

利用三架飞机联合探测资料分析层积混合云催化物理效应

王元^①,牛生杰^{①②*},雷恒池^③

① 南京信息工程大学 大气物理学院,江苏 南京 210044;

② 江苏省大气环境与气象装备协同创新中心,江苏 南京 210044;

③ 中国科学院大气物理研究所 云降水物理与强风暴重点实验室,北京 100029

* 联系人, E-mail: niusj@nuist.edu.cn

2016-10-12 收稿, 2016-12-09 接受

国家自然科学基金资助项目(41375138); 国家自然科学基金重点项目(41530427)

摘要 利用2009年4月18日三架飞机联合探测层积混合云资料,结合MICAPS再分析资料、雷达、卫星及地面台站资料等,在准确区分自然云区与催化响应区的基础上,对这次降水性层积混合云的微结构和催化物理响应进行了深入研究。结果表明:云上部(4 800 m层,距云顶1 700 m,距云底3 000 m)累积了云中大部分的过冷水,是云内发展强盛区;云上部嵌入式积云区温度低于周围层云区2℃,积云区含水量分布不均,最大值为1.5 g/m³,标准差为0.4 g/m³,而层云区含水量最大值和标准差分别为0.6 g/m³和0.15 g/m³,积云区和层云区的云滴谱峰值直径分别为25 μm和15 μm,云滴数浓度的量级分别为10² cm⁻³和10¹ cm⁻³。对催化云而言,此次联合探测在4 800 m层捕捉到嵌入式积云区的催化响应,人工播撒AgI会促进该层云的消散过程,催化后1 h内云区占比由71%降至13%,云中液态含水量持续减少且趋于均匀分布,催化后10 min与20 min云中含水量的最大值分别为1.0 g/m³和1.5 g/m³,标准差为0.3 g/m³和0.15 g/m³,淞附与聚合增长为主要冰相微物理过程,云滴谱先变窄,后因H-M冰晶淞附繁生而拓宽;在云的中下层则受上层催化影响而产生旺盛云区,10 min内该层云区范围显著扩大,云滴及冰相粒子尺度均增加一倍,同时旺盛云区自上而下扩展。

关键词

三机联合探测;
层积混合云;
云微结构;
催化物理响应

云仍然是一个“黑匣子”,目前对它的认识,在很大程度上还处于定性化认识状态,准确的定量描述仍然十分稀缺(郭学良等,2013)。层积混合云是我国北方主要降水云系,研究其微结构及降水机制为有效实施人工增雨作业提供科学依据(牛生杰,2012)。

张佃国等(2007)和范烨等(2010)均分析北京及周边地区层积混合云特征,得到云内以直径5~9 μm、200 μm和400~1 000 μm的云和降水粒子为主,云中含水量基本处于0.1~0.2 g/m³范围;Zhao and Lei(2014)分析河南地区层积混合云的飞机探测资料发现云滴与冰晶浓度存在反相关关系,并指

出用gamma分布拟合云滴和冰晶谱的优越性,平均决定系数达0.96;李艳伟等(2009a,2009b)深入研究我国西南山区层积混合云,发现对流云为周围层状云不断输送水汽和能量,促使云系不断维持;王慧娟等(2010)及杨文霞等(2005)均发现飞机在降水性层积云中平飞探测时,会因水凝物粒子浓度及粒子谱的变化而发生云内含水量的跃变;杨洁帆等(2010)用一维层状云分档模式模拟吉林省一次降水性层积云,发现三层云(冰晶层、过冷水层和暖层)对降水的贡献分别为3.5%、38.5%和58%;Niu et al.(2009)对中国半干旱高原宁夏地区上空的降水性层积混合云进行深入研究,发现随降水率的增

引用格式:王元,牛生杰,雷恒池,2017.利用三架飞机联合探测资料分析层积混合云催化物理效应[J].大气科学学报,40(5):686-696.

Wang Y, Niu S J, Lei H C, 2017. An examination of the microphysical responses to aircraft seeding of stratiform clouds with embedded convection using the joint observational data of three aircrafts[J]. Trans Atmos Sci, 40(5): 686-696. doi: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20161012002. (in Chinese).

