

吉林省一次飞机增雨过程方案设计及效果分析

孙海燕¹ 谷笑楠¹ 王旗^{1,2} 齐彦斌^{1,2}

(1 吉林省人工影响天气办公室, 长春 130062;

2 中国气象局吉林省人民政府人工影响天气联合开放实验室(省重点实验室), 长春 130062)

摘要: 利用多普勒雷达、地面降水、飞机等观测资料, 对2016年4月12日东移北抬影响吉林省的河套低压系统进行人工增雨方案设计和效果分析, 根据作业需求设计了增雨作业实施方案, 选取影响区和对比区, 分析了作业前后雷达回波的变化、地面降水量变化。结果表明: 此次河套低压北上天气系统, 与高空槽配合, 在吉林省境内水汽输送十分丰富, 具有很好的作业条件。通过考虑多种影响因素, 设计了飞行作业方案, 实施作业; 通过影响区和对比区雷达回波对比, 作业后影响区回波具有明显强于对比区回波的特点, 且增加了回波维持时间; 降水量分析显示, 影响区地面降水维持时间也较对比区维持时间增长。

关键词: 增雨, 影响区, 对比区

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2019.06.019

A Case Study of Design and Effectiveness Analysis of the Rainfall Enhancement by Aircraft in Jilin Province

Sun Haiyan¹, Gu Xiaonan¹, Wang Qi^{1,2}, Qi Yanbin^{1,2}

(1 Jilin Weather Modification Office, Changchun 130062

2 Joint Open Laboratory for Weather Modification of China Meteorological Administration / People's Government of Jilin Province (Key Laboratory of Jilin Province), Changchun 130062)

Abstract: Based on the observation data of Doppler radar, precipitation and aircraft, the design and effect analysis of rainfall enhancement in Meso Scale Vortex in Inner Mougolia Irrigation Area of Yellow River which moved towards Northeast and influenced Jilin Province on April 12, 2016 were carried out. According to the requirements, the implementation scheme of rainfall enhancement was designed. The influence region and the control region were selected. Changes of radar echo and precipitation in these regions before and after the operation were analyzed. Result shows that Meso Scale Vortex in Inner Mougolia Irrigation Area of Yellow River moved towards Northeast and was in cooperation with the upper trough. It brought plenty of vapor to Jilin Province and was with good seeding conditions. By considering many influencing factors, the flight operation scheme was designed and the operation was carried out. By comparing, the echo in the influence region is obviously stronger than that in the control region. Echo maintenance time is increased. The analysis shows that the maintenance time of precipitation in the influence region is also longer than that in the control region.

Keywords: rainfall enhancement, influence region, control region

0 引言

人工增雨作业方案设计和效果检验是人工增雨作业过程中的两个重要环节。科学合理的作业方案设计是作业效果的基础, 作业是否有效果可以验证作业方案设计的合理性。对此, 国内外气象工作者做了大量工作。作业方案设计方面: 李念童等^[1]结合国内

人工增雨飞机的性能, 着重介绍在催化作业和探测时在特定高度上进行水平观测的方案设计; 张永强^[2]针对苏北地区火箭人工增雨作业方案设计进行研究; 刘海群^[3]基于火箭的自身性能特点, 对火箭增雨作业方案进行了研究; 白先达等^[4]分别对各季节、各作业云系的作业进行了总结, 提出了适合不同季节的人工增雨作业方案。效果检验方面: 房彬等^[5]发展了基于聚类的浮动对比区回归统计检验方法(CA-FCM); 曾光平、吴章云^[6]利用雷达资料分析了催化前后宏观参量的变化; 王以琳、雷恒池^[7]通过机载PMS粒子探测系统和GPS卫星定位系统观测, 获得了催化前后云中微物理量变化的证据。

收稿日期: 2018年12月24日; 修回日期: 2019年7月26日
第一作者: 孙海燕(1978—), Email: jl010429@163.com
通信作者: 齐彦斌(1963—), Email: qiyanbin88@126.com
资助信息: 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201406033-05),
国家自然科学基金项目(41775140)

