孙玉稳，孙霞，刘伟，等. 2015. 一次雨夹雪降水过程人工增水作业的综合观测研究. 气象，41(11)：1341-1355.

一次雨夹雪降水过程人工增水作业的综合观测研究*

孙玉稳[1] 孙 霞[2] 刘 伟[3] 李宝东[1]
蒋元华[4] 韩 洋[1] 胡向峰[1] 刘立辉[5]

1 河北省人工影响天气办公室/河北省气象与生态环境重点实验室，石家庄 050021
2 河北省气象灾害防御中心，石家庄 050021
3 河北省石家庄市气象局，石家庄 050050
4 南京信息工程大学，南京 210044
5 河北省邢台市气象局，邢台 054000

提 要：2013 年 4 月 19 日，河北省人工影响天气办公室在河北中南部地区对回流和西风槽复合天气系统云系进行人工增水作业，催化和探测部位在槽前上升气流云层和回流云层中，这次降水特点：(1) 降水系统呈“槽前云”和“回流云”两层结构，大粒子主要在上层槽前云中增长；(2) “槽前云”温度和云顶温度较高，“回流云”温度低，固态降水粒子在“回流云”粘连增长加大地面降雪；(3) 大云粒子和降水粒子很多；(4) 小云粒子丰富，全谱拟合曲线 $\lg N = a\lg D + b$ 的截距 $b > 2$，适合催化作业。在分析云微物理特征的基础上，结合实时天气、卫星、雷达、探空和雨量资料，从多角度分析了层状云增水作业实用技术和催化的宏微观响应，结果表明：作业后影响区雷达反射因子、卫星反演参量和云内微物理特征量都有明显变化；催化影响区地面降水的变异通过了显著性分析，但作业前后影响区内外这一差异是否是催化效果需要进一步验证。

关键词：层状云降水，云粒子，飞机探测，雨滴谱，雷达回波

中图分类号：P481 **文献标志码**：A **doi**：10.7519/j.issn.1000-0526.2015.11.004

Study of Integrated Observation on Aircraft Artificial Operation During a Sleet Event

SUN Yuwen[1] SUN Xia[2] LIU Wei[3] LI Baodong[1] JIANG Yuanhua[4]
HAN Yang[1] HU Xiangfeng[1] LIU Lihui[5]

1 Weather Modification Office of Hebei Province, Key Laboratory of Meteorological and Ecological Environment of Hebei Province, Shijiazhuang 050021
2 Hebei Meteorology Disaster Prevention Centre, Shijiazhuang 050021
3 Shijiazhuang Meteorological Bureau, Shijiazhuang 050050
4 Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044
5 Xingtai Meteorological Office of Hebei Province, Xingtai 054000

Abstract: Artificial cloud seeding was carried out by Weather Modification Office of Hebei Province on clouds in a reflux and westerly synoptic system over central and southern region of Hebei on 19 April 2013. The cloud seeding and detection site was located in the updraft airflow in front of the trough and in the reflux. The characteristics of the precipitation are: (1) the precipitation structure is characterized by

* 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201206003、GYHY201206025)、河北省科技计划项目(12237126D-1)和河北省气象局科研项目(15ky20)共同资助。
2014 年 3 月 11 日收稿； 2015 年 9 月 14 日收修定稿
第一作者：孙玉稳，主要从事大气气溶胶与云降水相互作用及人工影响天气研究. Email：syw2141@sina.com

pre-trough cloud and reflux cloud, where large particles grew mainly in the upper front of trough; (2) both the temperatures of pre-trough cloud and the according cloud top were higher while the reflux cloud was colder, causing the solid precipitation particles to block together and resulting in the enhancement of surface snow; (3) the number concentration of big cloud particles and precipitation cloud particles was high. Moreover, there were abundant small cloud particles. The value of the intercept of the full spectrum fitting curve exceeded 2 ($b>2$), suggesting it is suitable for seeding operation. In addition, application of airborne measured microphysical parameters, satellite, radar and air-sounding data in refined operations were analyzed. The results suggest that variations in micro-structure, satellite and radar parameters within cloud are significant after the operation work. The regional variation of surface precipitation has passed the analysis on significance, but whether the difference before and after the affected area is the catalytic effect needs further verification.

Key words: stratiform cloud precipitation, cloud particles, aircraft detection, raindrop spectrum, radar echo

引 言

中国北方适宜增雨的主要天气系统是弱不稳定条件下的层状云系,国内外对层状云系的降水特征及人工催化物理响应进行了大量研究。

国外从 20 世纪 70 年代开始观测层状性降水云系的结构特征,并研究人工催化的物理响应。Hobbs 在 Cascade 冬季云降水和人工影响试验中,发现催化后降雪粒子从霰粒子变为雪团或雪晶,认为有改变降水落区的效应(Houze et al, 1979);Hobbs 等对美国温带气旋云系和地形云进行了探测试验,提出 FSSP 探头观测到云中大于 2 μm 的粒子总浓度超过 10 cm^{-3} 时判断为入云(Rangno et al, 2005)。在 20 世纪 80 年代的里罗拉多冬季地形云影响计划 COSE(1979—1985 年)中发现人工催化会在目标云中产生高浓度冰核,并建立了降水物理和人工影响的概念模型。Fleishauer 等(2002)在美国中部和北部大草原进行了 6 个中层云系的飞机测量,发现云厚:400～1500 m,云中液态含水量:0.005～0.35 g·m^{-3},云中温度:0～−31℃。在中层云系中,冰浓度和冰水含量(IWC)都不与温度相关,最高的 IWC 数值被发现在−8～−20℃;Gamache 等(1982)认为当降水云系的雷达反射率因子大于 38 dBz 时为对流云降水。

国内从 1958 年开展人工影响天气的研究。游来光等(2002)发现适合增雨的层状云中存在“播种云和供水云”即中云和低云的配置,且两者间常有干层。陶树旺等(2001)提出,FSSP-100 探测的粒子浓度不小于 20 cm^{-3} 的云区才才具有一定的可播性。其中 2D-C 探测的大粒子浓度小于 20 L^{-1} 时,可确定为强可播区,否则为可播区。胡志晋等(1983)结合数值模拟研究探讨了层状云降水的机理和人工增雨的可能性。孙霞等(2012)分析了层积云中微物理量的垂直分布特征。汪玲等(2015)等利用新一代天气雷达作业前后回波的变化分析人工增雨效果。石爱丽等(2013)、高茜等(2011)、王永生等(1985)和魏东等(2011)研究发现云系中含有比较丰富的过冷水,冰晶粒子浓度不是很多时,这种水成物的配置存在引晶催化的增雨潜力。周毓荃等(2014)研究了不同催化方式催化剂扩散规律和有效范围,实现目标区充分催化的作业设计等问题。

目前,层状云飞机增雨作为一项业务在我国北方地区逐步开展起来,如何整合地面雨滴谱、探空、飞机穿云直接探测、雷达、卫星和地基微波辐射计遥感等探测资料综合研究层状云催化相应机制,使增雨作业更科学、更经济和业务上更具可操作性成为当前人影工作的重要课题。本文遵循行业专项总体思路,对层状云进行多手段探测,在此基础上研究层状云催化物理响应问题,为人工增雨业务提供参考。

1 资料和飞行概况

本次试验主要观测设备和仪器有:夏延Ⅲ A3625 增雨飞机及机载 PMS 探测仪、温度仪、GPS 定位仪、多普勒雷达、探空和雨量观测仪器等,并获取相关资料。

作业飞机 09:42 从正定机场起飞,平飞到石家

庄后,在石家庄到高邑之间做分层催化作业(1072、1374、1989、2598、3177、3915、4531、5117、5723、6337和 6926 m),作业时间为 10:05—12:05,作业后,在元氏附近做垂直穿云探测,12:28 返回机场,作业燃放 18 根碘化银烟条,该烟条碘化银成核率 1.03×10^{15} 个·g^{-1}(温度 −10℃)。表 1 给出了探测时间、高度、区域、飞行状态、机上宏观记录等资料。

表 1　飞行概况

Table 1　Flight survey

探测时间	探测高度及飞行状态	探测区域	机上宏观记录
09:51:04—12:27:30	600～7000 m 起飞到降落	正定—石家庄—赞皇—高邑—石家庄—元氏—栾城—正定	作业
09:55:02—10:06:43	a:1072 m 水平飞行	石家庄—赞皇—高邑	低云高云之间
10:09:12—10:13:27	b:1374 m 水平飞行	高邑—石家庄	
10:15:26—10:22:00	c:1989 m 水平飞行	石家庄—高邑	云体发黑
10:25:26—10:30:06	d:2598 m 水平飞行	高邑—元氏—栾城—石家庄	云底发亮
10:34:13—10:37:45	e:3177 m 水平飞行	石家庄—元氏—高邑	发亮
10:45:00—10:51:16	f:3915 m 水平飞行	高邑—石家庄	2DC 出问题
10:54:53—11:01:08	g:4531 m 水平飞行	石家庄—元氏—高邑	
11:05:24—11:11:24	h:5117 m 水平飞行	高邑—元氏—石家庄	阳光透过,2DP 有雪花
11:16:13—11:21:03	i:5723 m 水平飞行	石家庄—元氏—高邑	
11:24:58—11:31:14	j:6337 m 水平飞行	高邑—石家庄	
11:36:37—11:45:12	k:6926 m 水平飞行	石家庄—高邑—元氏	可见阳光
11:45:03—12:05:14	6924～615 m 垂直盘旋下降	元氏	3867 m 时 2DP 出问题,2890 m 恢复正常
12:07:10—12:19:52	1084 m 平行飞行	元氏—正定	

