

孟宪罗^{1,2} 汤达章¹ 郭金平³ 裴宇杰⁴ 赵娜⁵ 秦彦硕³ 段宇辉⁴ 赵利品³

一次冷锋云系的宏微观物理特征分析

摘要

利用常规气象资料、自动站资料、卫星云图、CINRAD-SA 多普勒天气雷达资料以及 NCEP 再分析资料,结合飞行探测数据,对影响 2011 年 4 月 17 日河北抚宁县森林大火的一次冷锋云系进行分析.结果表明:1)宏观分析,过程降水的水汽仅来自冷锋自身所携带的微弱水汽,水汽辐合值较小,不利降水;2)微观分析,冷锋层状云系在水平和垂直方向上存在较薄的过冷水云区,小粒子数浓度大于 20 cm^{-3} 的云区占一定比例.飞机催化作业后,雷达回波强度增强,CAS(云气溶胶粒子探头)探测的小粒子数浓度、云含水量及粒子平均直径均有明显变化,说明该次冷锋云系有一定的增雨潜力.

关键词

冷锋;层状云;增雨潜力;过冷水

中图分类号 P481

文献标志码 A

收稿日期 2013-12-10

资助项目 河北省科技厅项目(11277107D)

作者简介

孟宪罗,男,工程师,主要从事大气探测、装备保障技术研究.mengxianluo@qq.com

- 1 南京信息工程大学 大气科学学院,南京,210044
- 2 河北省气象技术装备中心,石家庄,050021
- 3 河北省人工影响天气办公室,石家庄,050021
- 4 河北省气象台,石家庄,050021
- 5 河北省气象服务中心,石家庄,050021

0 引言

人工降水的可播度(潜力)是指对即将作业的云系进行作业可能性大小的判断,从微物理角度考虑就是由云系中云滴和冰晶的数密度来确定是否对该云层进行作业^[1].詹丽珊等^[2]对锋面天气的层积云或积云性层积云的底部或下部云滴的细致观测分析表明,云中微结构存在起伏,在平均含水量相同时,起伏量大的谱较宽.由此看来,微物理量的起伏有利于云滴增长.近年来,云物理学者通过对大量的云降水系统综合探测资料研究,获得很多有意义的结果^[3-12].游来光等^[13]对新疆冬季降雪云的观测分析表明:冷锋锋面上云区完全由冰晶组成,有降雪云发展,初生冰晶在 $-25 \sim -30 \text{ }^\circ\text{C}$ 环境生成;锋区有一干层,存在上层下掉的质粒.冯圆等^[14]、李淑日等^[15]对河南春季一次冷锋降水过程云的微物理结构进行分析得到,冷锋降水云云体有明显分层结构,上层为分布不均、处于不同发展阶段的锋上透光高积云云系,下层为较薄的锋下层积云云系,两层云之间夹有干层.为了提高人工催化的效果和成功率,需要通过观测来了解当地不同天气系统影响下形成的降水云系结构和降水的潜力,以便更好地选择催化作业时机和最佳作业部位,有针对性地开展人工增雨作业.

2011 年 4 月 12—17 日河北抚宁发生森林大火.17 日,河北省人工影响天气办公室组织京津冀联合对一次冷锋天气过程实施了人工增雨作业,飞行作业 2 架次,共计作业 22 根烟条(本文取第 1 架次飞行的观测资料对该冷锋云系进行微观分析),火场及附近区域普降小雨.降水后,火场区域温度降低、湿度增加,为扑灭火火创造了较好条件.本文利用常规气象资料,自动站、卫星云图、CINRAD-SA 多普勒天气雷达、NCEP 资料,并结合飞机云中探测数据,分析了该冷锋云系(层状云)的宏微观物理特征,说明本冷锋云系有一定的增雨潜力.

1 天气和飞行概况

1.1 天气系统

在降水开始前,2011 年 4 月 16 日 20 时(本文时间均为北京时间)500 hPa 图(图略)上,欧亚上空为快速移动的一脊两槽(W)型,脊线位于 90°E 附近,低槽分别位于 60°E 和 135°E 附近,东亚大槽不断分裂短波小槽沿脊前 NW 气流快速东移下滑.本次过程影响系统为东亚大槽后部 NW 气流中东移下滑的短波小槽,16 日 20 时—17 日 08 时

位于内蒙东北部到呼和浩特一线的槽线经过河北东北部地区(火场上空),并伴有冷温槽.在同一时间的700和850 hPa图(图略)上,低槽位置随高度降低逐一向前倾斜,700 hPa温度槽明显落后高度槽,冷平流明显,850 hPa在内蒙东北部地区切断一低涡,槽线进入河北张家口地区,在其低槽前部伴有一西南低空急流,急流中心风速最大达18 m/s,河北区域温度露点差均为18~32℃,槽线附近水汽条件甚差,系统垂直结构为后倾,层结较为稳定,云系为稳定的层状云.因为系统移动速度较快,降水持续时间短,因此过程降水量偏小.与槽线对应的地面图上是一冷锋,由图1可清晰地看到冷锋云系由2条云带构成.01:00(图1a),当冷锋抵达河北时,冷锋前部云带没有降水产生,与锋区和地面冷锋对应第2条云带出现了弱降水.05:00—07:00(图1b—1d),当第2条云带到达火场上空时,北京运12飞机于05:32从唐山机场起飞抵达火场上空,进行了长达2 h 34 min的人工催化作业飞行.

1.2 降水实况

2011年4月17日00时—17日08时,河北北部和东北部地区为小雨,其中最大雨量为2.7 mm(催化作业后的降水,自动站雨量).当冷锋00:10到达河北张家口时,降水开始形成,冷锋附近最大降水量为2.1 mm(张家口康保).随着冷锋东移,降水量逐渐减小,在冷锋经过河北承德地区时,最大降水量仅为0.2 mm(承德石灰窑),且降水站数明显减少,承德地区仅有4个测站的降水.04:06冷锋前沿抵达秦皇岛北部,冷锋以25 km/h的速度继续向东南方向移动,05:42冷锋到达雷达中心测站,05:51飞机开始第1次增雨催化作业后地面出现了降水.从05:00—08:00的雨量统计得知,冷锋在经过秦皇岛境内时雨量有了明显增幅,最大达2.7 mm,且有21个自动站雨量超过1.0 mm.火场上空由于蒸发量大而导致降水不大,降水仅为0.1~0.5 mm,雨量超过1.0 mm的测站均位于火场下风方.

