付娇,张丹,董晓波,等.一次基于飞机观测的河北中南部降雪云系微物理结构的对比分析[J].沙漠与绿洲气象,2023,17(5):64-70. doi:10.12057/j.issn.1002-0799.2023.05.008

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



·次基于飞机观测的河北中南部降雪云系 微物理结构的对比分析

付 娇,张 丹,董晓波*,张健南,王姝怡,侯劭禹,薛学武,李政昊 (河北省人工影响天气中心,河北 石家庄 050021)

摘 要:2017年2月21日河北省出现一次低槽降雪天气系统,河北省人工影响天气办公室 在系统槽前部位层状云系中开展飞机云微物理探测作业,通过对邢台、赵县两地云微物理垂直结 构的精细化探测分析,发现本次过程云系为层状冷云。邢台、赵县两地云系均存在明显的逆温 层,在逆温层及其下方出现过冷水,邢台过冷水较为丰富,含量达0.19 g/m3,在过冷水丰富层(高 度为4 561~5 059 m,温度为-11~-8 ℃)下方可见结凇冰晶,直径有所增大,浓度没有出现 明显增加;赵县云系过冷水含量达 0.074 g/m³,与邢台相比偏低,冰晶在过冷水层(高度 3 308~ 3 949 m,温度-10.3~-8.7℃)以凇附、粘连增长为主,与邢台相比冰晶聚合体偏多,粒子直径和 浓度均偏大。本次探测过程,邢台云内过冷水含量丰富,具有人工增雪作业的条件;赵县云内过冷 水含量偏低,人工增雪条件差。

关键词:层状云;垂直探测;云微物理结构;过冷水

中图分类号:P426.51 文献标识码:A 文章编号:1002-0799(2023)05-0064-07

农业抗旱减灾、生态保护和修复以及水资源短 缺都对人工增雨(雪)提出了更高的需求,在我国北 方人工增雨(雪)的重要作业对象是大范围的层状云 系,春秋季开展人工增雨作业较多,冬季虽然进行人 工增雪作业但总体较少。国内外学者对层状云系的 降水特征和宏微观结构做了大量的研究[1-5],得出了 许多关于层状云的云结构和降水物理方面的研究成 果,不仅促进了云物理学的发展,还提高了层状云增 雨雪作业的科学性和合理性。

1958年,我国首次在吉林省使用飞机进行增雨 试验,此后我国人工影响天气技术得到了快速发展。 游来光等¹⁶在 20 世纪 80 年代开展的"我国北方层

收稿日期:2022-10-24;修回日期:2023-02-15

基金项目:河北省省级科技计划资助(20375402D)

作者简介:付娇(1988—),女,工程师,主要从事云物理与人工影响天 气方面研究。E-mail:fj_ryb@126.com

通信作者:董晓波(1982-),男,正高级工程师,主要从事云物理研 究。E-mail:xb.dong@qq.com

状云降水试验"中对大范围的降水性层状云探测研 究发现,降水性层状云的典型结构是"播种云与供水 云"的云结构,而且播种云和供水云在垂直方向上通 常是分离的。21世纪初,胡志晋四对层状云人工增雨 机制做出了新的解释,从云降水宏观特征和云物理 特征两方面总结了层状云的人工增雨条件和识别方 法。近年来,李宝东等18利用地基、空基及机载设备 研究表明云在发展期雷达回波,卫星反演的云顶高 度、云顶温度、有效粒子半径、光学厚度等都有增加; 云在中后期有效粒子半径、光学厚度、液水路径迅速 下降,雷达回波同时减弱。康增妹等¹⁹利用机载粒子 探测系统资料分析积层混合云发现,冰晶在温度 为-3~-6 ℃的讨冷水丰富区出现以凇附方式为主的 爆发性增长。刘香娥等100利用飞机探测资料分析了 一次积层混合云云系垂直结构,发现云中过冷水含 量不高,在云系不同高度的冰晶形状主要有板状、针 柱状、辐枝状和不规则状,云中粒子增长方式以冰晶 聚合为主。刘伟等印利用两次云粒子垂直探测资料

分析了一次低槽冷锋天气系统下层状云结构特征和 演化规律,探讨了冬季低槽冷锋系统层状云催化条 件和催化时机。董晓波等^[12]对作业前后的云和降水 特性进行比较,发现作业后,云滴数浓度和液态水含 量显著降低,冰晶粒子浓度和降水粒子浓度显著增加。