吉林省人影工作者在飞机增雨作业方面做了大量工作。汪学林等^[8]利用吉林机载探测仪器,包括:TPM-1云滴谱仪,TPZ-2含水量仪,铝箔冰雪晶取样器,CM-43和MOS单结管飞机气象计等,在21架次探测中共取得冰雪晶资料469份。冰晶浓度在 $10^{-2} \sim 10^2 \text{ L}^{-1}$,平均 12.3 L^{-1} 。雪晶浓度一般集中在 $10^{-2} \sim 10^1 \text{ L}^{-1}$,平均为 4.04 L^{-1} 。冰质点浓度随温度的分布:其浓度在 $0 \sim -3 \text{ }^\circ\text{C}$ 向上增加到 $-3 \sim -6 \text{ }^\circ\text{C}$ 达到极大,为 32.8 L^{-1} ,往上又单调减少。晶形随高度的分布规律,一般云顶大都由柱状、薄片板状组成。中上部大都由薄片板状、带核心圆盘板状和柱状组成,夹有少量枝星状。云的中下部大都由板状、破碎板状、枝状、破碎枝状、针状等组成。云底大都由针、枝、少量霰及雨滴组成。平均液态含水量的分布:21架次飞行共取得含水量资料582份;平均液态含水量为 $0.12 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$,一般在 $0 \sim 0.77 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。冰质点浓度在气旋中心北侧比暖锋面和暖锋前明显较高;平均含水量暖锋面是 $0.166 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$,比暖锋前和气旋中心北侧都大。暖锋面附近层状云中正温层含水量最大,负温层最小;气旋中心北侧负温层最大;暖锋前正温层最小。在飞机观测方面,游来光等^[9]在吉林利用铝箔取样技术对吉林地区的降水性层状冷云中的冰晶雪晶进行了飞机观测。利用铝箔取样技术,沿飞行航线对云中降水质点连续取样,取样面积为 $4 \times 10 \text{ cm}^2$,暴露时间 $1 \sim 10 \text{ s}$ 。取样体积为 $0.28 \sim 2.8 \text{ m}^3$ 的689份铝箔样片。冰晶垂直分布特点:浓度自云顶向下增加,在云的中下部达到最大,是云层中冰晶浓度垂直分布的一个基本特征。高层云中也观测到在同一高度上冰晶浓度水平分布上有很大的差别。冰晶浓度水平向分布的不均匀和上部云层的发展状况有关。高层云云顶温度和其上部的卷云状况是影响云中冰晶形成的两个基本因子。雪晶浓度值各次飞行间差别也很大,垂直向平均浓度范围在 $7.0 \times 10^2 \sim 3.0 \times 10^3 \text{ m}^{-3}$ 。平均看来,在云的上层(一般在 $0 \text{ }^\circ\text{C}$ 层以上 2.5 km),雪晶的平均直径约为 $500 \text{ }\mu\text{m}$,至 $0 \text{ }^\circ\text{C}$ 层可达 $1500 \text{ }\mu\text{m}$,估计其增长率约为 $0.4 \text{ mm} \cdot \text{km}^{-1}$ 。金德镇等^[10-11]总结了吉林省积层混合云引晶试验中的催化层和催化响应层粒子谱特征、过冷水含量变化特征和雷达回波变化特征,分析了飞机播撒液态 CO_2 增雨作业前后云的宏、微观物理结构和降水变化。齐彦斌等^[12-13]利用人工增雨“Y-12E型”飞机,配备有GPS定位数传系统、机载宏观探测设备、King热线含水量仪和PMS云粒子测量系统,对2003年7月8日一次冷涡对流云雨带进行了垂直和水平探测,结合雷达、卫星、地面降水及天气图分析了冷涡的宏

观特征和微观物理结构。汪学林等^[14]对层状云中夹着的对流泡进行系统深入的研究,为人工增雨作业提供依据。刘健等^[15]利用机载云粒子探测系统(PMS)探测资料,对吉林省的一次切变线降水过程的云微物理结构、降水机制进行综合分析。杜鹃等^[16]筛选吉林省的最佳人工影响天气样本集,进行了历史降水天气日云场进行分析。张景红等^[17-18]利用空基微波辐射计获取的探测资料,结合PMS、热线含水量仪等探测资料,利用卫星、雷达、GPS等探测手段的同步观测结果,进行了综合分析,测得吉林省春季各种可实施人工增雨作业的云型的过冷水含量、云体各层微物理结构的变化。