1.3 水汽分析

图2给出的是2011年4月16日20时—17日08时850 hPa的水汽通量散度和UV风场.从图2a中可看到,冷锋前虽然SW风很大,但没有明显的水汽辐合,因此对应冷锋前的第1条云带没有降水产生,而位于冷锋后部的带状水汽通量散度辐合中心为 $-2 \times 10^{-4} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$,正好与第2条云带相叠加,但辐合中心值太小,不利于降水产生,冷锋

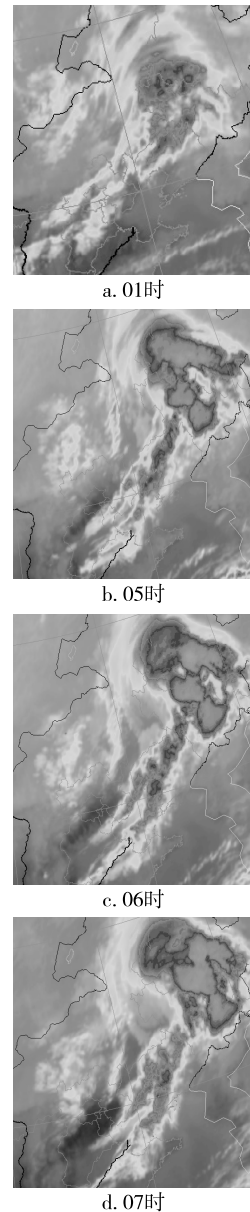


图1 2011年4月17日卫星云图
Fig. 1 Satellite cloud image on April 17, 2011

附近最大降水量为2.1 mm(张家口康保).17日02时(图2b)随着冷锋向东南方向移动,水汽通量散度的中心已经向北抽移至辽宁境内,河北境内与冷锋相伴随的水汽通量散度辐合面积虽有扩大,但辐合中心强度仅为 $-1 \times 10^{-4} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$,同样对降水产生不利,因此该时段的冷锋附近降水也随之减小,最大仅为0.2 mm(承德石灰窑),站数减少为4个,且均为微弱降水.冷锋云系05:12抵达火场境内边缘,05:51飞机开始实施催化作业,作业后的周边地区普降小雨,最大雨量达2.7 mm.17日08时(图2c)冷锋移出河北,与冷锋相伴随的水汽通量散

度逐渐减小,并转为辐散,降水结束.

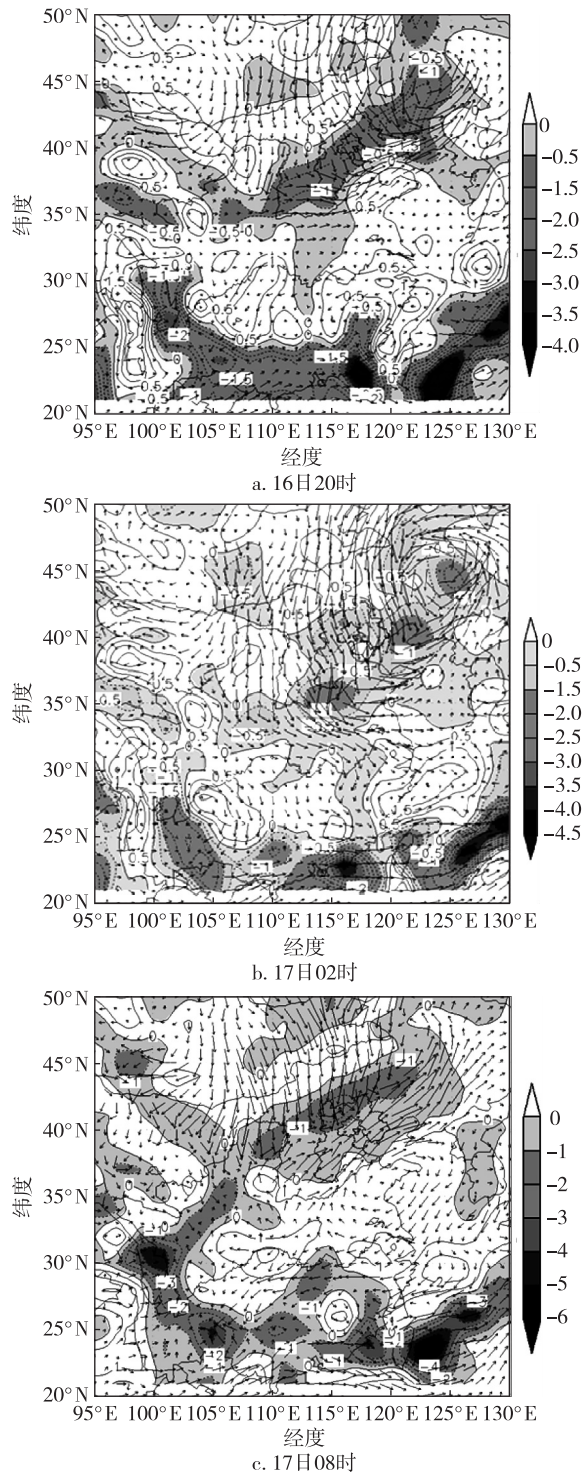


图2 2011年4月16—17日850 hPa的水汽通量散度和风场
(单位: $g \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1} \cdot hPa^{-1}$)

Fig. 2 Vapor flux divergences and wind field
of 850 hPa from April 16 to 17, 2011
(units in $g \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1} \cdot hPa^{-1}$)

从水汽条件分析可得到,过程降水的水汽源仅

来自冷锋自身所携带的微弱水汽,虽然低槽前部伴有中心为18 m/s西南低空急流,但低空急流所在纬度偏北(36°N以北),没有低纬水汽的供应致使降水量不大.

1.4 雷达回波分析

本文雷达应用秦皇岛CINRAD-SA雷达,位于秦皇岛卢龙县(天线经纬度:118.8°E,39.8°N,海拔高度114.1 m),作业区距雷达中心为37 km.