本文对河北中南部一次降雪过程云系不同地点 不同时间进行对比分析,结合天气图、雷达、飞机等 资料,研究该类云系的微观结构特征,为该类云的云 结构演变特征及作业潜力区识别研究提供参考依 据。

1 仪器和资料

1.1 探测仪器及资料

飞机为空中国王飞机(编号 3523),加装的机载 云微物理探测设备有:DMT 公司云滴谱探头 (CDP),测量粒子直径为 2~50 µm;云粒子图像探头 (CIP),测量粒子直径为 25~1 550 µm。SPEC 公司的 高体积降水粒子分光仪(HVPS),测量粒子直径为 150~19 200 µm; 云粒子成像仪(3V-CPI), 拍摄的粒 子图像分辨率比 CIP 更高,能清晰地展示云粒子形 态特别是小粒子的形态。Nevzorov 公司生产的热线 式含水量仪由总含水量传感器和液态水含量传感器 两部分组成,可以实际探测云内总含水量和液态水 含量,总含水量传感器为直径8 mm 的圆锥形传感 器,不同相态粒子可在圆锥内蒸发,得到累计含水 量;液态水含量传感器为直径 1.8 mm,长 16 mm 的 圆柱形传感器。固态水含量为总含水量与液态水含 量的差值。Aventech 公司生产的机载气象探测系统 (AIMMS-20)和 GPS 定位系统等设备。

另外还有天气资料、石家庄新一代 SA 型多普勒 天气雷达资料、国家站分钟降水资料等。

1.2 天气概况

2017年2月21日受西风槽影响,河北省出现 一次大范围降雪过程,21日20:00(北京时,下同) 500 hPa 槽线移至河北省西部,飞行时段内(17:30— 20:46),河北处于槽前正涡度平流区,青藏高原东侧 有南支槽配合,将西南暖湿气流向北输送,形成了一 条宽广的暖湿输送带。700与500 hPa 槽线位置相 近。08时,河北省位于高压后部,河北中南部为偏东 风气流,冷空气随偏东风向太行山东麓聚集,有利于 低云的发展。20时,随着系统东移,影响河北的高压 减弱,逐渐转为低压系统控制。同时,青藏高原东侧 低压发展加强,自西南伸展至山东半岛,飞行探测区 域处于此低压暖切变的北侧。

1.3 飞行概况及数据处理

飞机 17:30 从正定机场起飞,在邢台、赵县、栾 城等 5 个点做了 5 次垂直探测,探测高度为600~ 6 250 m,20:46 降落至正定机场。本文飞机入云 的判断条件为:CDP 探头观测到的云粒子浓度大 于10 cm⁻³、热线含水量仪观测到的液态水含量大于 0.001 g/m³时作为入云的判断标准^[4]。本文选取邢台 垂直上升(17:54:10—18:05:40)和赵县垂直下降 (18:30:07—18:46:33)的探测数据进行对比分析, CDP、CIP、HVPS 探测到的粒子浓度数据和热线含水 量仪探测到的含水量均进行了 5 s 滑动平均处理, 利用 CIP 观测数据分析冰晶或冰晶聚合体浓度时, 参考相关研究[11],去掉了直径小于 100 μm 的粒子 浓度数据。

1.4 降水概况

利用分钟降水资料分析可知,邢台国家气象站在 17:47 出现了 0.1 mm 降水,飞机在邢台垂直上升 探测(17:54:10—18:05:40)时段未观测到地面降水量,在赵县上空垂直下降探测时(18:30:07—18:46:33),赵县地面开始有降雪,18:35 以后至探测结束降雪量减少至没有。

1.5 雷达资料分析

图 1 为 18:42 的石家庄 S 波段天气雷达组合反 射率,图中叠加了飞机在邢台和赵县的飞行探测轨 迹(黑线),雷达观测资料分析表明,飞机观测时段雷 达回波呈西南一东北向均匀带状分布,强度在 10~ 20 dBZ,自西南向东北方向移动。

为进一步分析赵县地区雷达回波垂直结构及演



图 1 2017年2月21日邢台(A 处红圈)至赵县(B 处红圈)垂直探测时飞行轨迹(黑实线)与 雷达组合反射率叠加图(AB 两地相距 82 km)