加,层云区雨滴谱逐渐变窄而积云区雨滴谱会拓宽。热带降水计划之一的夸贾林环礁岛试验(KWAJEX)中发现(Yuter et al., 2005; Blossey et al., 2007),热带海洋降水系统均表现为层积混合云的降水特征,对流云区表现为低层辐合、高层辐散,而层云区是中层辐合、上层和下层辐散; Bukovčić et al. (2015)使用二维雨量测量计(2DVD)数据,通过分析雨滴形状、数浓度而区分层云区或积云区降水; Evans et al. (2010)曾指出嵌入式对流单体中液态水含量一般比周围层云高一个量级,在一定上升速度条件下,可以产生更多冰晶,进而增加云系20%~35%的降水量,并在地面形成雨核区。

为了对层积混合云系宏微观结构演变进行同时探测,2009年春季山西省人工影响天气办公室联合中国科学院大气物理研究所对华北地区上空层积混合云系进行六次多机联合探测。张佃国等(2011)曾对此做过统计介绍,并初步分析4月18日个例的云微结构,给出云内水凝物浓度分布,以及云顶部、中间层及底部的滴谱特征;朱士超和郭学良(2014)分析了云中冰晶形状、分布与增长过程,发现冰晶形态受云中位置影响,嵌入式对流区冰晶多呈淞附状;辛乐和姚展予(2011)使用云顶层(4 800 m)飞机探测资料,发现催化后云水量降低一半且趋于平稳分布,降水粒子由催化前 12.6 L^{-1} 增加至 21.1 L^{-1} ;蔡兆鑫等(2013)使用C波段雷达回波资料,通过作业影响区 and 对比区雨量变化率分析催化效果,得出此次雨量增幅为120%~180%;林磊和姚展予(2011)及朱士超和郭学良(2015)均用WRF模式进行模拟,结果表明,WRF模式可以较好地模拟此次云系的雷达回波和降水分布特征,且层积混合云不仅在层云区有“播撒—供给”机制,或在积云区有粒子群的循环增长机制,而且可以发生层云与积云间的粒子群交换。

选择2009年4月18日三机联合探测资料研究层积混合云微结构垂直分布及催化物理效应,在层积混合云上部进行碘化银催化后,分析云上部、中部及下部因催化而产生的微物理效应。

1 资料及催化方法

探测试验是在河北张家口地区开展的,三架飞机分别在不同高度对云系进行探测,朱士超和郭学良(2014)详细介绍了三架探测飞机所使用的主要仪器探头,各探头在探测作业前均进行了系统标定。King-LWC热线含水量仪负责云上部含水量的测

量,云的中下部含水量采用云粒子探头CDP(量程为 $2 \sim 50 \mu\text{m}$)与云气溶胶粒子探头CAS(量程为 $0.6 \sim 50 \mu\text{m}$)测得的云滴谱计算得出。 0°C 高度层之上的云中总含水量包含云水量与云冰量,King-LWC仅观测云中液水含量,而FSSP(前向散射滴谱探头,量程为 $2 \sim 47 \mu\text{m}$)、CDP、CAS等滴谱探头计算得到的含水量为该量程内云水量与云冰量之和。

负责催化作业的夏延3625飞机搭载新型AgI末端燃烧器,汪晓滨等(2006)对其进行详细介绍,它是在BS-1型机载碘化银发生器的基础上进行改进,解决了以往飞机播撒时播撒量不足的问题。此次催化作业地点位于张家口西北侧,作业时间为17:12至18:03(北京时间,下同),作业高度为4 800 m及5 100 m,位于云层的中上部,共有效使用五根碘化银焰条,每根焰条的重量为1 080 g,AgI含量11 g,在 -7.5°C 温度下,成核率可达 10^{15} g^{-1} 。

AgI粒子可作为凝华核,在 $-6^\circ\text{C} \sim -10^\circ\text{C}$ 条件下AgI发生凝华核化形成冰晶,云冰量增加,淞附、聚合及贝吉龙过程会使得云中液态含水量降低。对冷云播撒后液态含水量降低可作为判别催化响应区域的一个指标。

本文所采用的飞机入云判据是:直径在 $2 \sim 50 \mu\text{m}$ 段云粒子总浓度大于等于 10 cm^{-3} ,或者直径大于 $100 \mu\text{m}$ 的粒子总数浓度大于等于 10 L^{-1} 。

2 云系发展及观测概况

2.1 云系发展

对探测当日的天气背景及云系宏观特征已有详细分析(张佃国等,2011;蔡兆鑫等,2013;朱士超和郭学良,2014,2015),卫星云图(图1)显示探测区云系受弱冷锋过境影响呈东北—西南向带状分布,云系长达300 km,宽约30 km,云系自西北向东南移动;张家口站探空资料显示大气温度层结递减率为 6.5 K/km ,条件性不稳定的大气层结利于层云积化;雷达回波上表现为带状回波中镶嵌有明显的强回波区,最大回波强度约50 dBz,比周围云区高10~20 dBz;张家口气象站观测测得当日24 h降水量为6.7 mm。