催化作业前的雷达回波特征:在雷达图(图3)(仰角1.5°)上显示,05:12(图3a(PPI))与冷锋相伴的云带呈东北—西南向,云带两头的云强度强于中间,最大回波强度达25 dBZ,在RHI反射率因子图(图3b)上最大回波强度达35 dBZ,位于2 km高度附近,对应地面自动站雨量此时已出现了0.1 mm(安各庄)的降水,在同一时间的PPI径向速度图(图3c)上,零速度线呈“Z”形结构,也就是说锋面北部移速比南部移速要慢一些,冷锋前为西南风,冷锋后为西北风,锋面距离雷达中心位置20 km.RHI径向速度图(图3d,剖面方向与云带走向一致,同时与火场也近乎平行(图中的粉色和白色线))上,锋后3~6 km高度上的NW风 ≥ 27 m/s,并出现了速度模糊(没有退模糊处理),与PPI径向速度图上的速度模糊相对应,并且3 km高度以下的SW风速也明显存在风速辐合.

催化作业后的雷达回波特征:飞机05:32从唐山机场起飞,05:51入云并开始了第1次增雨作业,作业云为层状云,作业高度3 600 m,温度-6 °C.05:57飞机飞到火场上空(119.27°E,40.02°N)并进行第2次催化作业,作业高度3 600 m,温度-7 °C.06:09飞机在(119.21°E,40°N)上空再次催化作业,作业高度3 600 m,温度-8 °C.06:12(图3e(PPI))作业后的云体发生了很大变化,最大回波强度由25 dBZ增加为35 dBZ.RHI反射率因子图(图3f)上,强度有了明显增强,最大回波强度由35 dBZ增强到45 dBZ,30 dBZ的范围明显扩大(雷达测站东侧从底层到4 km高度),此时地面自动站抚宁站和驻操营站分别出现1.3和1.5 mm的降水(火场正置两地之间),作业播撒时间及位置、降水情况如表1所示.在同一时间PPI径向速度图(图3g)上可看到冷锋已移过雷达测站,零速度线由“Z”形结构变成“L”形.由PPI径向速度图(05:42)可知,05:42冷锋正在经过雷达中心,零速度线“Z”北部的折角正在变小,而位于雷达中心的折角变大而清晰(图中箭头

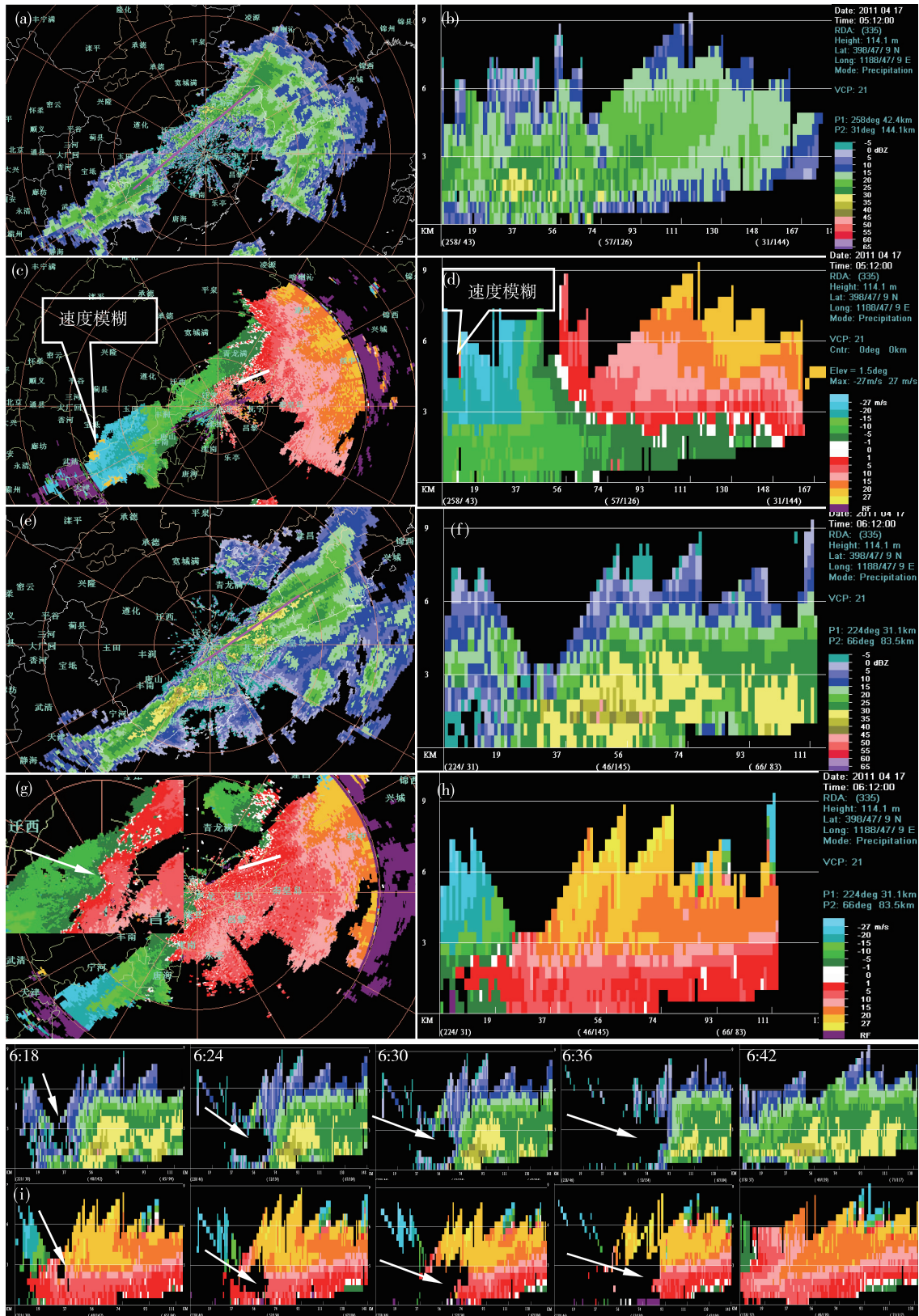


图3 2011年4月17日05:12—06:12秦皇岛CINRAD-SA雷达反射率因子、径向速度PPI、RHI
(粉色线为雷达垂直剖面位置,白色线为火场位置)