变特征,选择沿着回波移动方向,在飞行区域内对不同时刻雷达回波作垂直剖面,其中剖线位置为图1中黄色箭头,剖线长15.3 km。通过剖面分析发现, 雷达回波垂直结构比较均匀,均在10~20 dBZ。 18:36,15 dBZ 的回波顶高为4 km,雷达回波强度最 大为20 dBZ;18:42,15 dBZ 的回波顶高是 3 km, 雷达回波强度最大为15 dBZ,雷达回波强度减弱。 18:36—18:42 雷达回波均接地,说明地面有降雪。 1.6 卫星资料分析

为进一步分析云层的发展状况,本文参考日本 Himawari-8/AHI 夜间云微物理 RGB 合成方案^{[13-14}对 卫星图像进行合成。该方案是针对夜间没有太阳辐 射情况下的特殊合成方案,尤其是在无云区识别雾 和低云时特别有效。多通道 RGB 合成技术是根据卫 星不同通道特征,利用多个通道计算后的数据,分别 赋值给红(R)、绿(G)、蓝(B)通道,通过合成形成彩 色图像。多通道组合可以提取不同的监测信息。其中 R为10.4 µm 通道与12.4 µm 通道的亮温温度差值, 用以反映云的光学厚度,在该通道,较厚的云层近似 于 0, 而厚度较薄的云多表现为正值;G为3.9 µm 通道与10.4 µm 通道亮温温度的差值,可以反映云 的相态变化和有效识别雾和低云;B为10.4 µm 通道 亮温温度,可提供陆地和云顶温度的信息^[15]。

RGB 合成图中,邢台探测地区的颜色为深绿色 (图 2a),云顶亮温温度为 225~230 K(图 2b),赵县 附近的颜色较浅偏蓝(图 2a),水汽含量相对较少, 且云顶亮温温度为 235~240 K,比邢台高(图 2b)。 18:30 时,邢台云系的亮温温度在-34~-38 ℃,赵县 云系亮温温度在-26~-30℃,邢台云系发展较强。

1.7 探空数据分析

从图 3 邢台(本文邢台探测区域)探空数据中可 以看出,3 234~3 553 m 存在明显的逆温层,温度随 高度从-10.7 ℃升高至-6.8 ℃。采用蔡森等^[16]研究结 果以相对湿度 84%作为判断云区的阈值指标,据此 判断,云顶高度为 6 450 m(图 3 中浅灰色区域)。

2 云微物理垂直结构特征

2.1 云粒子浓度、含水量和温度的垂直分布特征

从邢台云粒子浓度垂直分布(图 4)可知,5 064~ 6 032 m 云内没有小云粒子(图 4a),却是大云粒子 和降水粒子浓度的大值区(图 4b、4c),固态水含量 最大值为 0.03 g/m3(图 4d)。其中 5 653~6 032 m(温 度-16.3~-13.6 ℃),大云粒子(CIP)浓度最大值为 6.36×10-3 cm-3,降水粒子(HVPS)浓度最大值为 2.8× 10⁻³ cm⁻³;5 064~5 649 m 温度为-12.7~-10.3 ℃,大 云粒子浓度最大值为 3.5×10-3 cm-3,降水粒子浓度 达到 1.3×10-3 cm-3。4 995~5 059 m 存在弱逆温层 (温度-11~-10.3 ℃)(图 4d), 逆温层中过冷水含量 最大值为 0.02 g/m3。在逆温层下方 4 561~4 991 m (温度-11~-8℃),是小云粒子浓度的大值区,有极少 量大云粒子,降水粒子值接近0,小云粒子浓度最大 值为 49.3 cm-3, 过冷水含量最大值为 0.19 g/m3, 过 冷水含量的大值区与小云粒子浓度高值区相对应。 2 891~3 593 m(温度-11~-5.6 ℃),小云粒子浓度 最大值为 98.8 cm⁻³, 几乎没有大云粒子和降水粒 子,过冷水含量达到 0.03 g/m3,其中 2 887~3 010 m



图 2 2017 年 2 月 21 日 18:30 Himawari-8 多通道 RGB 合成彩色图像(a)和 10.4 μm 通道亮温(b) (图中三角形代表赵县探测区域,五角星代表邢台垂直探测区域)