本文选取2016年4月12日吉林省一次飞机增雨作业过程,总结作业方案设计的主要考虑因素,按照一定原则选取对比区,结合雷达资料分析作业影响区和对比区回波变化,根据区域站数据统计作业前后作业影响区和对比区降水变化,对作业效果进行分析。

1 天气形势及作业潜力条件分析

根据4月11日地面天气图分析,河套地区有一低压系统生成,随着系统发展,将逐渐东移北抬影响吉林省(图1a)。根据ECMWF模式预报,在500 hPa与该系统相对应的为一高空槽,12日08时吉林省中部地区处于槽前位置;根据850 hPa风场分析,吉林省中部处于切变前部的西南气流中,对应一个西南水汽输送带,水汽输送条件比较好,850 hPa相对湿度达到80%以上(图1b)。

根据MM5模式预报,4月12日上午,云系覆盖吉林省中部地区,自西南向东北移动,云中有一定量过冷水主要分布在 $0 \sim -20 \text{ }^\circ\text{C}$ 层(高度在 $1500 \sim 5500 \text{ m}$) (图2a)。云系从吉林省西南部开始进入白城、四平地区,自西南向东北逐渐发展。随着云系的发展,云层增厚,过冷水含量逐步增大,水汽输送条件较好。4月12日08~14时,吉林省中部地区有增雨作业潜力(图2b)。14时之后增雨作业潜力区东移,吉林省中部地区无增雨作业潜力。

根据4月12日07时长春雷达回波图(图3)可以看出,回波为西南-东北走向,雷达回波顶高在5 km以上;根据模式预报过冷层厚度在2900 m左右,事后根据长春探空数据,08时零度层高度约为700 m,实际过冷层厚度为4300 m。此次作业的对象为较大范围的层状云,具有较厚的过冷层,适宜飞机播撒催化作业。

2 作业方案设计及作业实施

作业方案设计主要考虑以下几方面因素:考虑到

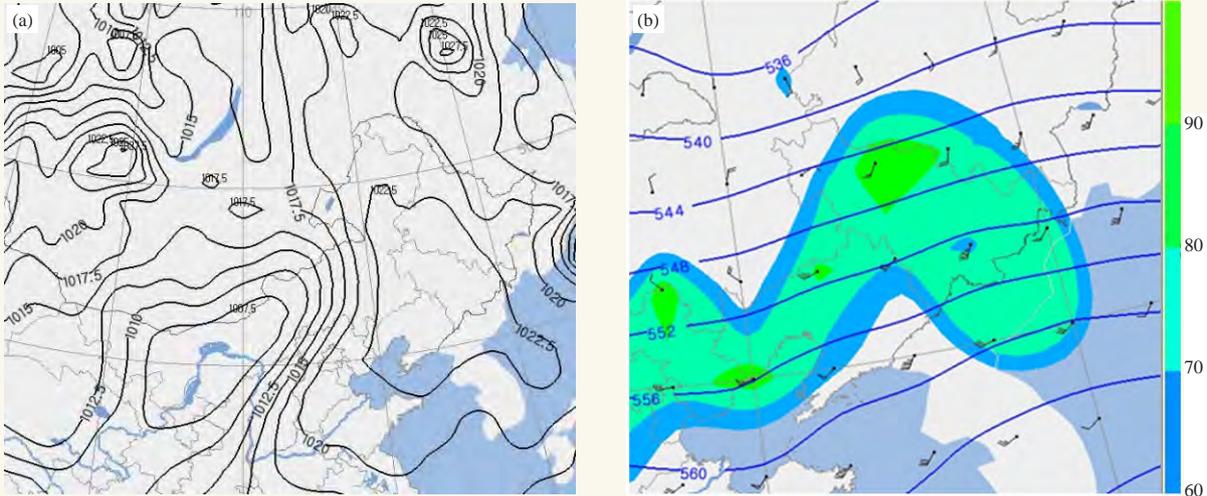


图1 (a) 2016年4月11日08时海平面气压场; (b) ECMWF模式预报2016年4月12日08时500 hPa高度、850 hPa风场、850 hPa相对湿度图
Fig. 1 (a) Surface pressure at 08 BT on April 12, 2016; (b) 500 hPa height, 850 hPa wind and 850 hPa relative humidity at 08 BT on April 12, 2016 predicted by ECMWF model