2　天气形势、云系演变、雷达特征、探空及飞机探测分析

2.1　地面降水的时间分布

安装在河北省气象大厦 16 楼平台的雨滴谱仪采用平行光束和光电管阵列组合,测量穿越采样空间的粒子大小和个数。本次降水为雨夹雪天气过程,08 时前后主要降雨,10 时以后云底高度仅 250 m,0℃温度线在云底附近,石家庄市飘起雪花,对雪花粒子大小的测量可能有些偏差。雨滴谱仪观测的分钟雨量显示:09 时以前出现 2 个峰值,09 时左右地面停止降水,10 时以后出现 4 个降水峰值。雨滴谱显示,雨强最大时,出现密集小雨滴,直径在 1～2 mm,同时也有 5～10 mm 雪花。08 时雨强最大,对应的卫星云图反演的有效粒子半径最大,播撒后 11 时左右降水出现了极值,对应的云水路径和光学厚度出现了极大值,有效粒子半径和云顶高度、温度分别出现了极值,14 时前后再次出现了降水和卫星反演因子的极值对应关系。雨滴谱显示雨强与强雷达回波有较好的对应关系,雷达回波强度在 15 dBz 以下时无降雨,11 时强降水对应 35 dBz 的强雷达回波;13 时以后,降水强度逐步减小,回波强度不超过 30 dBz。

2.2　天气系统

图 1 显示,500 hPa中高纬度环流形式为两槽一脊,高压脊位于贝加尔湖西侧;中低纬度为西风槽,位于陕甘及以南地区,并且温度场落后于高度场,西风槽将加强发展。此时 500 hPa 河北省以偏西风为主,河北中南部有弱脊控制。700 hPa(图略)位于黄河中游及南部一带西风槽前的西南气流控制河北地区,并且有低空急流(风速＞12 m·s^{-1})配合,在河北的中南部风速迅速减小,有显著的风速辐合,此外河北处呈东西走向的等温线较为密集,温度梯度较大,西南气流将暖湿空气不断地向河北输送并聚集。850 hPa 河北区域为东北回流形势,处于冷高压控制,并且有冷舌配合;在河北中南部有偏东风急流,结合河北西部太行山地形作用,低层有明显的爬坡上升运动。地面图(图略)同样表现为东北回流气压形势场,冷高压控制河北地区,并且不断有冷空气南下补充,由于我国西南地区有强大的低压存在使得冷高压一直在河北一带维持,河北中南部以

偏东风为主。

综上所述，此次降水天气系统是以地面冷高压和低层 850 hPa 偏东风作为冷垫，中高层西南暖湿气流沿着冷垫爬升形成的河北中南部层状云降水天气系统。

2.3 卫星云图及反演产品

卫星云图(图 2)显示，山西、陕西一带有多个卫星亮区呈西南—东北向排列。08:03 河北中南部受中低云系影响，其中石家庄、衡水出现块状亮区，地面伴有较强降水；09:03 前后块状亮区消失，10:03 多片亮块开始移向作业区，10:05—12:05 作业期间，作业影响区和对比区均出现卫星亮区，说明层状云分多个云块，且疏密不均。13:03—16:03 云图变亮，云顶抬高。作业期间 3000 m 以下以东风为主，3000 m 以上基本吹偏西风，云块组成的云系向东移动，飞机实测移动速度约 80 km·h^{-1}；07:03 石家庄开始降雨，随后出现雨夹雪；09:30 左右第一块云团过境后，出现近一小时降水间隙；10:03 后第二块云团开始影响石家庄等地，由于第一块云团过后，近地面明显降温，石家庄大雪纷飞；12:15 第二块云团过后，又出现半小时降水间隙；13:45—14:20 受第三块云团影响再次产生降水；主要云团过境后，受几个小云团影响，当地又多次降小雪，直到19:30，降水系统完全过境，降水结束。

卫星反演光学厚度显示，08:03—10:03 河北南部出现片状云区，呈东西向排列，光学厚度为 14～36，石家庄西部出现大片云块，光学厚度普遍达 36。10:03—12:03 作业区云块光学厚度维持在 32～36；南部对比区 10:03 光学厚度为 14～32，11:03—13:03为 32～36；北部对比区 10:03 光学厚度为 12～20，11:03—13:03 为 20～36；13:03—14:03 河北南部地区光学厚度普遍 32～36，15:03 以后光学厚度开始下降，至 16:03 光学厚度已降到 14～24。同时，10:03—14:03 邢台探空站光学厚度始终处于 32～36 高值区中。

卫星反演液水路径显示，08:03 液水路径大值区呈碎块状东西向排列，作业区位于大值区中央，最大值为 1100 mm；邢台探空站处于液水路径大值区南部，其值为 200 mm 左右。10:03—12:03 作业区的液水路径维持在 600～1100 mm，两侧对比区液水路径在 200～900 mm。09:03 之前有效粒子半径高值区呈东西向排列，10:03—12:03 有效粒子半径的平面分布特征类似于同时间雷达回波的平面分布特征(图 3)，作业期间粒子有效半径在 25～35 μm 之间；飞机作业结束后(12:05)，整个影响区粒子有效半径基本维持在 30 μm 左右(图略)。

2.4 雷达资料分析

图 3 显示，10:36—12:00 回波带中心为东西走向，降水云呈尖头大尾的燕状形向东移动，这与卫星云图存在明显差异，可能由于中低空风向与高空风向不一致造成的。石家庄到高邑催化线处于降水云东移路径的中心，栾城到衡水一线位于催化影响中心，影响区出现强雷达回波带，最强雷达回波达 35 dBz。影响区两侧对比区，雷达回波明显弱，北部对比区雷达回波为 15～25 dBz，南部对比区(如邢台站)直到 11:24 才出现 20 dBz 雷达回波，说明南部受系统影响较晚。13:00—15:18 影响区雷达回波减弱，南部对比区出现多片 30 dBz 强雷达回波，而影响区和北部对比区雷达回波不超过 25 dBz。邢台处于系统中心南部边缘，受系统影响较晚，探空观测的生消时间比作业区出现 2～3 h 的时滞。结合图 2 和雨滴谱资料发现，黄色亮带云团与大于 20 dBz 雷达回波及地面降雨有较好的配合关系。

2.5 探空资料分析

本次过程的探空资料由邢台探空站观测，探空站距飞机作业区 100 km。探空资料显示(图 4)，08:00—11:00 在 2500～6500 m 出现约 4000 m 厚的云层，层状云开始形成。14:00 在 250～1500 m 出现低云，中云和低云之间有 600 m 厚的夹层；云顶高度抬升，7800 m 附近出现高云，这一阶段称为发展期；17:00 三层云连为一体，至 20:00 最大云顶高度达 13800 m，形成厚度为 13500 m 深厚云体，称为成熟期；22:00 云内出现三个明显干层，云层断裂为四层，层状云开始消散，称为消散期。北方冷云在发展期往往含有丰富的过冷水，这一时间通常被认为是有利于催化的时间窗口。雷达监测显示邢台 11:18 出现雷达回波，12:00 回波强度最大达到 35 dBz，20:18 回波逐渐消失。雷达观测的云的生成、发展和消退与探空观测结果一致。12:00 回波强度最强，之后减弱说明降雨主要发生在发展期，且不断降水限制了雷达回波强度的增加，成熟后层云高度明显抬升，高云能够提供足量的自然冰核，是否适宜催化有待进一步研究。