利用相对湿度阈值法判断云层结构,以相对湿度84%~87%作为阈值判断云层(周毓荃和欧建军,2010)。当温度高于 0°C ,以水面饱和水汽压计算相对湿度,当温度低于 0°C 时,按照冰面饱和水汽压计算相对湿度。如图2所示,张家口站上空云系云顶高度维持在6 500 m,观测云底高度随时间逐渐降

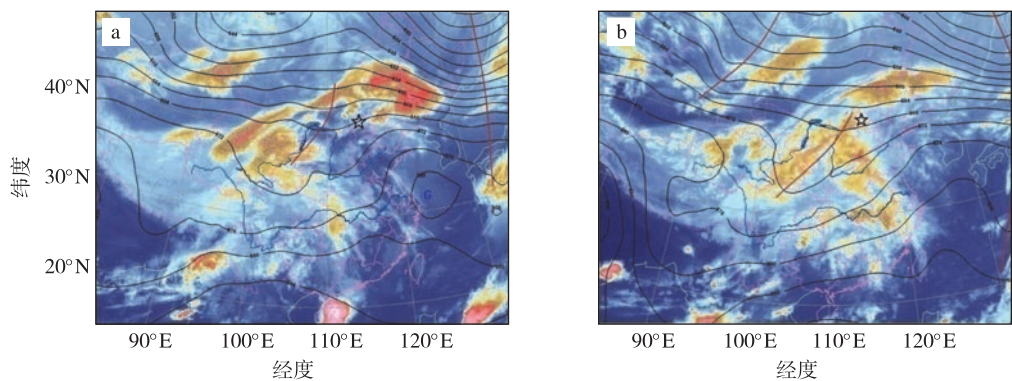


图 1 2009 年 4 月 18 日 500 hPa 天气形势场与 FY-2C 云图 (☆表示探测区域) a.08 时;b.20 时
Fig.1 Synoptic weather background at 500 hPa with an FY-2C infrared cloud image, on April 18, 2009
(☆: observation region) a.08:00 BST;b.20:00 BST

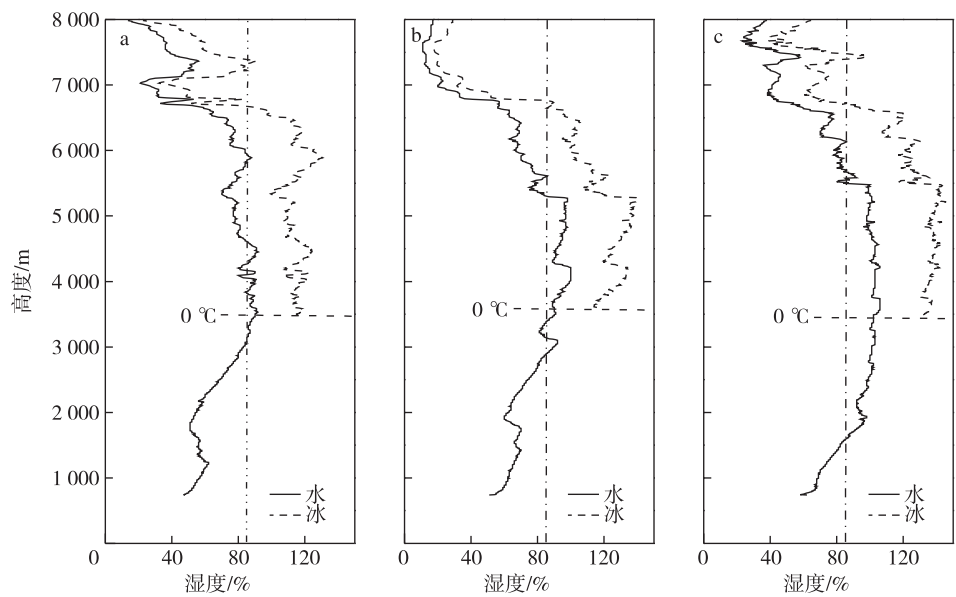


图 2 2009 年 4 月 18 日张家口站湿度探空 a.14 时;b.17 时;c.20 时
Fig.2 Relative humidity radio sound at the Zhangjiakou Station on April 18, 2009 a.14:00BST;b.17:00 BST;c.20:00 BST