Fig. 3 The reflectivity, radial velocity map, and RHI of Qinhuangdao CINRAD-SA radar from 05:12 to 06:12 on April 17, 2011
(Pink lines show the radar vertical profile location, and white lines show the fire position)

表 1 飞机第 1 架次作业播撒时间及位置、降水情况

Table 1 Characteristics of first seeding for precipitation enhancement

作业时间	播撒位置(经度/纬度)	烟条/根	温度/℃	高度/m
05:51	118.78°E/39.94°N	2	-6	3 600
05:57	119.27°E/40.02°N	2	-7	3 600
06:09	119.21°E/40.00°N	2	-8	3 600
06:26	119.29°E/39.78°N	2	-5	3 200
06:39	119.50°E/39.90°N	2	-6	3 600
07:13	119.27°E/40.02°N	2	-7	3 000
07:23	119.41°E/39.98°N	1	-5	2 700

主要降水时段		
站名	降水时段	降水量/mm
抚宁县	06:10—06:35	1.4
驻操营	06:10—06:31	1.3

说明:飞机作业时间段的云状均为层状云

所指).RHI 径向速度图(图 3h)上,雷达测站东侧原位于 3 km 以下的负速度区转为正速度区,即 SW 风转为 NW 风,在 3 km 以上的正速度区较前一时次也有明显增大,最大风速超过了 27 m/s,同时也出现了正速度模糊区,雷达测站西侧的低层(3 km 以下)转为 NW 风,3 km 高度以上的 NW 风逐渐减小.

由图 3i 可看到,从 06:18 开始,火场上空(剖面)由于地面大火长时间燃烧而使蒸发加大,湿度下降,云粒子减少,导致火场上空出现一空洞,空洞于

06:36 达最大,持续至 06:42 消失.

由雷达回波顶高得知,冷锋云系的云顶高度在 5~7 km 之间,云中镶嵌着个别点云顶高度达 7 km.由垂直积分液态含水量的分布分析,冷锋云系所带液态含水量仅为 1 kg/m²,催化作业前垂直积分液态含水量的分布变化走向与冷锋云带一致呈星点状(图略),范围很小,当催化作业后垂直积分液态含水量由点状变成片状,其范围明显加大,强度没有变化,仍为 1 kg/m².

1.5 观测仪器和飞行情况

飞机装有美国 DMT 公司生产的粒子测量系统,可获取云滴、大粒子和降水粒子的大小、浓度和二维图像资料,还可同时采集温度、空速、高度等数据.云气溶胶粒子探头 CAS 测量范围为 0.6~50 μm,二维冰晶粒子探头 CIP 测量范围为 25~1 550 μm,二维降水粒子探头 PIP 测量范围为 100~6 200 μm.

飞机于 05:32 从唐山机场起飞,根据云层情况向火场上空飞行作业,作业时间从 05:51 开始到 07:23 结束,08:06 返回唐山机场,历时 2 h 34 min.飞机第 1 架次飞行航迹及飞行高度如图 4 所示.

2 云的微物理分析

2.1 云特征量的垂直分布

Hobbs 等^[16]提出,利用 FSSP-100 探头观测到云

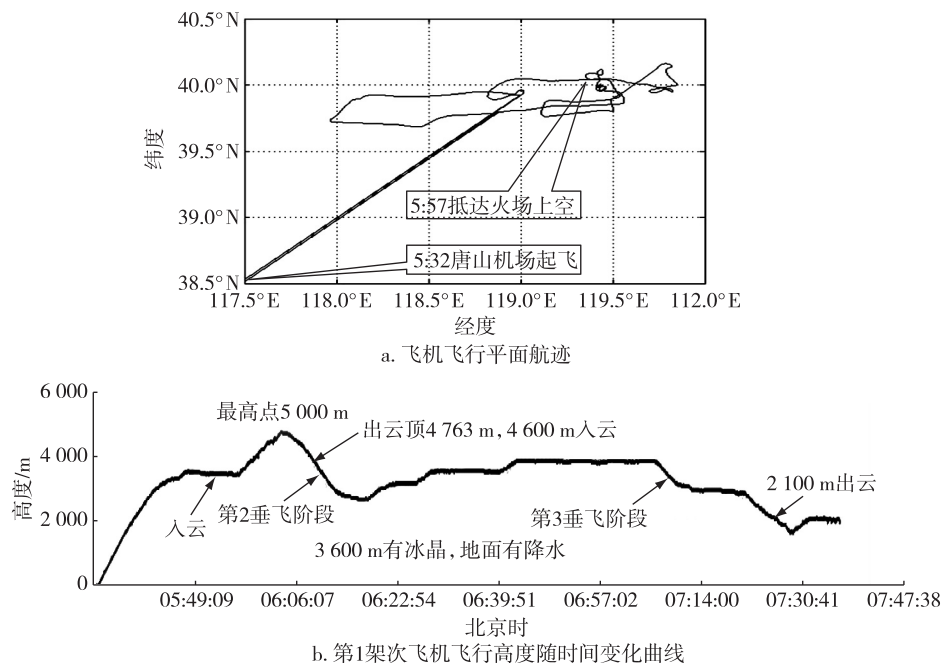


图 4 飞机飞行平面航迹及高度随时间变化曲线

Fig. 4 Flight path, and flight altitude variation with time

中直径 $>2\ \mu\text{m}$ 的粒子数总浓度超过 $10\ \text{cm}^{-3}$ 可看作云水区. CAS探测范围与 FSSP-100 探头探测范围相近,具有可比性,因此,本文参考上述指标,在处理云滴资料时取云粒子数总浓度超过 $10\ \text{cm}^{-3}$ 时为云水区.