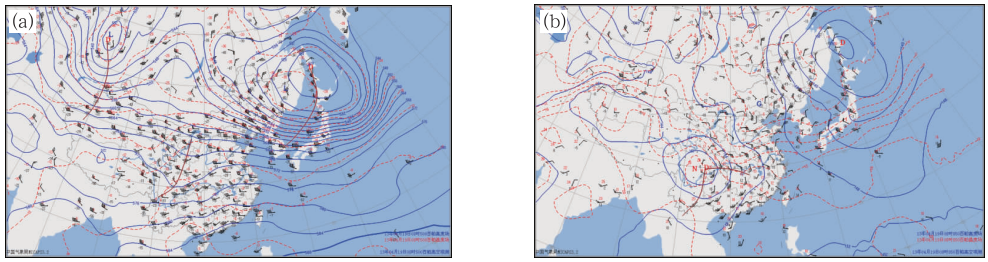


图 1　2013 年 4 月 19 日 08:00 天气形势

(a) 500 hPa, (b) 850 hPa

Fig. 1　Synoptic patterns at 08:00 BT 19 April 2013

(a) 500 hPa, (b) 850 hPa

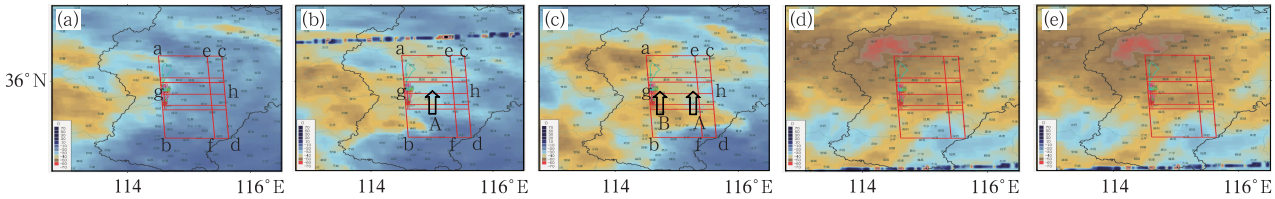


图 2　2013 年 4 月 19 日 10:03—16:03 红外卫星云图

(a) 10:03, (b) 11:03, (c) 12:03, (d) 13:03, (e) 16:03

Fig. 2　Infrared satellite cloud image from 10:03 to 16:03 BT 19 April 2013

(a) 10:03, (b) 11:03, (c) 12:03, (d) 13:03, (e) 16:03

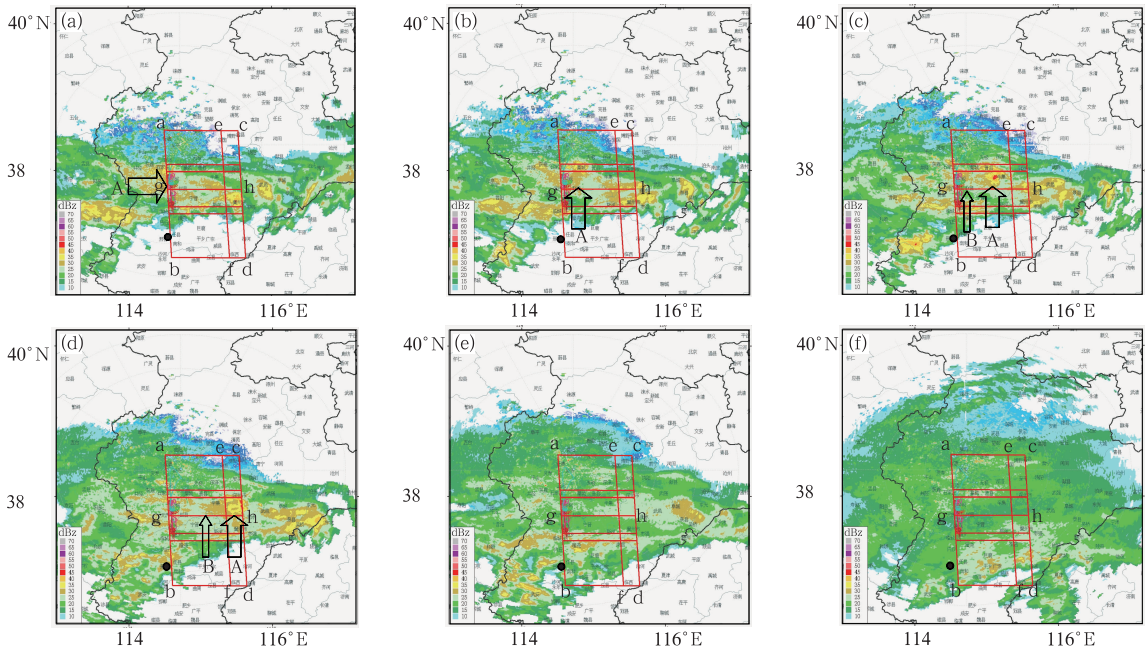


图 3　2013 年 4 月 19 日 10:24—15:18 的雷达回波

(色标为组合反射率,单位:dBz;曲线为作业轨迹,黑点处是邢台)

(a) 10:24, (b) 11:00, (c) 11:24, (d) 12:00, (e) 13:00, (f) 15:18

Fig. 3　Radar PPI elevation angle from 10:24 to 15:18 BT 19 April 2013

(Color bar denotes composite reflectivity, unit: dBz; curve denotes the seeding path, black dot denotes Xingtai site)

(a) 10:24, (b) 11:00, (c) 11:24, (d) 12:00, (e) 13:00, (f) 15:18

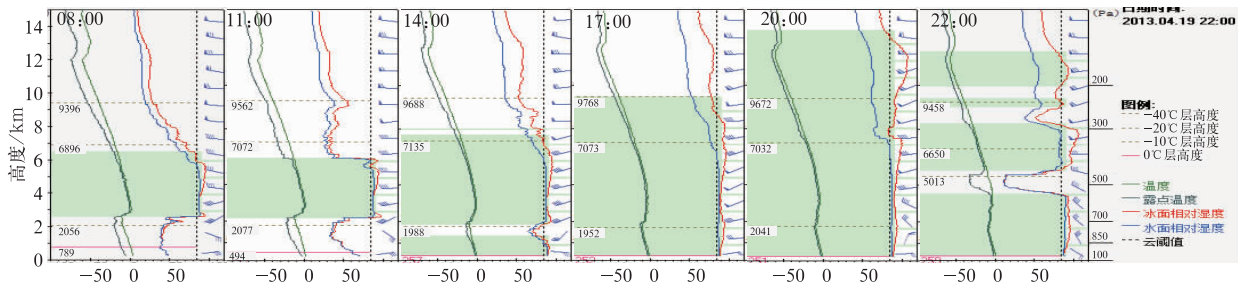


图 4 2013 年 4 月 19 日 08—22 时探空观测资料

Fig. 4 Radiosonde data from 08:00 to 22:00 BT 19 April 2013

08:00—11:00,云底有明显逆温,云顶有风速切变。14:00 以后,云底下压,最低降到 250 m,0℃层高度下移,整个云层始终处于 0℃层高度以上,属典型冷云降水。风廓线显示,地面始终吹东风;850～700 hPa 有明显风向切变,08:00 700 hPa 以上为西风或偏西风;850 hPa 以下为东风或偏东风;该层风随时间逐步转向,至 17:00 变为西风,22:00 850～500 hPa 转为西北风。

水面相对湿度大于 84%作为判断云层的阈值指标,即图中用绿色表示的部分。由于层状云中气流的垂直运动速度通常较小(一般十几 cm·s^{-1}),在层状云发展的初期,云层的垂直发展主要是通过水汽凝结而形成的,降雨会压低云底高度,上升气流也会抬高云顶。因此,将云层中露点温度线和温度线基本重合的部分当做凝结区。08:00—11:00,2000～5500 m 温度垂直廓线与露点温度廓线贴近或重合,云内水汽达到饱和,该云层为凝结区;14:00—20:00,温度廓线和露点温度廓线重合部分增加,云内凝结区从 2800～4000 m 逐步扩展到 250～7000 m 左右(除 14:00 在 2000 m 附近干层外);22:00 仅 3800 m 以下出现凝结区。凝结区存在过冷水(飞机宏观记录显示对应高度有结冰),空气相对湿度接近饱和,冰面相对湿度随温度降低而升高。4000 m 以下温度较高,为－3.5～－2℃,云内存在丰富过冷水,冰面相对湿度廓线和水面相对湿度廓线贴近;4000 m 以上温度迅速降到－8.0～－3.5℃,冰面相对湿度廓线大于并偏离水面相对湿度廓线,该层飞机实测有大量水滴和凇附。云的发展阶段,3000～5500 m 云层水汽和过冷水丰富,适宜催化。20:00 层状云处于发展盛期,22:00 开始消散,云内过冷水含量减少;7200～13800 m 云层冰面相对湿度提高,但水面相对湿度已急剧下降到 60%～80%,此高度基本为冰晶构成的卷云,不适合人工催化。

探空资料与雷达、地面降雨观测资料相比时间滞后,主要由于探空观测点在邢台站,探测点位于作业区南部 60 km,该地受天气系统影响较晚。

2.6 播云条件与云的微物理特征分析

2.6.1 云可播条件微物理分析

陶树旺等(2001)提出可播云区云物理判别条件是:小云粒子浓度不小于 20 cm^{-3},当大云粒子浓度小于 20 L^{-1}时,为强可播云区,否则为可播云区。利用该判别方法确定云区的可播性,起飞到降落整个飞行过程中,不满足可播条件的用黑色实心圆点表示,满足可播条件的可播区用空心圆表示,满足强可播条件的用空心三角形表示,可以看出,飞机从开始播撒催化剂到结束作业,可播区占有很大比例(图 5a)。飞机起飞就碰到云层,整个上升段有三个小云粒子高浓度区,分别在 150、1000 m 左右、3000～5800 m。云顶高度在 6000 m,云层厚度约 5000 m,小云粒子(FSSP)最大浓度 700 cm^{-3},但云层疏密分布不均,水平波动在 1～2 个量级。在 1072～1374 m 和 3177～5723 m 小云粒子浓度大于 20 cm^{-3}的区域比较多,适合催化作业,其中,3915～5723 m 高度层强可播区域比较多,其他浓度大于 20 cm^{-3}的云层处于可播区。云内小云粒子有效直径 10～20 μm,可播区或强可播区内对应的小云粒子较大,云外 FSSP 粒子有效直径小于 10 μm。

在航迹上的雷达剖面上(图 6),11:00 以前为一块云,11:15 以后为另一云块,11:00—11:15 在前、后云块之间飞行。10:00—10:30 雷达回波最强,1800～7500 m 出现 30 dBz 回波带,其中 35 dBz 强回波中心出现在 3000～5000 m,该处对应图 5 中强可播区。后一云块明显弱于前一云块,30～35 dBz 的强回波中心范围明显减少,且出现30 dBz的回波