存在一层薄的云,入云时热线含水量仪探测的含水量 有小幅增大,小云粒子浓度最大值为98.8 cm⁻³,几乎 没有大云粒子和降水粒子,在此高度上存在强逆温 层,2887~3547 m,温度升高5.4℃。2887 m以下 大云粒子浓度有小幅增大,最高值达到1×10⁻³ cm⁻³, 有少量小云粒子和降水粒子。在3000和4800 m附 近存在两处过冷水层,均与一定强度的逆温层相对 应,然而两次逆温的强度和性质有所不同,3000 m 处的逆温层深厚,应该是空中冷暖气团的交界面,在 邢台和赵县地区的飞机探测得到的温度廓线中均存 在类似的逆温结构,而4800 m处的弱逆温层可能 与云中不同相态的云粒子有关,可能由于较深厚的 过冷水层顶部发生相变而升温。

根据冷云催化原理,邢台地区层状云中存在丰 富的过冷水,适于开展引晶催化,而由于大云粒子和 降水粒子浓度偏低,石家庄天气雷达仅在邢台探测



含水量和温度的垂直分布

区域附近观测到低于 10 dBZ 的分散回波,表明利用 S 波段天气雷达判断人工增雪作业可播区具有局限 性。

从赵县云粒子浓度垂直分布(图 5)可知:3 308~ 3 949 m,出现 CDP 浓度大值区(图5a),750~6 000 m 均有大云粒子和降水粒子存在(图 5b、5c),两种粒 子浓度垂直分布的峰值变化趋势一致。3 954~ 6 000 m(温度-16~-6.8 ℃),云内没有小云粒子(图 5a),大云粒子浓度平均值为 3.07×10⁻³ cm⁻³,最大值为 8.92×10-3 cm-3;降水粒子浓度平均值为0.76×10-3 cm-3, 最大值为 1.89×10⁻³ cm⁻³。3 308~3 949 m 存在两个明显 逆温层, 逆温层温度从-10.3 ℃升至-8.5 ℃, 降至 -8.9 ℃,再升至-6.8 ℃,以小云粒子为主,大云粒子 和降水粒子共存,小云粒子浓度最大为43.96 cm⁻³,过 冷水含量达到 0.074 g/m³(图 5d),与小云粒子浓度 高值区相对应。3 308 m 以下,大云粒子和降水粒子 浓度随高度降低呈增大趋势,均出现两个峰值,其中 在 3 051 m 左右,温度为-9.4 ℃,大云粒子浓度最大 值为 9.51×10-3 cm-3, 降水粒子浓度最大值为 0.96× 10-3 cm-3;高度 1 975 m 左右,温度为-11.1℃,大云 粒子浓度最大值为 8.68×10⁻³ cm⁻³,降水粒子浓度最 大值为0.88×10-3 cm-3。3 308~3 949 m 存在过冷水, 其余高度层中过冷水和固态水共存,以固态水为主, 固态水含量最大值达到 0.28 g/m³。



云内实测含水量(图4和图5),CDP浓度高值 区与液态水含量的高值区有较好的对应关系,但在 CDP浓度为0的区域,却出现液态水含量不为0的 现象,这是因为当小冰晶撞到 Nevzorov 热线式含水 量仪中的液态水含量传感器时容易发生破碎融化, 使得液态水含量在遇到小冰晶时观测值偏大。King 等¹⁷⁷研究发现 Nevzorov 热线式含水量仪可以实时提供液态水含量和总含水量,不确定度为 15%。孙玉稳等¹⁵¹分析 2017 年 5 月 22 日一次低槽冷锋降水过程中 Nevzorov 热线式含水量仪的液态水含量观测值在暖云中偏小,也存在一定误差。

2.2 不同高度层的粒子谱特征

从邢台不同高度层的云粒子谱分布(图 6a)可 看出,4 602~5 000 m,CDP 粒子谱型呈双峰分布,峰 值在 7 和 20 μm 附近;5 000~5 400 m CDP 粒子谱 型呈多峰分布;5 000~6 000 m 由于云粒子以较大冰 晶为主,CDP 谱型出现间断现象。CDP 的粒子数 密度随高度升高降低,从 0.1~130 L⁻¹·μm⁻¹降到 0.1~5 L⁻¹·μm⁻¹。CDP 谱型呈双峰和多峰分布,这是 由于乱流和上升气流比较强,粒子吸附水汽、凝结增 长和随机碰并等共同作用,形成许多大云滴。4 602~ 5 000 m CIP 谱型呈指数型分布;在 5 000 m 以上,谱 型呈单峰分布,峰值在 800 μm 附近。CIP 谱宽随高 度没有明显变化。HVPS 谱在不同高度层上谱型均 呈单峰分布,峰值在 900 μm 附近。从图 6a 综合分析 可以看出,4 602~6 000 m 粒子谱宽随高度降低先变 宽后变窄。