本次飞行垂直探测有3个时段,由图4b得到,第1时段是飞机从地面上升到4800 m高度,飞机从唐山机场起飞,飞行时间05:32—06:04,飞机在4763 m出云顶(飞行宏观记录),第2时段是飞机从5000 m下降到2670 m,飞行时间06:04—06:14,第3时段是飞机从3930 m下降到1850 m,飞行时间07:07—07:28,该时段飞机有一平飞过程.考虑到第1时段水平范围较大,有可能是不同云体的特性,不能够进行平均,舍弃不用,本文分析的云特征量的垂直分布为第2、第3时段的垂直资料.

由图5a看出,4800~2670 m下降时段整层温度在 $0\ ^\circ\text{C}$ 以下,小粒子数浓度和云粒子平均直径随

高度变化不大,平均小粒子数浓度 $30.5\ \text{cm}^{-3}$,粒子平均直径 $15.9\ \mu\text{m}$,含水量值随高度有一定起伏变化,3300~3800 m和4100~4250 m区间分别有2个含水量高值区,最高值达 $0.81\ \text{g/m}^3$,在4500~4650 m之间小粒子数浓度、粒子平均直径和含水量有一低值区,接近干层.另外,在2800和3400 m附近存在较薄的小粒子数浓度高值区,相对应的粒子平均直径较小,根据含水量的变化结合二维图像资料分析,此处应为过冷水水区.图5b(3930~1650 m下降时段)可看出, $0\ ^\circ\text{C}$ 高度为1670 m左右,1650~3000 m(飞机未探测到云底)为Sc(蔽光层积云),云中各物理参数随高度有起伏变化.3000~3500 m之间小粒子数浓度最高值 $9.87\ \text{cm}^{-3}$,平均值 $1.36\ \text{cm}^{-3}$,依据前面的判别指标可以确定3500 m以上为As(蔽光高层云),小粒子数浓度、粒子平均直径随高度有增加趋势.

由以上分析可得,时段不同,同一粒子探头探测

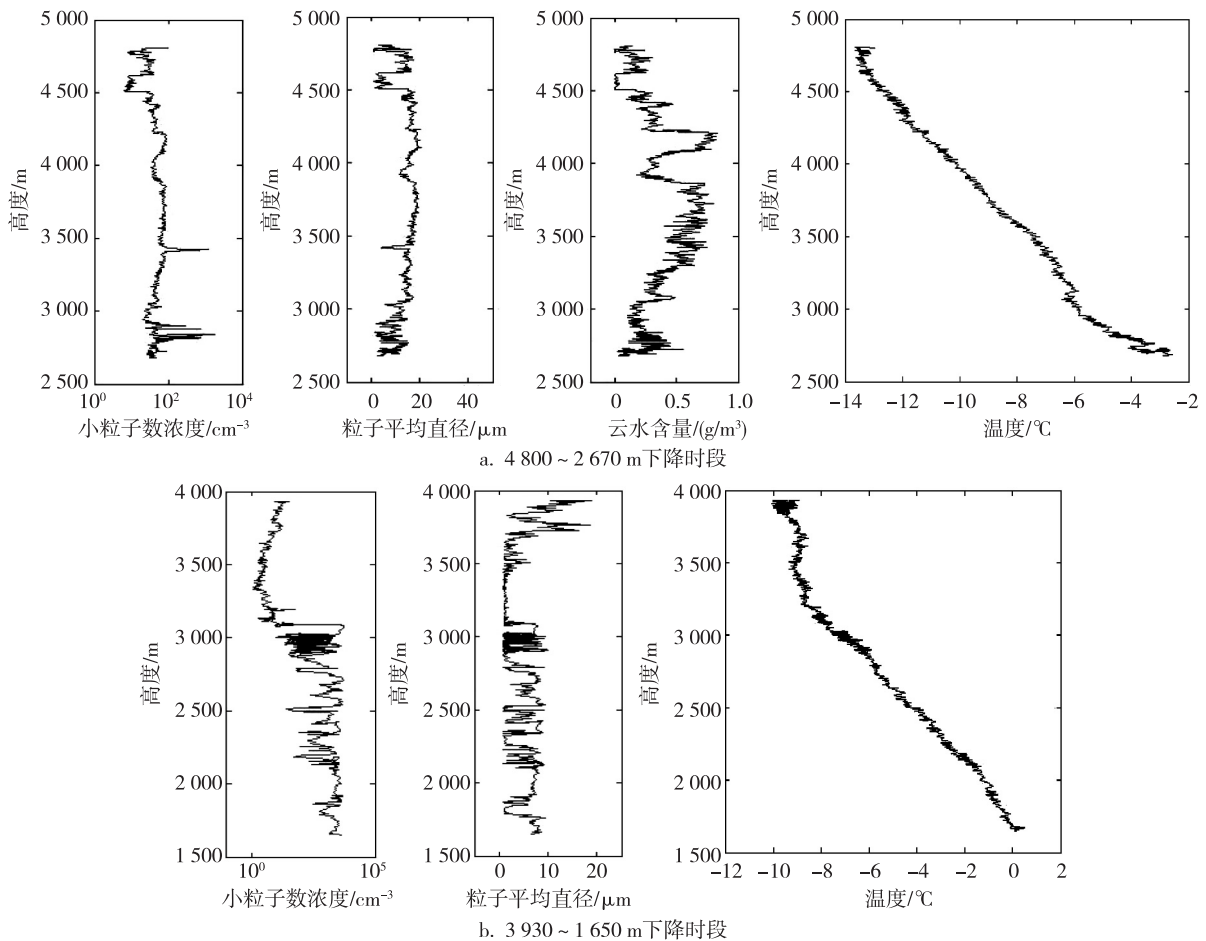


图5 飞机不同时段 CAS 探测的微物理参数垂直分布

Fig. 5 Vertical distributions of micro-scale physical parameters detected by CAS during 4800—2670 m and 3930—1650 descending period

的同一微物理参数随高度变化差异较大,说明云体在水平垂直方向上分布不均.同时可以推测,本次过程的层状云结构分为2层,上部有一层约1 300 m厚的中云,下部有一层约1 500 m厚的低云,两者之间的部位夹有干层. As底高3 500 m,飞机最高达5 000 m, Sc云底约1 500 m(地面观测),云顶高3 000 m,干层厚度约500 m,垂直方向上存在较薄的过冷水云区.