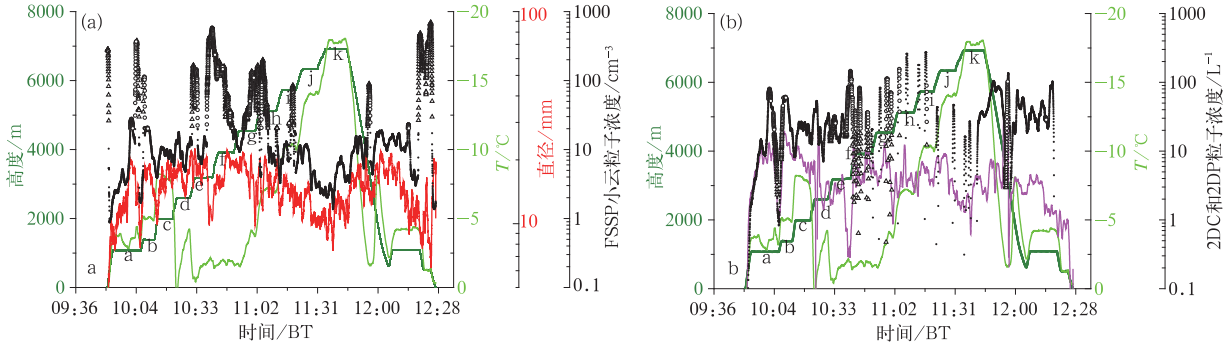


图 5　飞行轨迹、温度、粒子浓度及粒子有效直径随时间的变化

（空心圆为可播区粒子浓度，空心三角形为强可播区粒子浓度，实心圆为不可播区粒子浓度）

Fig. 5　Flight trajectory and time variation of temperature, particle concentration and effective diameter

(Hollow circles, hollow triangles and solide circles represent the concentration of cloud particles in the seedable area, the most appropriate seedable area and the non-seedable area, respectively)

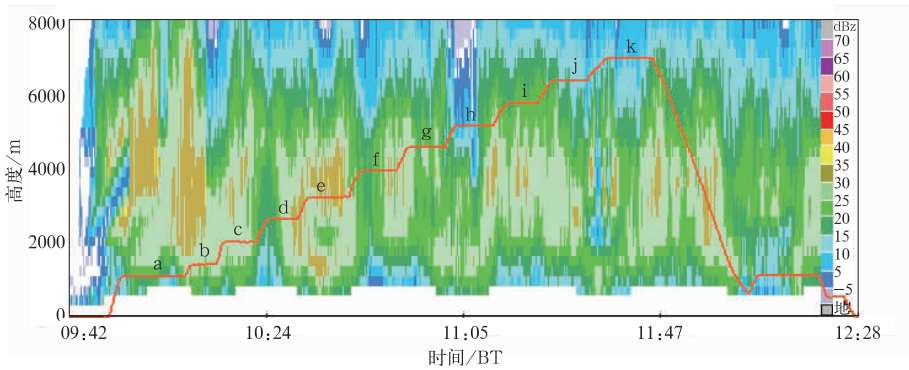


图 6　播撒航迹上的雷达剖面及其演变

（a、c、e、g、i 表示从石家庄水平飞向高邑，k 表示从石家庄水平飞到高邑再飞元氏，b、d、f、h、j 表示从高邑水平飞向石家庄）

Fig. 6　Evolution of section area in the seeding path

(a, c, e, g and i denote the horizontal path from Shijiazhuang to Gaoyi; k indicates the horizontal path from Shijiazhuang to Gaoyi, and then to Yuanshi; b, d, f, h and j depict the horizontal path from Gaoyi to Shijiazhuang)

垂直尺度仅 2000 m 左右，水平尺度小，穿过高浓度区时间短，测得的垂直可播区小，与机载观测结果吻合。

云内大云粒子（2DC）浓度在 0～200 L^{-1}，3915～5723 m之间出现 2DC 浓度低值，最小 2DC 浓度在20 L^{-1} 以下（图 5b）。云内降水粒子（2DP）浓度在 1～30 L^{-1}，3180 m 附近出现 2DP 浓度小于 1 L^{-1}低值，1071～1379 m 出现浓度超过 10 L^{-1}的高值，可能与上层降水粒子沉降有关。

2.6.2　云的微物理垂直分布特征

为了解云系的垂直结构，飞机于 11:45 在元氏附近从 6924 m 高度开始垂直盘旋下降，12:05 下降到 615 m 高度（图 7）。850 和 700 hPa 有风向切变，且出现强逆温，低云和中云有明显干层；飞行观测的宏观记录显示：5280 m 观测有小水滴和雪花，温度－17～－10℃，飞机中等颠簸，时有阳光透入，5766 m 为中云云顶，3036 m 为中云云底，云厚 2730 m；在飞机下降途中能观测到水滴、霰、冰晶、雪花等粒子，中云粒子浓度随高度分布不均，小云粒子浓度随高度分布时大时小。低云云层在 647～2307 m，厚度 1560 m。云内仅 3050～3500 m 可播，适播区明显少于分层探测观测结果，造成两者差异的原因可能：一是垂直探测时间在 11:45—12:05，此时接近降雨间隙；二是因航行空域受限制，没在预设区域飞行，垂直探测区云层较为稀疏；三是垂直探测时飞机斜穿过云块，高浓度区水平尺度较小影响到探测的垂直可播区尺度，从而影响数据的代表性；四是该处垂直观测资料使用的是飞机盘旋下降资料，采集数据小于正常值，影响数据的代表性。

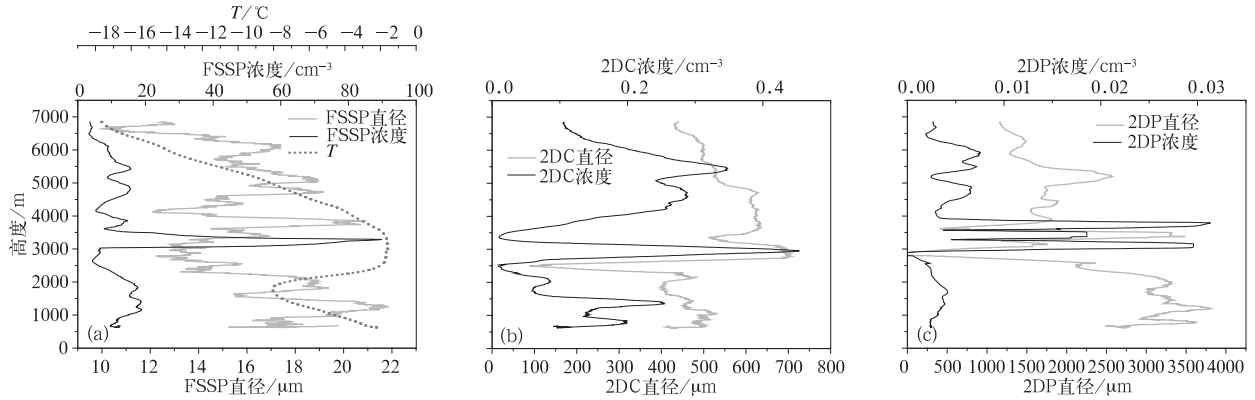


图 7 微物理量垂直要素变化

(a)小云粒子浓度、含水量、有效粒子直径,(b)大云粒子浓度含水量、温度随高度变化,(c)降水粒子浓度含水量、温度随高度变化

Fig. 7 Vertical distribution of micro-physical parameters

(a) concentration, water content and effective radius of small cloud particles, (b) the vertical variation of concentration and water content of big cloud particles and temperature, (c) the variation of concentration and water content of precipitation cloud particles and temperature

图 7a 小云粒子浓度随高度的分布显示，飞机下降阶段小云粒子浓度呈多峰和单峰分布，分别在低云 1190、1444 和 1875 m 处及中云 3288、3867、4880 和 5477 m 处出现小云粒子浓度大值区，极值粒子浓度分别达到 18.5、18.4、17.4 及 89.7、14.4、15.3 和 15.4 cm^{-3}。小云粒子数浓度最大值出现在中云，粒子浓度的量级一致，干层内粒子浓度均在 4～9 cm^{-3}。小云粒子计算含水量垂直分布与浓度随高度的分布一致，分别在低云 1218 和 1850 m 处及中云 3288、3844、4740 和 5428 m 处出现含水量极值，最大含水量分别达到 0.011、0.008 及 0.037、0.0095、0.0061 和 0.005 $g \cdot m^{-3}$。小云粒子有效直径随高度的变化与浓度变化不一致，最大浓度所在高度处有效直径较小，可能受粒子凝华增长时相互争食水汽影响。小云粒子有效直径呈多峰和单峰分布，分别在低云 1260、1820 和 2062 m 处及中云 3407、3844、4735、5054 和 5577 m 处出现小云粒子有效直径大值区，最大粒子有效直径分别达到21.9、19.4、18.7 μm 及 16.8、20.9、19.2、19.0 和 16.5 μm，比较而言，低云小云粒子有效直径高于中云，云内粒子有效直径一般在 12～21.9 μm，其中低云平均为 18.3 μm，中云平均为 16.3 μm，云夹层内粒子有效直径较小，均在 15.7 μm 以下。

平均直径表示小云粒子的大致尺度，平均平方根直径表示小云粒子的平均截面，平均立方根直径表征小云粒子的平均体积，有效直径则表征云的可降水量，众数直径指该直径范围内的粒子数占总粒子数的比例最高。对小云粒子的各种直径统计表明：云内 17% 的众数有效粒子直径为 16.02 μm，92% 的众数平均直径 D_1 为 4.55 μm，52% 的众数平均平方根直径 D_2 为 5.71 μm，38% 的众数平均立方根直径 D_3 为 8.50 μm。D_1、D_2、D_3、D_e 的众数直径逐渐增大，众数逐渐减小，说明小云粒子的不同特征量分布的离散度越来越高。