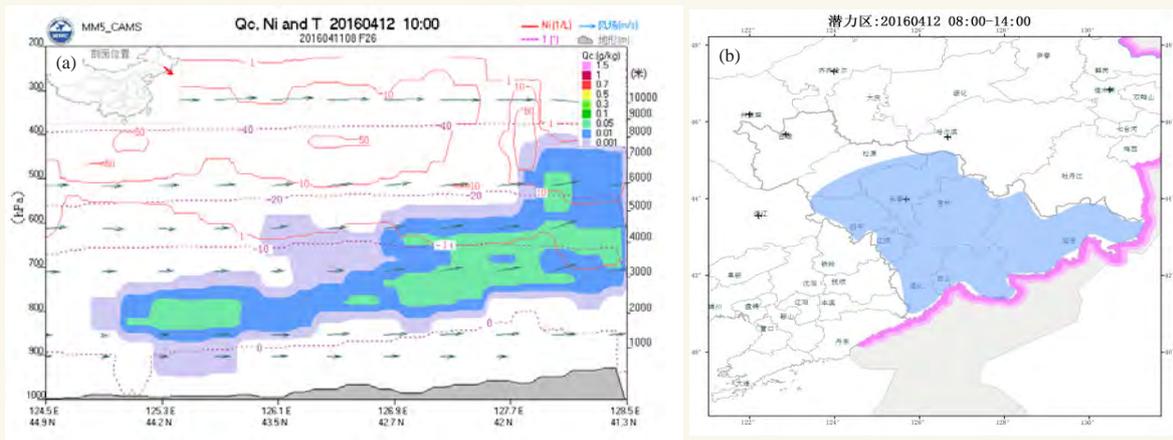


图2 (a) 2016年4月12日10时过冷水分布; (b) 2016年4月12日08~14时增雨潜力区预报图
Fig. 2 (a) Super cooled water at 10 BT on April 12, 2016; (b) Potential areas of rainfall enhancement from 08 to 10 BT on April 12, 2016

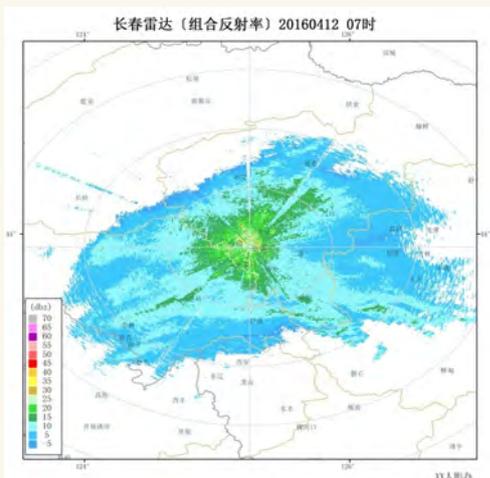


图3 2016年4月12日07时雷达回波图
Fig. 3 Radar reflectivity at 07 BT on April 12, 2016

需求情况,选择吉林省的需水地区;考虑到作业潜力及作业条件,选择增雨潜力及作业条件较好地区作为作业影响区;考虑到云系的移动方向为西南-东北向,作业影响区位置选择为云系进入吉林省的位置,随着云系移动,可将催化剂扩散到下游地区;考虑到作业高度风向为西南风,作业播撒航线要与作业高度层高空风垂直,保证催化剂扩散范围;考虑到播撒的充分性,要在作业影响区域内进行往复播撒,以实现充分播撒,尽量保证作业效果。

分析需水情况,吉林省的需水地区主要为中西部地区;根据前面分析,2016年4月12日08~14时作业潜力及作业条件较好地区为长春、四平及以东的辽源地区;云系进入吉林省的位置为四平、辽源地区,