2.2 云微物理的水平分布特征

图6、7为飞机在3 850 m水平飞行时段云微物理特征量水平分布情况.该层的温度为 -8.5°C ,该时段CAS探测的粒子数浓度高值区有3个,最大粒子数浓度值高达 $1\ 734\ \text{cm}^{-3}$,除去3个高粒子浓度区,其他时段平均粒子数浓度为 $62\ \text{cm}^{-3}$.云中液态水含量丰富,最大值为 $1.3\ \text{g/m}^3$,平均值 $0.72\ \text{g/m}^3$.还可看出,云水含量随时间有明显的起伏性变化,云粒子数浓度和云粒子平均直径反相关性对应较好,粒子数浓度高值区的水平尺度一般在数百米到1 km(飞行时间数秒到数十秒).

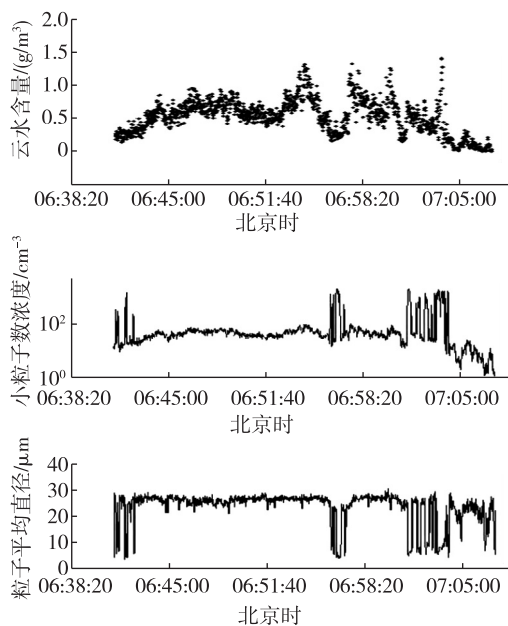


图6 飞机水平飞行阶段CAS探测的云水含量、小粒子数浓度、平均直径

Fig. 6 LWC of cloud particles, concentration of cloud particles, mean diameter of particles detected by CAS during horizontal flying

为了分析形成原因,对水平飞行资料分时段作了谱分布(图8).由图8可看出,粒子数浓度高值区谱型为多峰型,主峰值位于 $6\ \mu\text{m}$ 处,大于 $10\ \mu\text{m}$ 粒

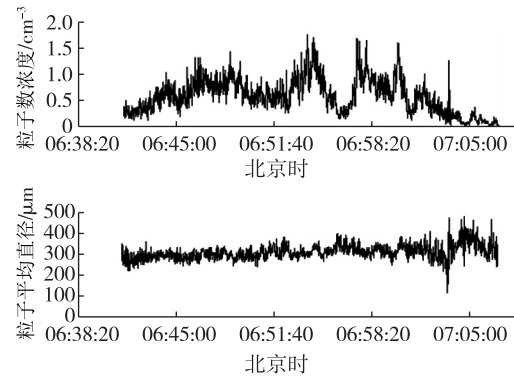


图7 飞机水平飞行阶段CIP探测的粒子数浓度、平均直径
Fig. 7 Particle concentration and mean diameter of particles obtained by CIP during horizontal flying

子占很少比例.另外由图6、7水平资料看出,在同一时间小粒子数浓度高值区对应的云水含量出现低值,对应的CIP探测粒子数浓度均为低值,综合考虑认为水平飞行中出现的粒子数浓度高值区也许是云的边界区,小尺度高数量的粒子可能大多为气溶胶粒子.在粒子数浓度低值区谱型为双峰型,主峰值位于 $20\sim 25\ \mu\text{m}$ 处,其他尺度粒子占比例较小.综合分析图6、7中的云水含量、CIP资料及水平飞行阶段二维图象资料得出,粒子数浓度低值区可能为混合态云区.飞机于06:39和06:58分别在3 600和3 900 m作业,作业时温度分别为 -6 和 -8.9°C ,每次作业2根烟条.06:58宏观记录显示云中有大冰晶下落,飞机有轻微颠簸.从图6中可看出,飞机作业2~3 min后,CAS探测的小粒子数浓度、云含水量及粒子平均直径有明显变化,CIP探测的粒子数浓度变小,粒子平均直径变化不大.

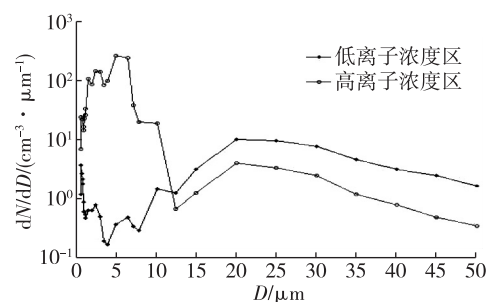


图8 飞机水平飞行不同时段谱分布
Fig. 8 Particle size distribution at different period during horizontal flying

2.3 层状冷云催化可播性分析

陶树旺等^[17]研究提出了利用飞机云物理观测

识别云可播条件的方法认为, 在冰晶粒子浓度低、含水量高的区域播撒催化剂, 可以产生大量冰晶, 从而启动或加速降水过程发展, 并且当 FSSP 探测的粒子数浓度 $N_1 \geq 20 \text{ cm}^{-3}$ 的云区才具有一定的可播性, 其中 2D-C 探测的大粒子数浓度 $N_2 < 20 \text{ L}^{-1}$ 时, 可确定为强可播区, 否则为可播区. 参考此判别指标, 对 2011 年 4 月 17 日飞机在温度低于 $0 \text{ }^\circ\text{C}$ 云区中飞行时探测的微物理资料 (图 9) 进行可播性分析. 其中 N_1 为 CAS 探头探测的云中小粒子数浓度, N_2 为 2D-C 探头探测的云中大粒子数浓度. 可看出 N_1 大于 20 cm^{-3} 的云区占有一定比例, 因此, 本过程作业云具有一定的可播性.

在分析水平飞行二维图像资料 (图 10) 时发现, 雪粒子有凇附特征, 雪晶的形态以雪晶攀附成的雪团为主, 同时还有带冻滴的枝星状和霰粒子状, 从而可以推测, 飞行高度以上有过冷水存在. 因此, 为更好利用降水资源, 在飞机性能条件允许的情况下, 飞行作业高度还可适当提高.