从图 7b 大云粒子浓度随高度的分布可以看出，飞机下降阶段冰晶浓度呈多峰和单峰分布，分别在低云 840、1367 和 2082 m 处及中云 2953、4646 和 5483 m 处出现大云粒子浓度大值区，最大粒子浓度分别达到 0.196、0.254 和 0.083 及0.453、0.286 和 0.345 cm^{-3}。在中云内，大云粒子浓度随高度呈波动增减，有 2 个明显的峰值和若干个小波动，中云底部 2953、5483 m 处大云粒子浓度达到极大值为 0.453和 0.345 cm^{-3}，随后又随高度迅速下降。由此可以判断，随着云系的发展，大云粒子在长大过程中下落，云中大云粒子浓度出现了多个峰值。探测到的大云粒子浓度垂直变化起伏很大可能与云的水平结构不均匀性有关。

图 7c 降水粒子浓度随高度的分布可以看出，中云降水粒子浓度位于中下部和顶部，分别在 3157、3792、4891、5516 和 5941 m 处降水粒子浓度对应值为 0.030、0.031、0.007、0.007 和 0.0074 cm^{-3}，3157～3792 m 层降水粒子浓度较高可能与云内水

汽含量丰富有利于降水粒子生成和增长有关;低云内降水粒子浓度峰值在 1405 和 1761 m 高度处对应值为 0.0037 和 0.0041 cm^{-3},该处降水粒子浓度峰值较低可能与降水粒子在下降过程中溢出云外有关。

表 2 中 FSSP 显示,从垂直角度看 3915～5117 m最适宜催化,FSSP 浓度 75%分位值达 39.9～110 cm^{-3},适宜催化的水平范围占飞行水平距离的 25%,3915～4531 m 适宜催化的水平范围占 50%以上,还有占 25%的区域在各高度层皆不适宜催化。2DC 浓度普遍大,达 44～392 L^{-1},机上宏观记录显示空缺部分是该高度层粒子浓度大,过冷水多,仪器表面结冰造成异常。3915～6337 m 有较多的 2DP 粒子,该区域为粒子增长区,其中 5117 m 附近 2DP 粒子较少与飞机多在云的间隙飞行有关,2DP 粒子在 1374 m 出现极值,可能粒子在该高度层以上出现大量碰并或粘连增长。

表 2　各种粒子数浓度在不同高度层的四分位特征

(FSSP 单位:cm^{-3},2DC 和 2DP 单位: L^{-1})

Table 2　Quarterly characteristics of particle number concentration at different altitudes

(cm^{-3} for FSSP, L^{-1} for 2DC and 2DP)

高度/m	25%FSSP	50%FSSP	75%FSSP	25%2DC	50%2DC	75%2DC	25%2DP	50%2DP	75%2DP
1072	3.05	4.39	12.4	43.9	74.7	159	5.08	6.9	9.18
1374	10.4	16.4	19.9	192	307	392	10.8	13.1	16.3
1989	7.32	8.79	10.1	109	140	172	5.99	7.47	9.42
2598	5.67	7.83	10.7	75.1	115	165	1.48	2.08	2.8
3177	6.47	8.08	10.6	90.7	117	146	2.37	2.84	3.24
3915	19.5	28.8	110	/	/	/	3.74	4.89	7.12
4531	19.4	29.2	62.1	/	/	/	4.34	5.84	7.26
5117	7.23	10.9	39.9	/	/	/	3.3	4.03	5.11
5723	5.58	7.84	12.0	/	/	/	3.65	4.51	5.42
6337	3.91	5.86	10.5	/	/	/	3.48	5.5	8.01
6926	2.81	4.02	5.73	/	/	212	2.03	2.81	3.78

2.6.3　粒子谱分布

从 11 个水平飞行高度层粒子全谱看(图 8a～8c),粒子谱呈单峰或多峰分布,小云粒子谱峰值在 1～10 $cm^{-3}\cdot\mu m^{-1}$之间;在 3177～5723 m 高度层,2DC 和 2DP 都出现第二个峰,峰值直径 800～1200 μm。云内粒子谱宽度在 6000～8000 μm,云顶谱宽在 2000～3000 μm,其中 3915 m 谱最宽,该高度层最易形成大雪团。图 8b 和 8c 中,2DC 和 2DP 两个探头观测的粒子谱在直径相同的地方发生偏离,原因可能有两个:一是 2DC 探头聚焦问题使观测数据普遍偏大;二是 2DP 探头重点探测大粒子,直径较小粒子可能出现漏记,3177 m 以上高度,小粒子漏记较多,2DC 和 2DP 粒子谱偏离较大。但两个探头同时显示云内降水粒子出现第二峰,峰值直径 700～1000 μm,云内降水粒子谱峰值直径小于游来光等(1965)在吉林观测的峰值直径 1000～1600 μm,可能因为云内上升气流和温度不同造成的。

为了研究目标云中各种粒子的尺度大小及浓度分布情况,绘制出其整个探测过程中各种粒子随时间变化的全谱图(图 8d),图中不同颜色表示相应时间该直径范围内的粒子浓度,单位为 $cm^{-3}\cdot\mu m^{-1}$。整个探测过程中,粒子浓度与直径一般呈反相关,粒子越大,浓度越小,其中小于 30 μm 的小云粒子浓度占较大比例,说明云中以过冷水滴为主,小云粒子谱浓度为 0.011～221.7 $cm^{-3}\cdot\mu m^{-1}$,大云粒子谱浓度为 6.24×10^{-7}～0.9367 $cm^{-3}\cdot\mu m^{-1}$,降水粒子谱浓度为 7.16×10^{-10}～1.04×10^{-3} $cm^{-3}\cdot\mu m^{-1}$。结合飞机探测的高度,可以发现,3177～3915 m 高度(飞机 10:34—10:51 观测数据)上,小云粒子谱最大浓度为 221.7 $cm^{-3}\cdot\mu m^{-1}$,大云粒子谱最大浓度为 0.94 $cm^{-3}\cdot\mu m^{-1}$,降水粒子谱最大浓度 0.001 $cm^{-3}\cdot\mu m^{-1}$。小云粒子最多地方,降水粒子谱出现低值可能与粒子之间小云粒子通过贝吉龙效应争食水汽有关。而在 4531～5723 m(飞机 10:54—11:21 观测数据)云层小云粒子浓度降低,降水粒子谱浓度出现高值,此时可能碰并增长较多,许多小云粒子被降水粒子吞噬。飞机 10:45—11:40观测数据大云粒子区出现空白是由于 2DC 镜头积冰,造成数据阶段性失真。而在 6337～6926 m(飞机 11:24—11:45 观测数据)高度,飞机在云顶飞行,降水粒子、小云粒子谱浓度皆降低。云中最大粒子直径达 8000 μm,最大粒子出现在云的中下部,可

能由于降水粒子在下降过程中吸收云滴或与其他降水粒子碰并而增大。

粒子谱基本为单调下降的指数型宽谱，符合幂式递减，拟合公式 $\lg N = a\lg D + b$，拟合参数 a 和 b（表 3），式中 a 为斜率，b 为 $D=1$ 时的浓度截距。b 值表示小云滴浓度大小，小云滴越多 b 值越大，表 3 中 3915～5723 m 高度层 $b>2$ 为可播区。图 8d显示，全谱图第一个红色高值区出现时间在10:05前后，高度在 1071～1379 m，小云粒子浓度大于 20 cm^{-3}，适合催化作业；在 10:30—11:20，高度 3177～5723 m，出现四个红色高值区，该层不但小云粒子浓度高，降水粒子浓度亦高，云层强可播。该云层