在此区域播撒，催化剂可以随云系移动向省内的下游地区扩散；因此选取的适宜作业地区为吉林省中部的四平、辽源地区，设计了飞行航线（图4a）。4月12

日08时，飞机从长春机场起飞，在长春伊通以南，辽源、四平公主岭之间区域进行往复播撒，播撒完毕后飞回长春机场，作业结束时间10:50。

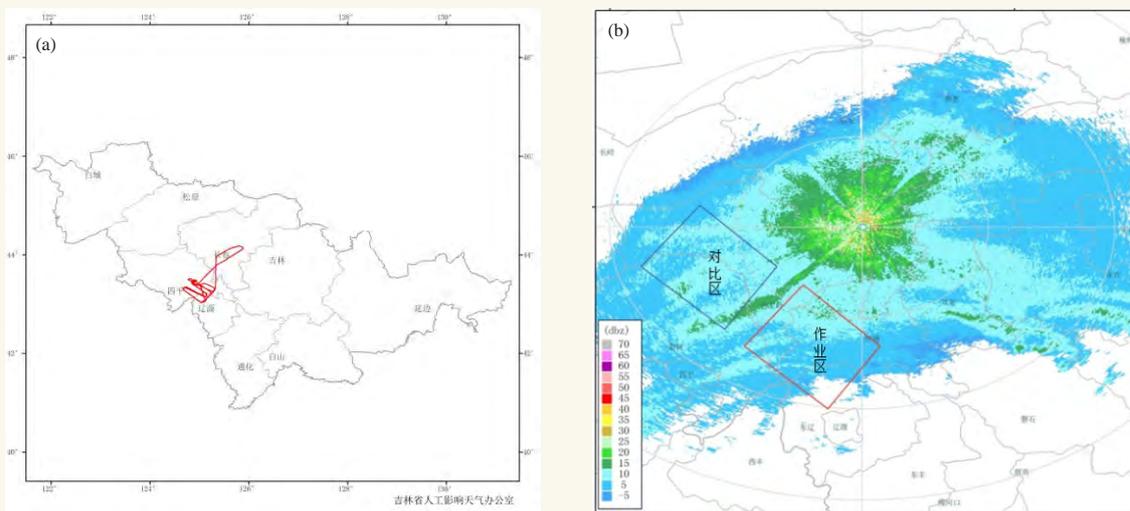


图4 (a) 2016年4月12日飞行航线图；(b) 作业影响区、对比区及2016年4月12日07时雷达回波图
Fig. 4 (a) Flight route on April 12, 2016; (b) The influence region, the control region, and radar reflectivity at 07 BT on April 12, 2016

3 作业效果分析

3.1 对比区选取

为了保证播撒作业不会对对比区产生影响，在作业影响区西北方选取相同面积的区域作为对比区。作业层高空风向为西南-东北方向，作业影响区与对比区的排列方向与风向垂直。作业影响区与对比区之间保留出20 km的区域作为隔离区域，可以保证催化不会影响到对比区。对作业前两区的雷达回波进行对比（图4b），作业前（07时）两区回波强度主要分布在10~25 dBz。作业影响区和对比区10~15 dBz强度回波面积均为1600 km²左右；作业影响区15~20 dBz强度回波面积约为2300 km²，对比区15~20 dBz强度回波面积约为2400 km²；作业影响区和对比区20~25 dBz强度回波面积均约为700 km²。可以看出作业前两区回波强度、面积基本相似，对比区与作业影响区云条件相似，对比区选取较为合理。

3.2 作业后回波变化分析

作业刚开始时（08时），作业影响区回波分布与作业前相比变化不大；对比区10~15 dBz回波面积较作业前减小到1100 km²，5~10 dBz回波面积较作业前增加到700 km²，总体看15 dBz以下回波面积较作业前变化不大；作业影响区和对比区15 dBz以上各强度回波分布类似，与作业前相差不大。

作业期间，对作业影响区雷达回波剖面进行分

析（图5）。在作业开始时（08:18），在飞机播撒位置，作业高度上，有一回波强度大值区，回波强度大值区并未及地。随着作业的持续进行（08:34、08:44），该回波强度大值区高度逐渐下降，且强度逐渐加强，说明云中粒子逐渐增多且向下降落。至09:16，该回波强度大值区及地，说明已经出现地面降水。09:00—09:40期间，相对于对比区，影响区垂直累积液态水明显消耗。但两区整体回波顶高已经明显下降，云系处于减弱阶段。

作业后，作业影响区和对比区回波差异明显（图6）。对比区回波作业后较作业前及作业开始时明显减弱，云中基本无强回波，只剩15 dBz以下弱回波；作业影响区回波明显强于对比区，较作业前及作业开始时有所增强，主要体现在20 dBz以上强度回波面积由900 km²增加到1800 km²。