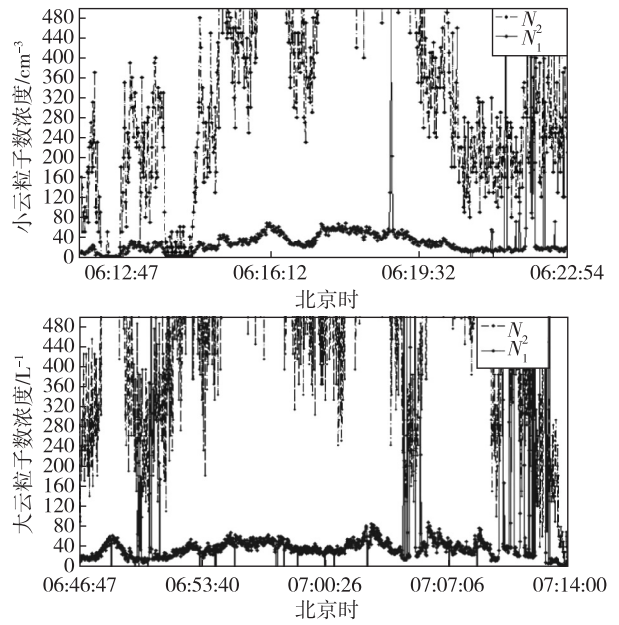


图 9 飞行过程中小云粒子数浓度 N_1 和大云粒子数浓度 N_2 随时间分布

Fig. 9 Distribution of the detected N_1 and N_2 during flight

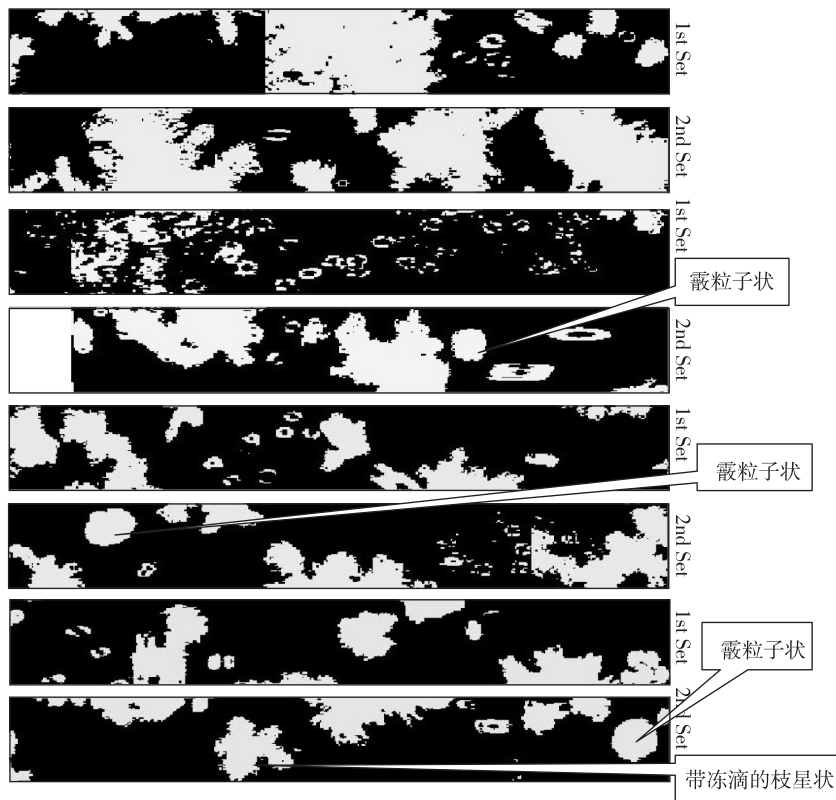


图 10 飞机水平飞行中 (06:57:30—06:58:20) 部分时段二维图像显示
Fig. 10 2D image display during horizontal flying (06:57:30—06:58:20)

3 小结

1) 此次飞行过程主要受东亚大槽后部 NW 气流中东移下滑冷空气影响,地面为一冷锋,降水过程的水汽仅来自冷锋自身所携带的微弱水汽,没有低纬暖湿水汽的输送,导致降水量不大。

2) 本次冷锋云系较弱,过冷水云区较薄,且云层中间夹有干层,火场上空近地面蒸发量大,诸多不利自然降水因素存在。飞机催化作业后,雷达回波强度增强,CAS 探测的小粒子数浓度、云含水量及粒子平均直径均有明显变化,说明本次冷锋云系有一定的增雨潜力。