结合 CPI 探头实测粒子图像, 邢台上空逆温层 (高度 4 995~5 059 m,温度-11~-10.3 ℃)以过冷水 为主。在逆温层的上方云层中(高度 5 064~6 032 m, 温度-16.3~-10.3℃)有过冷水、冰晶聚合体、柱状冰 晶和不规则形状的冰晶,以不规则形状的冰晶为 主;在逆温层下方云层中(高度 4 561~4 991 m,温度 -11~-8 ℃)有过冷水和不规则形状的冰晶,以过冷 水为主,过冷水含量达到 0.19 g/m3。在 3 599~4 556 m 的云层中(温度-8~-5.6 ℃)有凇附冰晶和不规则形 状的冰晶。在2891~3593 m的云层中出现逆温(温 度-11~-5.6 ℃), 云层中有讨冷水、凇附冰晶和不规 则形状的冰晶。在2368~2887 m的云层中(-11~ -10.3 ℃)有凇附冰晶、柱状冰晶、板状冰晶和不规 则形状的冰晶。在邢台云层下部探测到淞附冰晶,说 明上层的冰晶经过过冷水层后以淞附方式为主增 长,但是凇附冰晶并未出现明显的增多。

在邢台上空存在明显的逆温层,在逆温层及下 方出现过冷水丰富层,过冷水含量达到 0.19 g/m³,与 康增妹等^[18]分析的冬季层状云的垂直结构有相同之 处,在逆温层的下方存在丰富的过冷水,过冷水含量 达到 0.2 g/m³。结合 CPI 观测到的粒子图像,冰晶经 过过冷水层后可见结凇,直径有所增大,大云粒子浓 度最大为 1.2×10⁻³ cm⁻³(图 4b),降水粒子浓度最大 为 0.24×10⁻³ cm⁻³ (图 4c),浓度均没有出现明显增加,说明冰晶经过过冷水层后未出现爆发性增长, 邢台地面无降雪。结合整个垂直探测过程,4 561~ 5 059 m 即过冷水丰富层(-11~-8 ℃)适宜人工播撒 冷云催化剂开展人工增雪作业,增雪潜力较大。

从赵县不同高度层的云粒子谱分布(图6b)可看 出,在750~3750m,CDP 谱型呈双峰分布,峰值分 别在5和10μm 附近;CIP 谱型呈指数型分布; HVPS 谱型呈双峰分布,峰值在800和2000μm 附 近。在3750~6000m,云粒子以较大冰晶为主,CDP 谱型出现间断;CIP 谱型呈指数型分布;HVPS 谱型 呈单峰分布,峰值在1000μm 附近。从图6b综合 分析可以看出,750~6000m 随高度降低,粒子谱宽 明显变宽。



图 6 邢台(a)和赵县(b)不同高度层粒子谱分布 (a为17:54:10-18:05:40;b为18:30:07-18:46:33)

结合 CPI 探头实测粒子图像,赵县上空存在逆 温层(高度 3 308~3 949 m,温度-10.3~-6.8 ℃),逆 温层中有过冷水、凇附冰晶、柱状冰晶、冰晶聚合体 以及不规则形状的冰晶,以不规则形状的冰晶为主, 过冷水含量达到 0.074 g/m3。在逆温层的上方云层 中(高度 3 954~6 000 m,温度-16~-6.8 ℃)有过冷 水、冰晶聚合体、凇附冰晶、柱状冰晶、宽枝状冰晶和 不规则形状的冰晶,以不规则形状的冰晶为主,有极 少量的淞附冰晶和过冷水。在逆温层下方云层中(高 度 1 028~3 304 m,温度-10.3~-8.7 ℃)有过冷水、冰 晶聚合体、淞附冰晶、粘连冰晶、淞附粘连冰晶、柱状 冰晶、板状冰晶、宽枝状冰晶和不规则形状的冰晶, 凇附粘连冰晶明显增多。在750~1023 m高度的云 层中(-8.7~-7.9℃)有过冷水、冰晶聚合体、凇附冰 晶、粘连冰晶、柱状冰晶、板状冰晶和不规则形状的 冰晶,主要以冰晶为主。1023 m以下出现破碎的冰 晶。