3.3 作业前后雨量变化分析

通过作业前、作业期间、作业后1 h降水量站数对比（图7）发现，作业开始前（07时），作业影响区主要为5 mm以下降水，只有一个站出现了5 mm以上降水，对比区9个站出现了5 mm以上降水，远多于作业影响区；作业影响区平均降水量小于对比区。作业期间（09~10时），作业影响区降水有所增加，3个站出现了5 mm以上降水，对比区5 mm以上降水站数逐渐减少；作业影响区平均降水量较作业前增加，对

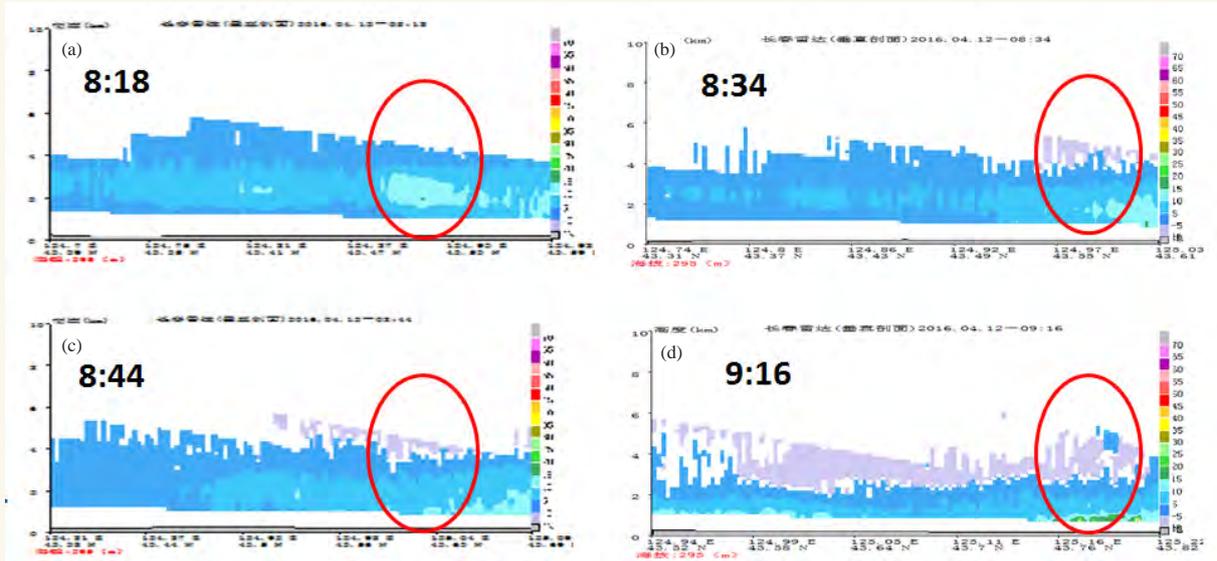


图5 作业期间不同时刻雷达剖面图

(a) 08:18; (b) 08:34; (c) 08:44; (d) 09:16

Fig. 5 Section of radar reflectivity at 08:18, 08:34, 08:44, and 09:16 BT during the seeding time

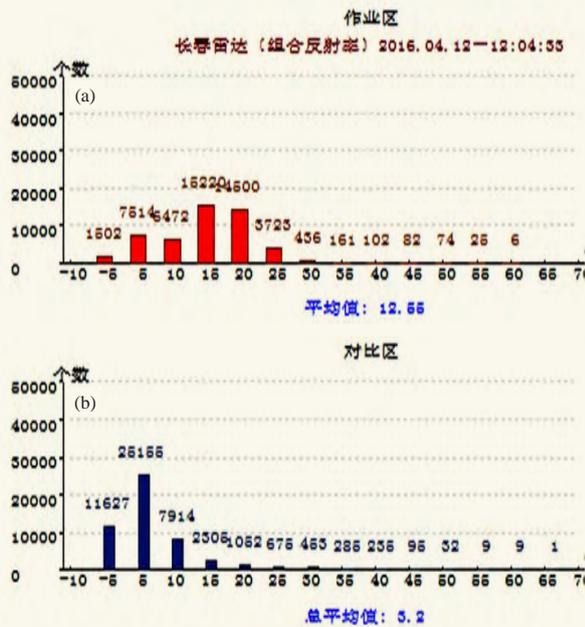


图6 作业后，影响区与对比区雷达回波强度分布图

Fig. 6 Distribution of radar reflectivity in the influence region and control region after seeding