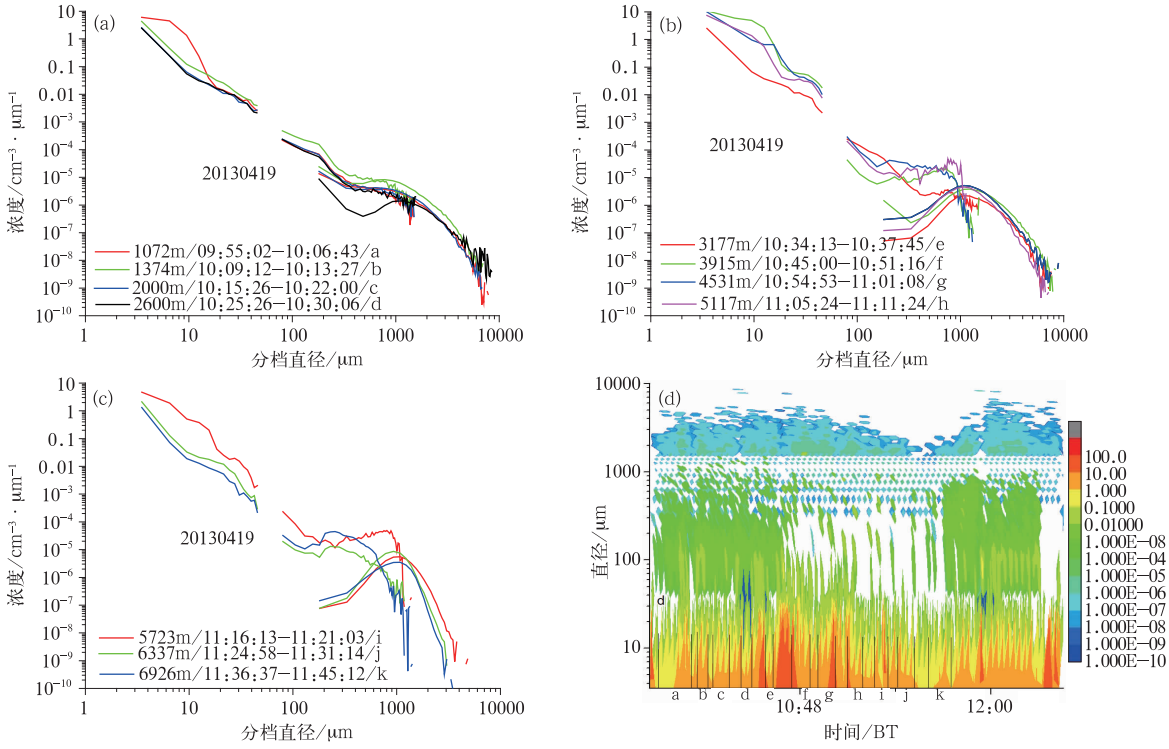


图 8 11 层高度水平探测的小云粒子(a)、大云粒子(b)和降水粒子(c)谱分布及全谱图(d)（说明同图 6）

Fig. 8 Size distribution of small cloud particles (a), big cloud particles (b) and precipitation particles (c) during horizontal legs in the 11 layer, and variations of all particles with time (d) (Illstration same as Fig. 6)

表 3 各层粒子全谱幂指数拟合曲线参数

Table 3 The exponential curve fitting parameters of full particle size distribution at different altitudes

高度/m	a	b	R^2	备注
1072	−2.64	1.94	0.96	
1374	−2.42	1.64	0.97	
1989	−2.46	1.44	0.97	
2598	−2.35	1.17	0.97	
3177	−2.47	1.47	0.96	
3915	−2.66	2.3	0.91	2DC 出现峰值
4531	−2.73	2.52	0.96	
5117	−2.78	2.59	0.92	2DP 值较高，与 2DC 曲线断开
5723	−2.74	2.39	0.87	2DC 出现峰值
6337	−2.54	1.17	0.94	
6926	−2.75	1.53	0.85	2DP 值较高，与 2DC 曲线断开
总体平均	−2.59455	1.832727	0.934545	

水平分布和垂直分布变化较大,全谱图亦显示出云的层状结构特征。

2.6.4　二维图像分析

平飞过程中每个高度层随机选取 2DC 或 2DP 二维图像一张分别对应高度层为 1072、1374、1989、2598、3177、3915、4531、5117、5723、6337 和6926 m,统计图像信息得到二维粒子相关信息表(表 4)。

表 4　云中探测到的二维粒子相关信息表

Table 4　Information of the detected two-dimensional particles in clouds

时刻	纬度/°N	经度/°E	高度/m	温度/℃	描述
10:05:33	37°42.3′	114°36′	1072	−4	不规则状冰晶、结淞冰雪粒子
10:12:24	37°53.2′	114°34.9′	1374	−5.04	针状、结淞冰雪粒子
10:16:20	37°50.9′	114°35.1′	1989	−8.19	板状、针状、柱状冰晶及冰晶聚合体
10:29:18	37°52.8′	114°35.2′	2598	−3.56	薄六角板状、针状、柱状、霰、结淞冰雪粒子
10:36:20	37°46′	114°35.6′	3177	−1.46	霰粒子,不规则状冰晶
10:46:31	37°41′	114°35.9′	3915	−2.01	针状、柱状、不规则状、雪团、雪花
11:01:05	37°34′	114°36.6′	4531	−4.02	结淞冰雪粒子、针状、柱状、不规则状冰晶
11:06:38	37°40.7′	114°35.5′	5117	−7.14	冰晶聚合体、雪花、雪团
11:20:25	37°35.6′	114°36.2′	5723	−10.24	六角板状、枝状、针状、柱状、不规则状冰晶、星状冰晶及冰雪结淞体
11:28:29	37°51.4′	114°35.2′	6337	−14.02	枝状、板状、冰晶结淞体
11:40:08	37°45.9′	114°35.4′	6926	−17.78	六角板状、侧片状、针状、柱状冰晶、不规则状冰晶,霰粒子及冰晶聚合体

从表 4 可以看到,在 1072～3177 m 温度为−1.5～−8.2 ℃,存在大量不规则的冰晶、结淞冰雪粒子,也可看到滴状的过冷水滴,粒子直径一般在 1500 μm 以下。由于温度和空气湿度不同,各高度层雪花形状差异,1374～2598 m 出现明显针状或柱状雪花,各高度均可见结淞冰雪粒子,云中水汽充沛。在 3915～5723 m 对应温度−2.0～−10.2℃,其中 3915 m 雪花明显增多,最大直径可达 3000 μm 以上,出现雪团;4531 m 雪团粒子减少,多为直径较小的冰雪粒子;5117 m 不规则大雪团、霰以及冰雪结淞体最多,直径在 3000～4000 μm,可见该高度雪花之间相互碰连最为密集,形成的大雪团最多,5723 m 大雪团明显减少。6337 m 以上,温度在−14～−18℃,出现板状、针状、柱状、星状雪花粒子,或冰晶粒子,但直径一般小于 1000 μm。从二维粒子图像的分析可以看出,1072～1989 和 3915～5117 m 附近有明显的单个霰和冰雪晶聚合体,该层是过冷液态水滴与冰晶粒子共存的空间,冰相粒子通过凝华过程而迅速增长。

2.7　此次作业探测特点

该例探测区处在云系前部增长区内,其特点:一是云系明显分为 2 层,上层由槽前抬升形成,云底为 2995 m,云顶为 5726 m,云内温度在−0.14～−10.5℃;下层为回流混合形成,云底为 1068 m,云顶为 2591 m,云内温度在−0.5～−8.3℃,从雷达回波强度垂直分布和 2DP 粒子看,大粒子主要在上层槽前云中增长;二是“槽前云”温度高,下层“回流云”温度低(3177～4531 m 温度−2℃左右,1989 m 温度−8℃),1374 m 附近有大量 2DP 粒子,从上层下落的降水粒子在此粘连增长加大地面降雪;三是大云粒子和降水粒子很多,2DC 浓度为 60 L^{-1}(最大值 392 L^{-1})、2DP 浓度为 4 L^{-1}(最大值 30 L^{-1});四是小云粒子达 100 cm^{-3}(最大值达 700 cm^{-3}),有一定催化潜力。

3　效果分析

3.1　效果区与对比区划分

飞机实测 3000 m 以下为东南风,风速为 22～43 km·h^{-1},3000 m 以上为西南风或西北风,风速为 67～93 km·h^{-1},3177～6334 m 高空平均风速为 80 km·h^{-1}、平均风向 263°,偏西风。此次作业采用不同高度连续催化,根据系统移动方向和速度,3000 m 以下催化,由于风向为东南风,与3000 m以上云团移动方向不一致,图 2 和图 3 没有标出 3000 m 以下催化后的影响区和相应的对比区。10:35以后在 3177 m 催化,3000 m 以上高空风转为偏西风,催化云块在高空风作用下随系统移动,相应

的影响区和对比区见图 2 和图 3，其中 ab＝182 km，ae＝80 km，ac＝105 km。

表 5 飞机实测高空风

Table 5 Wind speed aloft measured by aircraft

时间	地点	高度/m	风向	风速/km·h^{-1}
10:08	高邑	1374	165	42.596
10:16	石家庄	1983	144	22.224
10:35	元氏	3182	290	66.672
10:50	石家庄	3900	238	88.896
10:57	元氏	4536	280	75.932
11:05	元氏	5113	240	92.6
11:14	石家庄	5700	290	66.672
11:26	高邑	6334	239	87.044

3.2 作业后卫星反演参量的变化

卫星反演参数显示（图 9），10:03，114.8°E 以东卫星参数普遍较低，图 2a 中 gh 线所处云区呈灰色；10:35—11:03，催化高度在 3177～4531 m，根据高空实测风向风速推算，11:03 催化云抵达 a 线附近，a 线对应图 2b 中箭头 A 所指位置，该处云团变亮，由灰变白。12:03，a 线东移到 A 线，A 线对应图 2c 箭头 A 位置。从图 2b 和 2c 看出受催化的云块在东移过程逐步由灰白变黄色，云顶变亮。13:03，b 线东移到 B，B 线以东为催化云。11:03、12:03 和 13:03 催化影响云卫星反演参数曲线都有明显特征：云顶高度从 11:03 开始升高，由 6000 m 上升到 8000 m 以上，12:03、13:03 维持在 8000～10000 m；云顶温度从 11:03 开始下降，由 －30℃ 下降到 －40℃ 左右；有效粒子半径升高到 25 μm 左右；光学厚度维持在 35 左右的高位；液水路径升高到 600～800 mm。从 13:03 图看 B 线以西云顶温度升高，云顶高度降低，光学厚度和液水路径均下降，此时，催化作业的时间为 11:20—12:00，作业高度在 6334 m，处于云外，催化无效。催化影响区对应的雷达剖面显示（图 11），雷达回波顶高和中心强度都有上升。