赵县上空云系存在明显的逆温层,该层中出现 过冷水,过冷水含量达到 0.074 g/m3。结合 CPI 观测 到的粒子图像,冰晶在-10.3~-8.7℃的过冷水丰富 区以凇附、粘连增长为主,这与康增妹等9的分析结 论有相同之处,冰晶在-6~-3℃的过冷水丰富区呈 以凇附方式为主的爆发性增长。冰晶直径明显增大, 大云粒子浓度最大值为 9.5×10-3 cm-3(图 5b),降水 粒子浓度最大为 0.96×10-3 cm-3(图 5c),浓度明显增 大。结合整个垂直探测过程,赵县上空过冷水含量较 低,降雪减弱至停止,这与刘伟等四分析的 2018 年 1月6日河北省出现一次低槽冷锋天气系统影响下 的层状云结构特征结论有相同之处,3000m以下 以过冷水存在的小云粒子被自然下落的冰晶不断消 耗,过冷水含量低于 0.15 g/m³,云内过冷水含量较 低不满足人工催化条件,故可以认为本次探测区域 增雪潜力较小。

综上所述,邢台、赵县两个观测地点都位于槽前,两地云系为同一层状冷云,均存在明显逆温层, 在逆温层及下方出现过冷水。但是同一层状云系不 同部位云微物理特征存在明显差异,邢台位于赵县 南西南 82 km,受西南暖湿气流影响,邢台地区水汽 条件更好,云系发展更深厚,过冷水丰富层比赵县 较厚,温度比赵县偏低,邢台过冷水含量为0.19 g/m³, 比赵县过冷水含量(0.074 g/m³)丰富。邢台地区上层 云中的单晶下落至过冷水层中发生淞附过程,在过 冷水层下方形成了较多的淞晶;赵县云中过冷水含 量较少,只观测到很少的淞晶,且冰晶浓度较大,冰 晶粒子增长以粘连过程为主,形成了较多的冰晶聚 合体。两地云粒子直径随高度降低均有所增长,赵县 云系粒子谱宽明显变宽。

3 结论与讨论

(1)本次飞机探测时段为低槽层状云降雪系统 槽前部位,飞行区域上空存在自我国西南地区伸向 华北的暖湿输送带。邢台上空云系为层状冷云,存在 明显的逆温层,在该层及下方出现过冷水丰富层,过 冷水含量为 0.19 g/m³,过冷水层下方可见结凇冰 晶,粒子直径有所增大,浓度没有出现明显增加。邢 台云系中的过冷水丰富层(高度 4 561~5 059 m,温 度-11~-8 ℃)适宜播撒冷云催化剂,开展人工增雪 作业。

(2)赵县上空云系为层状冷云,存在明显的逆温
 层(高度3308~3949m,温度-10.3~-8.7℃),在该
 层出现过冷水,过冷水含量为0.074g/m³,比邢台云

系过冷水含量低。冰晶在-10.3~-8.7 ℃的过冷水区以 凇附、粘连增长为主,过冷水被消耗,冰晶聚合体比 邢台多,粒子直径和浓度均偏大。赵县上空的云内过 冷水含量低,粒子尺度更大,表明此时赵县上空云内 冰晶化较充分,通过邢台和赵县两地云系微物理结 构的探测分析,建议选择在邢台地区的过冷水丰富 层中开展冷云催化增雪作业。

本文通过科学设计的飞行探测,对一次低槽层 状降雪云系的微物理结构进行观测分析,为今后人 工增雪作业可播区选择提供参考依据。下一步将在 多个例飞机探测数据分析基础上,根据探空分析冰 面过饱状况,并结合水汽输送条件、云系发展阶段进 行作业潜力区判别研究。

参考文献:

- [1] 雷恒池,洪延超,赵震,等.近年来云降水物理和人工影响 天气研究进展[J].大气科学,2008,32(4):967-974.
- [2] BERGERON T.On the physics of cloud and precipitation [C]//Proceedings -Verbaux Assoc Meteorol Intl Union Geodesy Geophys.5th General Assembly, Lisbon, 1935: 156-178.
- [3] 谢松元,杨扬,杨军.辽宁层状云微物理结构的水平变化 特征[J].气象与环境学报,2008,24(1):5-8.
- [4] 孙霞,银燕,韩洋,等.石家庄地区雾霾天气下云滴和云凝
 结核的分布特征[J].中国环境科学,2012,32(7):1165-1170.
- [5] 孙玉稳,董晓波,李宝东,等.太行山东麓一次低槽冷锋降水云系云物理结构和作业条件的飞机观测研究[J].高原气象,2019,38(5):971-982.
- [6] 游来光,马培民,胡志晋.北方层状云人工降水试验研究 [J].气象科技,2002,30(刊):19-56.
- [7] 胡志晋.层状云人工增雨机制、条件和方法的探讨[J].应 用气象学报,2001,12(刊):10-13.
- [8] 李宝东,孙玉稳,孙霞,等.河北春季一次飞机人工增雪的 综合分析[J].干旱气象,2014,32(5):819-829.
- [9] 康增妹,李忠亮,刘伟,等.河北省一次降水云系物理结构 的飞机探测研究[J].气象与环境学报,2019,35(4):1-7.
- [10] 刘香娥,高茜,何晖,等.一次积一层混合云系垂直结构 和降水机制的飞机观测资料分析与数值模拟[J].气象学 报,2020,78(2):277-288.
- [11] 刘伟,孙玉稳,谢祥永,等.河北省冬季低槽冷锋层状云
 结构特征和可播性分析 [J]. 气象与环境学报,2021,37
 (3):110-116.
- [12] DONG X B,ZHAO C F,HUANG Z C, et al.Increase of precipitation by cloud seeding observed from a case study in November 2020 over Shijiazhuang, China [J]. Atmospheric Research, 2021, 262(5):105766.
- [13] BESSHO K, DATE K, HAYASHI M, et al. An introduction

to Himawari-8/9—Japan's new-generation geostationary meteorological satellites[J].Journal of the Meteorological Society of Japan.Ser II,2016,94(2):151-183.

- [14] SHE L, XUE Y, YANG X, et al.Dust detection and intensity estimation using Himawari-8/AHI observation[J]. Remote Sensing, 2018, 10(4):490.
- [15] SHIMIZU A.Introduction to Himawari-8 RGB composite imagery[J].Meteorological Satellite Center Technical Note, 2020,65:42.
- [16] 蔡森,欧建军,周毓荃,等.L 波段探空判别云区方法的 研究[J].大气科学,2014,38(2):213-222.
- [17] KING W D, PARKIN D A, HANDSWORTH R J.A Hot-Wire Liquid Water Device Having Fully Calculable Response Characteristics [J]. Journal of Applied Meteorology, 2010, 17(12):1809–1813.
- [18] 康增妹,孙玉稳,董晓波,等.一次冬季层状云的人工催 化效果响应分析[J].高原气象,2020,39(3:)620-627.

Comparative Analysis of Microphysical Structure of Snowfall Cloud System in Central and Southern Hebei Based on Aircraft Observation

FU Jiao, ZHANG Dan, DONG Xiaobo, ZHANG Jiannan, WANG Shuyi, HOU Shaoyu, XUE Xuewu, LI Zhenghao

(Hebei Provincal Weather Modification Center, Shijiazhuang 050021, China)

Abstract A low trough snowfall weather system appeared in Hebei province On February 21st, 2017. The Hebei Provincal Weather Modification Office carried out aircraft cloud microphysical detection in the stratiform cloud system in front of the system trough. Through the fine detection and analysis of the cloud microphysical vertical structure in Xingtai and Zhaoxian, it was found that the cloud system in this process was stratiform cold cloud. There were obvious inversion layers in the cloud systems of Xingtai and Zhaoxian. The supercooled water appeared in and below the inversion layer. The supercooled water was relatively abundant in Xingtai amounting to 0.19 g/m³. Ice rime crystals could be seen below the abundant layer of the supercooled water (height ranged from 4 561 to 5 059 m, temperature ranged from -11 to -8 °C). The diameter increased, but the concentration did not increase significantly. The content of supercooled water in Zhaoxian was 0.074 g/m³, which was lower than that in Xingtai.In the super cooled water region (height ranged from 3 308 to 3 949 m, temperature ranged from -10.3 to -8.7 °C), the ice crystals grew mainly by riming and adhesion. The ice crystal aggregates were more than that in Xingtai, and the particle diameter and concentration were larger than that in Xingtai.During this detection process, the supercooled water in Xingtai cloud was abundant and had the conditions for artificial snow enhancement. The content of supercooled water in Zhaoxian was low, and the conditions of artificial snow enhancement was poor.

Key words stratiform cloud; vertical detection; cloud microphysical structure; supercooled water