3) 冷锋层状云系在水平和垂直方向上存在较薄的过冷水云区,小粒子数浓度大于 20 cm^{-3} 的云区占一定比例,说明本过程作业云具有一定可播性。

4) 从飞机水平飞行二维图像资料分析得出,如果飞行高度在飞机性能等条件允许的情况下,飞行作业高度适当抬高,更有利于增雨效果的提升。

参考文献

References

- [1] 刘健,李茂仑,蒋彤,等.吉林省春季降水性层状云基本结构及降水潜力的初步研究[J].气象科学,2005,25(6):609-616
LIU Jian, LI Maolun, JIANG Tong, et al. The preliminary study of the basic structure of precipitating stratus and precipitation potential in spring in Jilin province [J]. Scientia Meteorologica Sinica, 2005, 25(6): 609-616
- [2] 詹丽珊,陈万奎,黄美元.岳阳和泰山云中微结构起伏资料的初步分析[M]//我国云雾降水微物理特征的研究.北京:科学出版社,1965:30-40
ZHAN Lishan, CHEN Wankui, HUANG Meiyuan. Preliminary analysis of Yueyang and Taishan cloud micro structure fluctuation data [M] // Microphysical characteristics of cloud and precipitation in China. Beijing: Science Press, 1965: 30-40
- [3] Heymsfield A J. Precipitation development in stratiform ice clouds: A microphysical and dynamical study [J]. J Atmos Sci, 1977, 34(2): 367-381
- [4] Orville H D, Farley R D, Hirsch J H. Some surprising results from simulated seeding of stratiform-type clouds [J]. J Climate Appl Meteor, 1984, 23: 1585-1600
- [5] 王以琳,赵增亮.黄淮气旋与山东飞机人工增雨[J].气象,1994,20(12):42-45
WANG Yilin, ZHAO Zengliang. Huang-Huai cyclone and artificial precipitation in Shandong [J]. Meteorological Monthly, 1994, 20(12): 42-45
- [6] 段英,吴志会,石立新.飞机人工降水作业云可播性条件的观测研究[M]//游景炎,段英,游来光.云降水物理和人工增雨技术研究.北京:气象出版社,1994:155-163
DUAN Ying, WU Zhihui, SHI Lixin. Observational study of cloud seedability for artificial precipitation operation by airplane [M] // YOU Jingyan, DUAN Ying, YOU Laiguang. Cloud physics and artificial precipitation technology. Beijing: China Meteorological Press, 1994: 155-163
- [7] 唐林,王治平,丁岳强,等.湖南省柘溪水库流域空中水汽资源特征及人工增雨潜力[J].气象,2006,32(5):29-34
TANG Lin, WANG Zhiping, DING Yueqiang, et al. Water vapor resource and potentiality of increasing rain artificially in Zhexi Reservoir and its drainage area of Hunan province [J]. Meteorological Monthly, 2006, 32(5): 29-34
- [8] 王以琳,刘文,王广河.冷云人工增雨催化区的探空判据[J].气象学报,2002,60(1):116-121
WANG Yilin, LIU Wen, WANG Guanghe. Sounding criterion of cold cloud catalysis [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2002, 60(1): 116-121
- [9] 龚佃利,边道相.山东省飞机增雨天气系统云水资源转化特征分析[J].气象,2002,28(8):15-19
GONG Dianli, BIAN Daoxiang. The characteristics of cloud and water resources and its transform about synoptic system suitable for precipitation enhancement in Shandong province [J]. Meteorological Monthly, 2002, 28(8): 15-19
- [10] 辛乐,姚展予.一次积层混合云飞机播云对云微物理过程影响效应的分析[J].气象,2011,37(2):194-202
XIN Le, YAO Zhanyu. Studies on the microphysical characteristics of an aircraft seeding in convective line with trailing stratiform cloud [J]. Meteorological Monthly, 2011, 37(2): 194-202
- [11] 张晰莹,金凤岭.卫星云图、雷达回波在人工增雨时机选择中的应用[J].气象,2003,29(8):78-85
ZHANG Xiying, JIN Fengling. The application of satellite images and radar echo to the choice of precipitation enhancement [J]. Meteorological Monthly, 2003, 29(8): 78-85
- [12] 迟竹萍,陈金敏,朱平盛.利用数字化雷达回波参数分析人工增雨播云条件[J].气象,2001,27(4):65-72
CHI Zhuping, CHEN Jinmin, ZHU Pingsheng. An analysis of the seeding conditions by using 711-type digitized radar echo parameters [J]. Meteorological Monthly, 2001, 27(4): 65-72
- [13] 游来光,王守荣,王鼎丰,等.新疆冬季降雪微结构及其增长过程的初步研究[J].气象学报,1989,47(1):73-81
YOU Laiguang, WANG Shourong, WANG Dingfeng, et al. The microphysical structures of snow cloud and the growth process of snow in winter in Xinjiang [J]. Acta Meteorologica Sinica, 1989, 47(1): 73-81
- [14] 冯圆,濮江平,赵斌华,等.河南春季一次冷锋降水过程的云物理结构分析[J].解放军理工大学学报:自然科学版,2005,6(6):591-597
FENG Yuan, PU Jiangping, ZHAO Binhua, et al. Microphysical characteristics of a precipitation progress in Henan province [J]. Journal of PLA University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2005, 6(6):

- 591-597
- [15] 李淑日,王广河,刘卫国.降水性层状云微物理结构个例分析[J].气象,2001,27(11):17-21
LI Shuri, WANG Guanghe, LIU Weiguo. A case study of micro-structure of precipitable stratiform clouds [J]. Meteorological Monthly, 2001, 27(11): 17-21
- [16] Hobbs P V, Rangno A L. Ice particle concentrations in clouds [J]. J Atmos Sci, 1985, 42(23): 2523-2549
- [17] 陶树旺,刘卫国,李念童,等.层状冷云人工增雨可播性实时识别技术研究[J].应用气象学报,2001,12(增刊1):14-22
TAO Shuwang, LIU Weiguo, LI Niantong, et al. A study of real-time identification of seedability of cold stratiform clouds [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology, 2001, 12(sup1): 14-22

Analysis of macro-scale and micro-scale characteristics of a cold-front cloud

MENG Xianluo^{1,2} TANG Dazhang¹ GUO Jinping³ PEI Yujie⁴
ZHAO Na⁵ QIN Yanshuo³ DUAN Yuhui⁴ ZHAO Lipin³

1 School of Atmospheric Science, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

2 Hebei Meteorological Equipment Center, Shijiazhuang 050021

3 Weather Modification Office of Hebei Province, Shijiazhuang 050021

4 Hebei Meteorological Observatory, Shijiazhuang 050021

5 Hebei Meteorological Service Center, Shijiazhuang 050021

Abstract The characteristics of a cold-front cloud during the forest fire on April 17, 2011 in Funing county of Hebei province, were analyzed at macro and micro scale. Meteorological data of conventional observations, satellite cloud image, Doppler weather Radar data, aircraft observation, and the NCEP reanalysis data were used to analyze the precipitation enhancement potential of this cold-front cloud. Macroanalysis shows that the water vapor carried by the cold-front cloud is the only source of the artificial precipitation enhancement, which is small in moisture convergence thus not favorable for precipitation. Microanalysis shows that relatively thin supercooled water area exists in both horizontal and vertical direction of the cold-front stratiform cloud system, with certain proportion of small particle concentration $>20 \text{ cm}^{-3}$ in size. After the seeding operation, the radar echo intensity is enhanced, parameters of the particle concentration, LWC and the mean diameter of particles detected by CAS change significantly. Results show that the cold-front cloud has certain precipitation enhancement potential.

Key words cold-front; stratiform cloud; precipitation enhancement potential; super-cooled water