图 10a 为自然云卫星反演参数，两竖线之间为作业区，两侧分别为对比区 1 和对比区 2。由于云块以 80 km·h^{-1}速度向东移动，12:03 沿图 2 中 ab 线段云块移到了 ef，因此，图 10b 两竖线之间为催化影响区，两侧分别为对比区（同图 10a）。未催化云的云顶温度最低值为 －40℃、云顶高度最大值为 9800 m、光学厚度最大值在 45 左右、最大液水路径 700 mm，有效粒子半径 30 μm，由于一直降雪，催化 1 h 后，云顶温度、云顶高度、光学厚度最大值与自然云相当，但液水路径、有效粒子半径最大值分别下降了约 100 mm、5 μm。影响区与对比区相比，云顶温度、云顶高度在催化前后没有明显变化，但液水路径、有效粒子半径、光学厚度变化明显，其中南部对比区液水路径、有效粒子半径、光学厚度分别下降 400 mm、10 μm、10，北部对比区液水路径、有效粒子半径分别下降 40 mm、5 μm。从图 2b 和图 2c 看，两侧对比区云顶比影响区更亮，但影响区雷达回波强度明显高于对比区，可能催化后影响区内中低云发展较强，暖湿气流向影响中心辐合所致。

图 10c 是 FY-2 卫星反演的石家庄、元氏、高邑、栾城四地平均卫星参量 08:03—15:03 随时间的变化，云顶高度由 08:03 的 6175 m 降到 09:03 的 2230 m，之后逐步上升，12:03 达 9100 m，13:03 降低到 8660 m，14:03 再次升高达 10925 m，此后，开始下降。云顶温度曲线与云顶高度曲线趋势一致，09:03 温度最高 －20.24℃，12:03 和 14:03 分别出现温度极低值，降到最低 －36.66 和 －40.62℃。光学厚度 8:03 为 27.5，11:03 出现最大值 36，之后下降到 23～26。液水路径变化趋势与光学厚度一致，08:03 为 577.5 mm，10:03 降到 481.26 mm 的极低值，之后开始迅速增加，11:03 升到全天最大值 647.67 mm，此后持续下降，至 15:03 降到 342.89 mm。粒子有效半径 8:03 为全天最高达 29.4 μm，9:03 降到极低值 22.24 μm，11:03 和 13:03 分别出现极大值 24.63 和 23.77 μm。对应于雨滴谱雨量监测，08:03 出现最大雨强，11:03 和 13:03 分别出现雨强次大值。10:05 开始催化，11:03 卫星监测催化影响区云体有明显发展。但 12:03 以后，粒子有效半径、光学厚度和云水路径先后降低，催化效果不佳。对照探空资料发现，12:00 高空850 hPa 风向由东南风转为西南风（此时地面仍为东风），东风冷垫减弱，从而减弱了对西南气流的抬升作用，这一变化是否影响催化效果有待进一步研究。

3.3 作业后雷达强度的变化

雷达剖面为图 3 中 gh 横线即栾城到衡水的连线，图 3 中 10:36 对云块催化，11:00—11:24 云块 *A* 明显发展，强回波区扩大，且向催化影响中心靠拢，12:00 催化影响中心附近出现强回波区。其剖面图显示（图 11），10:36，催化云块（A）15 dBz 回波带顶高 5000 m，底高 1200 m，中心最大回波强度

25 dBz；11 时，15 dBz 回波带顶高 8500 m，底高降到 1200 m 以下，中心回波强度升到 30 dBz；11：24，该云块 30 dBz 强回波面积扩大；12：00 强回波中心再次扩大，中心内部出现四个 35 dBz 的亮区；催化云块 B 从 11：24 到 12：00 雷达回波 25 dBz 面积明显扩大，回波中心出现 30 dBz 的亮区。

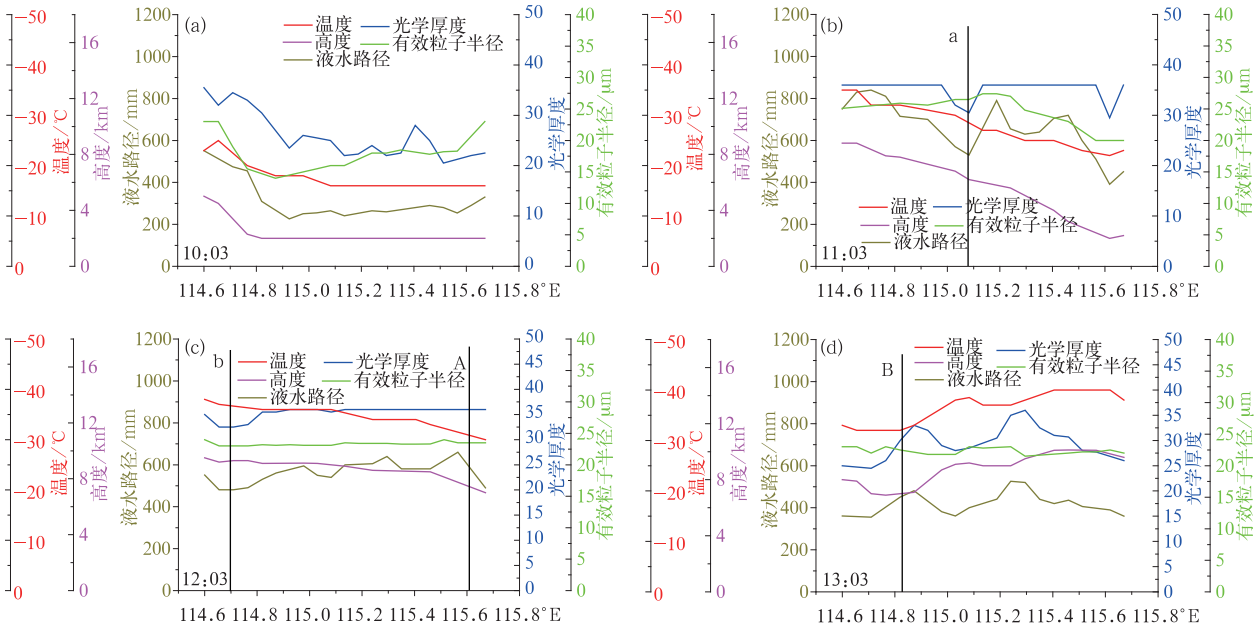


图 9　栾城到衡水连线（图 2 gh 线剖面）FY-2 卫星反演参数

Fig. 9　FY-2 satellite retrieved parameters along the route from Luancheng to Hengshui (cross section of gh line in Fig. 2)

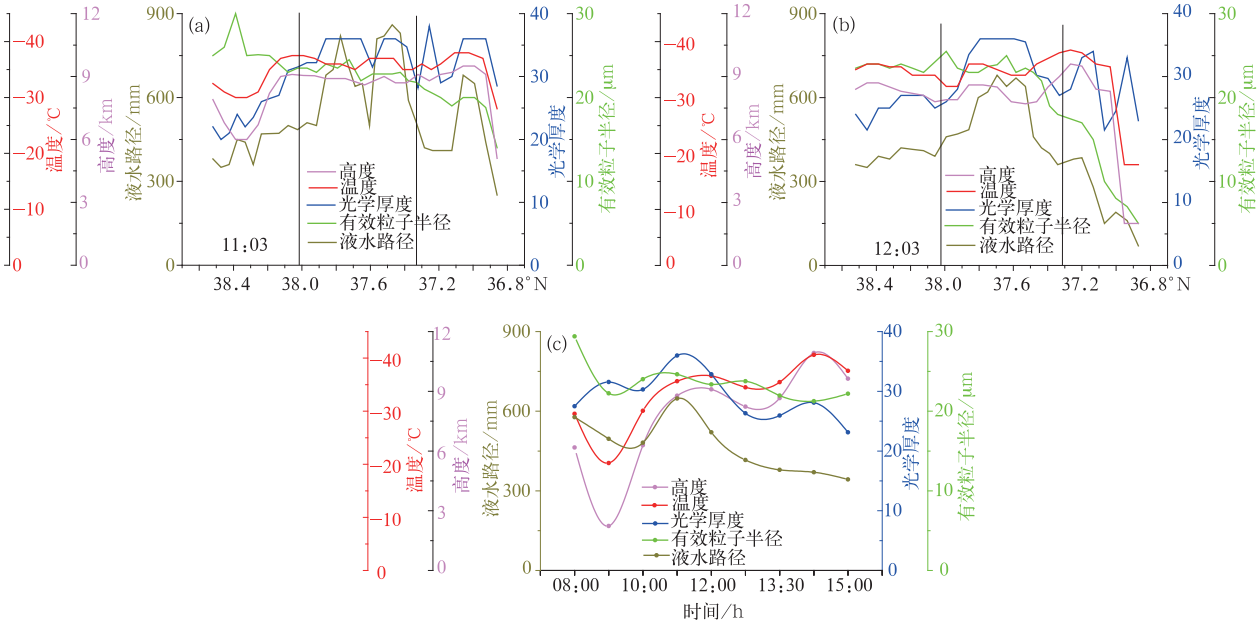


图 10　FY-2 卫星反演参数

（a）11：03 沿图 2 中 ab 线段卫星反演参数，（b）12：03 沿图 2 中 ef 线段卫星反演参数，（c）石家庄、高邑、栾城、元氏四地平均值

Fig. 10　FY-2 satellite-derived parameters

(a) satellite retrieved parameters at line from a to b in Fig. 2 at 11:03 BT, (b) satellite retrieved parameters at line from e to f in Fig. 2 at 12:03 BT, (c) the average value of Shijiazhuang, Gaoyi, Luancheng and Yuanshi

