precipitation enhancement in central mountain areas of Hainan Island[J]. *Journal of Arid Meteorology (in Chinese)*, 41(1): 114-122.

- 杨慧玲, 孙跃, 肖辉, 等. 2024. 安徽省燃气炮人工增雨作业效果综合评估[J]. 应用气象学报, 35(1): 103-117. Yang Huiling, Sun Yue, Xiao Hui, et al. 2024. Comprehensive evaluation of rainfall enhancement of gas cannon in Anhui Province[J]. J. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese), 35(1): 103-117.
- 姚展予, 贾烁, 王飞. 2016. 人工增雨作业效果检验技术指南 [R]. 气减函 [2016]36 号, 中国气象局应急减灾与公共服务司发文至全国气象部门参照执行, 2016 年 7 月 1 日. Yao Zhanyu, Jia Shuo, Wang Fei. 2016. Technical guide for effect evaluation of precipitation enhancement [R]. Department of Emergency Response, Disaster Mitigation and Public Services, China Meteorological Administration, Report No: 2016-36 (in Chinese).
- 叶家东, 罗幸贫, 曾光平, 等. 1984. 随机试验功效的数值分析[J]. 气象学报, 42(1): 69-79. Ye Jiadong, Luo Xingpin, Zeng Guangping, et al. 1984. Numerical analysis of statistical power in randomized precipitation enhancement experiment[J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 42(1): 69-79.
- 翟羽, 肖辉, 杜秉玉, 等. 2008. 聚类统计检验在人工增雨效果检验中的应用[J]. 大气科学学报, 31(2): 228-233. Zhai Yu, Xiao Hui, Du Bingyu, et al. 2008. Application of the Cluster Statistical Test to Effectiveness Evaluation of Artificial Precipitation Enhancement[J]. Trans. Atmos. Sci. (in Chinese), 31(2): 228-233.
- 周毓荃, 朱冰. 2014. 高炮、火箭和飞机催化扩散规律和作业设计的研究[J]. 气象, 40(8): 965-980. Zhou Yuquan, Zhu Bing. 2014. Study on Diffusion Regularity and Operation Design of Antiaircraft Gun, Rocket and Plane Cloud Seeding[J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 40(8): 965-980.
- 祝晓芸, 姚展予. 2017. 江西省对流云火箭增雨作业个例分析[J]. 气象, 43(2): 221-231. Zhu Xiaoyun, Yao Zhanyu. 2017. Analysis of Convective Cloud Seeding Cases by Rockets in Jiangxi Province[J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 43(2): 221-231.