对比区平均降水量呈减小趋势，低于作业影响区。播撒作业2 h后（12:00），两区雨量都处于减少趋势，作业影响区雨量一直高于对比区；作业结束后1 h，对比区降水趋于结束，作业影响区仍有降水维持。

4 结论

此次飞机增雨作业是在河套低压和高空槽影响下，作业影响区处于槽前的西南水汽输送带的天气背

景条件下开展的。考虑吉林省的需水地区主要为中西部地区，根据天气形势分析，吉林省中部处于切变前部的西南气流中，对应一个西南水汽输送带，水汽输送条件比较好。根据模式预报的云微物理结构分析，云系覆盖吉林省中部地区，自西南向东北移动，云中有一定量过冷水主要分布在0~-20℃层（高度为1500~5500 m），随着云系的发展，过冷水含量逐步增大，有较好的作业潜力。根据云系条件分析，此次作业过程为较大范围的层状云，具有较厚的过冷层，适宜飞机播撒催化作业。云系进入吉林省的位置为四平、辽源地区；因此选取的适宜作业地区为吉林省中部的四平、辽源地区。

垂直作业层的高空风向，在作业影响区西北方选取相同面积且回波发展类似区域作为对比区。两区之间保留出20 km的区域作为隔离区域，保证催化不会影响到对比区。

通过对作业影响区和对比区雷达回波对比，发现作业过程中作业影响区云中大粒子逐渐增多且向下降落，作业影响区垂直累积液态水明显消耗。作业后，两区回波均处于减弱阶段，但作业影响区回波明显强于对比区，回波维持时间更长。

作业开始前，作业影响区降水量小于对比区；作业过程中，影响区降水呈增加趋势，对比区雨量呈减少趋势；作业结束后，对比区降水趋于结束，作业影响区仍有降水维持。此次催化作业影响了云中微物理过程，消耗云中过冷水，使地面降水增加，同时，增