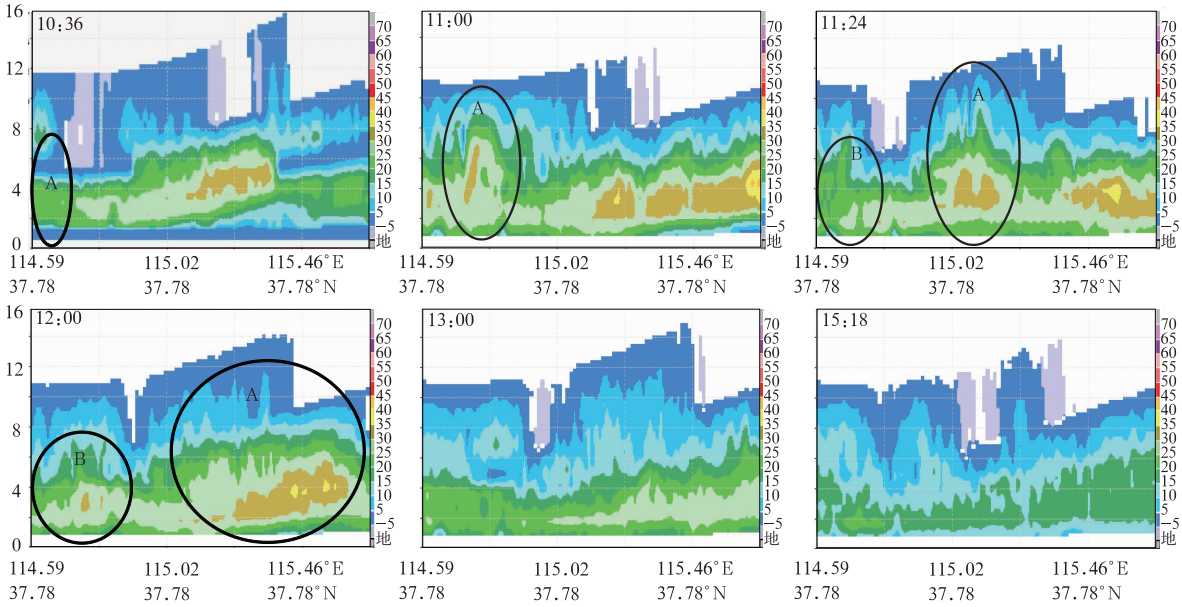


图 11 2013 年 4 月 19 日 10:36—15:18 催化影响中心沿系统移动方向的雷达剖面

Fig. 11 Radar echo cross-section along the moving direction of the catalytic effection center during 10:36 BT—15:18 BT 19 April 2013

3.4 地面降水区域差异

本次过程出现地面积雪，自动雨量站观测数据因积雪未融化，堵在测筒口，影响观测记录，使自动雨量站小时降雨量失真，缺小时降水资料，无法分析对比区和影响区小时降水。基本雨量站人工观测 6 h降水量显示，08 时以前，河北基本无降水，08—14 时石家庄、衡水、邢台、邯郸普遍降水，6 h 最大降水量 14 mm；14 时后降水范围扩大、降水强度增加，河北的保定南部、沧州及以南地区普遍降雪，6 h 最大降水量 18 mm；20 时以后降水基本结束，效果区累积降水量明显大于对比区。

根据地面基本站人工观测的 08—20 时地面降水资料分析影响区和对比区的降水差异，统计结果见表 6。

影响区过程降雨量平均值为 21 mm，对比区 1 和对比区 2 分别为 10.1 和 12.7 mm，影响区比对比区平均雨量多 45.57%。影响区降水量标准偏差为 2.54 mm，变异系数为 11.36%。对比区标准偏差为2.7 mm，变异系数为13.97%。影响区与对比区

表 6 2013 年 4 月 19 日 08—20 时影响区和对比区地面降水量实况

Table 6 Surface precipitation amount of the affected area and the confrontation area from 08:00 BT to 20:00 BT 19

影响区	雨量/mm	对比区 1	雨量/mm	对比区 2	雨量/mm
吴桥	23.3	献县	11	饶阳	13.7
辛集	19.3	肃宁	8.5	安平	16.5
赵县	18.7	曲阳	8.4	巨鹿	11.9
栾城	26.5	定州	11.1	任县	11.4
衡水	15.9	蠡县	10.7	南和	10.8
武邑	21.7	灵寿	10.6	隆尧	12.1
阜城	16.1	行唐	10.1	广宗	12.7
景县	23	新乐	10.4		
宁晋	23.7				
石家庄	21.1				
高邑	22.2				
平均值	21		10.1		12.7

降水量总变异系数为 34.22%，总变异系数明显高于影响区和对比区的变异系数，这种变异的 t 检验值为 1.12×10^{-9}，表明影响区和对比区降水量差异显著。

4　结　论

（1）此次降水天气系统是以地面冷高压和低层 850 hPa 偏东风作为冷垫，中高层西南暖湿气流沿着冷垫爬升形成的弱不稳定天气系统。在云系前部进行催化并探测，其特点：一是出现上层“槽前云”和下层“回流云”两层云结构，大粒子主要在上层槽前云中增长；二是“槽前云”温度和云顶温度较高（−18℃），“回流云”温度低，固态降水粒子在“回流云”粘连增长，地面降暴雪；三是大云粒子和降水粒子很多，2DC 浓度为60 L^{-1}（最大值392 L^{-1}）、2DP 浓度为 4 L^{-1}（最大值 30 L^{-1}）；四是小云粒子浓度为 100 cm^{-3}（最大值达 700 cm^{-3}），有一定催化潜力。

（2）在 3195～5723 m 高度，小云粒子浓度大于 20 cm^{-3}，全谱拟合曲线 $\lg N=a\lg D+b$ 的截距 $b>2$，适合催化作业。小云粒子垂直和水平分布不均匀，波动幅度在 1～2 个量级。小云粒子计算含水量一般在 0.01 $g\cdot m^{-3}$ 左右，中云 3180 m 处含水量最大，达 0.081 $g\cdot m^{-3}$。小云粒子谱呈单峰分布，降水粒子谱呈双（多）峰分布，上升气流和水汽含量影响云内粒子谱分布。云内众数有效粒子直径为 16.02 μm，众数平均直径为 4.55 μm，众数平均平方根直径为 5.71 μm，众数平均立方根直径为 8.50 μm。

（3）作业后影响区雷达反射因子、卫星反演参量和实测云内微物理特征量都有明显变化。催化云块 15 dBz 回波带顶高抬升约 3000 m，中心出现 35 dBz 强回波，最大回波强度提高了 5 dBz，且 25 dBz 强回波面积扩大；卫星观测的云顶温度由 −15℃降到 −30℃以下，云顶高度由 2000 m 抬升到 6000～8000 m，液水路径由 300 mm 左右提高到 600～900 mm，光学厚度由 20～25 提高到 30～35，粒子有效半径也由 15～23 μm 提高到 20～27 μm。

（4）影响区地面平均降水量 21 mm，对比区平均降水量 11.4 mm，地面降水的区域变异经 t 检验显著。但总雨量差异中自然原因、作业效果各起多大作用还需更多资料和试验做进一步分析。

参考文献

高茜，王广河，史月琴，等. 2011. 北层状云系人工增雨个例数值研究. 气象，37(10)：1241-1251.

胡志晋. 2001. 层状云人工增雨机制、条件和方法的探讨. 应用气象学报. 12(增刊)：10-13.

胡志晋，秦瑜，王玉彬. 1983. 层状冷云数值模式. 气象学报. 41(2)：194-202.

石爱丽，郑国光，孙晶，等. 2013. 河南省一次秋季层状云降水增雨潜力的观测和数值模拟分析. 气象，39(1)：67-73.

孙霞，银燕，韩洋，等. 2012. 石家庄地区雾霾天气下云滴和云凝结核的分布特征. 中国环境科学，32(7)：1165-1170.

陶树旺，刘卫国，李念童，等. 2001. 层状冷云人工增雨可播性实时识别技术研究. 应用气象学报，12(增刊)：14-22.

汪玲，刘黎平. 2015. 人工增雨催化区跟踪方法与效果评估指标研究. 气象，41(1)：84-91.

王永生，等. 1985. 大气物理学. 北京：气象出版社，271.

魏东，孙继松，雷蕾，等. 2011. 三种探空资料在各类强对流天气中的应用对比分析. 气象，37(4)：412-422.

游来光，马培民，胡志晋. 2002. 北方层状云人工降水试验研究. 气象科技，30(增刊)：19-56.

游来光，熊光莹，高明忍，等. 1965. 春季吉林地区层状冷云中冰晶的形成与雪晶增长特点. 气象学报，35(4)：423-433.

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. 气象，40(8)：965-980.

Fleishauer R P, Lrason V E, Vonder Haar T H. 2002. Observed microphysical structure of mid-level mix-phase clouds. J Atoms Sci, 59:1779-1804.

Gamache J F, Houze R A Jr. 1982. Mesoscale air motions associated with a tropical squall line. Mon Wea Rev, 110:118-135.

Houze R A, Hobbs P V, Herzegh P H, et al. 1979. Size dist ributions of precipitation particles in frontal clouds. J Atmos Sci, 36:156-162.

Rangno A L, Hobbs P V. 2005. Microstructures and precipitation development in cumulus and small cumulonimbus clouds over the warm pool of the tropical Pacific Ocean. Q J R Meteorol Soc,131:639-673.