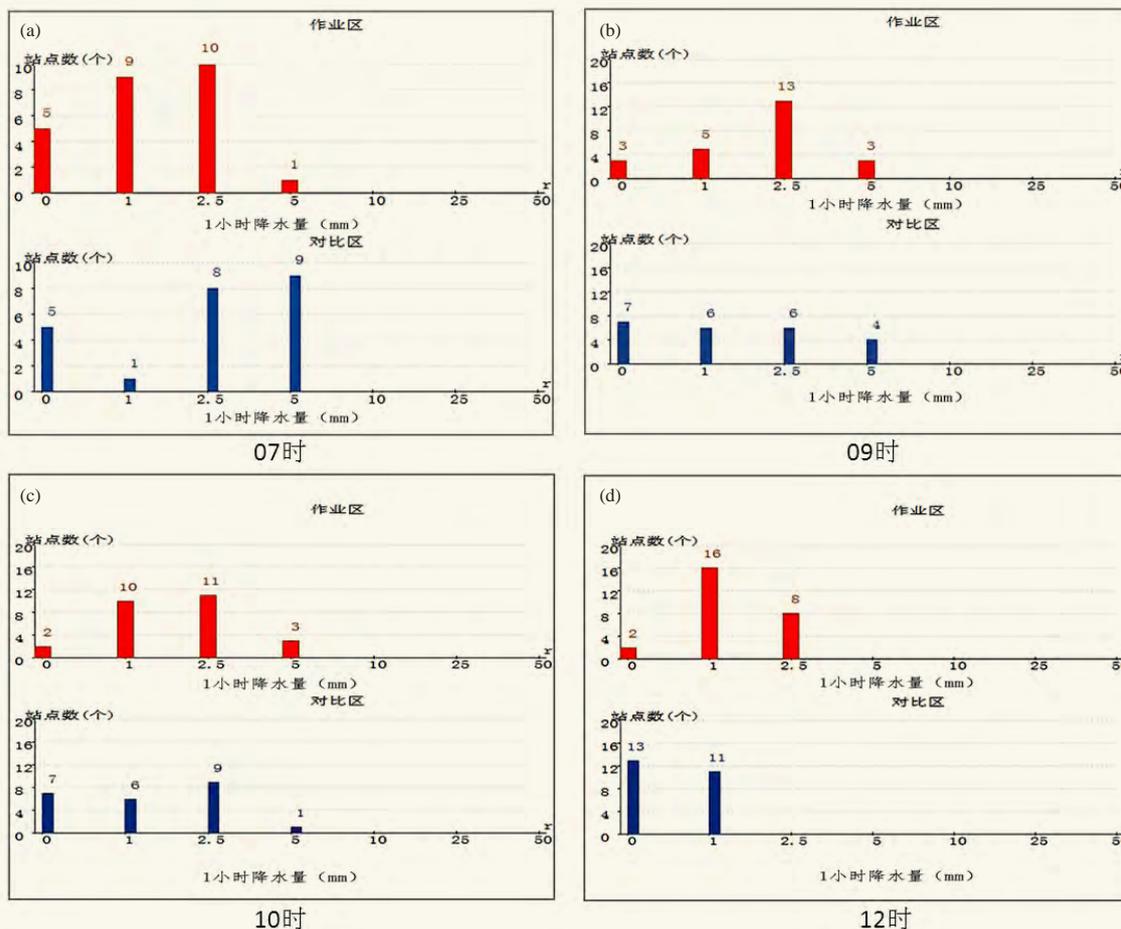


图7 影响区与对比区1 h降水量的站点数变化图

(a) 07时 (作业前) ; (b) 09时 (作业期间) ; (c) 10时 (作业期间) ; (d) 12时 (作业后)

Fig. 7 Numbers of stations with different amounts of one-hour rainfall in the influence region and control region before seeding (07BT), during seeding (09BT, 10BT), and after seeding (12BT)

加了降水的维持时间，起到了正效果。

参考文献

[1] 李念童, 李铁林, 郑宏伟. 河南省飞机人工增雨试验方案设计. 应用气象学报, 2001, 12(s1): 200-205.
 [2] 张永强. 苏北地区火箭人工增雨作业方案设计. 全国云降水物理和人工影响天气科学讨论会, 2000.
 [3] 刘海群. 火箭增雨作业方案设计的探讨. 中国气象学会年会, 2004.
 [4] 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. 灾害学, 2013, 28(1): 98-101.
 [5] 房彬, 肖辉, 王振会, 等. 聚类分析在人工增雨效果检验中的应用. 南京气象学院学报, 2005, 28(6): 739-745.
 [6] 曾光平, 吴章云. 人工降水. 福建科学技术出版社, 1996: 167-169.
 [7] 王以琳, 雷恒池. 冷云飞机人工引晶检验. 大气科学, 2003, 27(5): 929-938.
 [8] 汪学林, 陆煜钧, 李占柱, 等. 河套低压降水性层状云的云雨特征. 大气科学, 1982, 6(10): 432-441.
 [9] 游来光, 熊光莹, 高明忍, 等. 春季吉林地区层状冷云中冰雪晶的

形成和增长. 气象学报, 1965, 35: 423-438.
 [10] 金德镇. 人工增雨催化物理验证//中国气象学会2005年年会论文集. 中国气象学会, 2005: 12.
 [11] 金德镇, 雷恒池, 郑娇恒, 等. 液态CO₂进行层云催化效果的观测分析//中国气象学会2005年年会论文集. 中国气象学会, 2005: 12.
 [12] 齐彦斌, 郭学良, 金德镇. 一次东北冷涡中对流云带的宏微物理结构探测研究. 大气科学, 2007, 31(4): 621-634.
 [13] 齐彦斌. 东北冷涡积层混合云系统结构降水机制的观测和数值模拟研究. 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 2008.
 [14] 汪学林, 秦元明, 吴宪君, 等. 层状云中对流泡特征及其在降水场中的作用. 应用气象学报, 2001(S1): 146-150.
 [15] 刘健, 齐彦斌, 蒋彤, 等. 切变线降水系统微物理特征及降水机制个例分析. 气象科技, 2008, 36(4): 396-399.
 [16] 杜娟, 高凤岐, 王超颖, 等. 吉林省西部明显降水天气云场及有利飞机作业天气统计分析. 吉林气象, 2005(3): 25-28.
 [17] 张景红, 谷淑芳, 郑娇恒. 2004年空基微波辐射计在吉林省探测分析. 吉林气象, 2005(3): 16-18.
 [18] 张景红, 郑娇恒, 谷淑芳. 一次典型积层混合云降水的综合探测分析. 吉林气象, 2004(3): 6-8, 36.