低,由 14 时的 3 000 m,17 时 2 600 m 至 20 时降至 1 600 m,云体逐渐加厚。

2.2 观测概况

三架飞机于 16:30 至 18:50 时段内在指定高度同时探测目标云系,分别对 2 700 m、3 600 m、4 200 m、4 800 m 和 5 100 m 5 个高度层进行了水平探测。由飞行轨迹(图 3)可见,此次三机联合探测区域位于我国河北省西北部,中心位于(114.5°E,41°N);探测区域面积约为 1°×1°,飞行轨迹详见表 1。

河北夏延 3625 飞机(I 号飞机)16:18 从石家庄机场起飞,向北飞行,于 16:32 到达阜平(114.2°E,38.8°N),随后保持 4 800 m 飞行高度继续向北飞行,于 17:10 到达探测区域(114°E,41°N)。17:12 开始播撒 AgI 焰剂,播撒和探测同时

进行,沿 41°N 曲折向东探测两个来回后,17:46 上升到 5 100 m。18:03 催化作业结束,18:11 飞机下降返航。

北京 3830 飞机(Ⅱ号飞机)从张家口机场于 16:58 起飞,向北飞行于 17:20 爬升至 3 600 m 高度,17:30—17:50 飞机在此高度层沿 41°N 纬线东西往返(114.5~115°N)探测,于 18:00 开始下降至 2 700 m,并沿 115°E 经线南北往返(40.8~41.5°N)探测,18:35 返航。

大同机场起飞的 3817 飞机(Ⅲ号飞机)于 17:10 到达天镇(114.1°E,40.4°N),飞行高度 4 200 m,在 17:31 到达探测区(115°E,41°N),随后沿 41°N 向西航行,至 18:16 飞机沿 41°N 纬线在 114.4~115°E 之间完成一次东西向往返探测,于 18:17 开始返航。

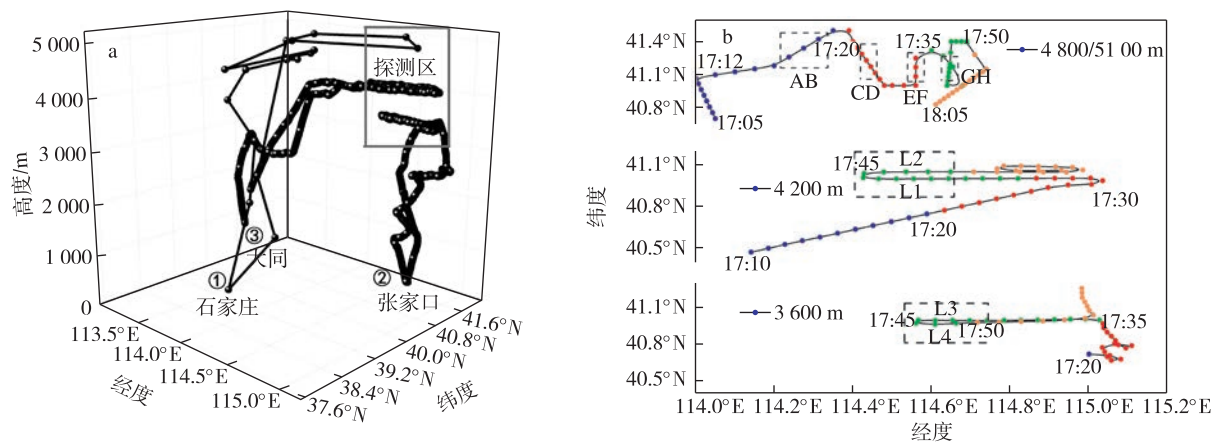


图 3 2009 年 4 月 18 日三机联合探测飞行轨迹 a.三维轨迹;b.水平二维剖面轨迹

Fig.3 Flight paths of the three aircraft on April 18,2009 a.three-dimensional trajectory;b.horizontal two-dimensional trajectory

表 1 2009 年 4 月 18 日三机探测飞行行程表

Table 1 Flight routes of the three aircrafts on April 18,2009

飞机	编号	北京时间	行程地点	探测高度/m
3625	I	17:00	天镇	4 800
		17:12	高庙子	4 800
		17:46	馒头营	5 100
		18:03	北新屯	5 100
		18:10	天镇	5 100
3817	II	17:00	巨乐	2 600
		17:12	天镇	4 200
		17:30	张家口	4 200
		18:00	张北	4 200
		18:10	小二台	4 200
3830	III	17:12	张家口	2 100
		17:40	膳房堡	3 600
		17:55	石嘴子	3 600
		18:10	九连城	2 700
		18:20	白庙滩	2 700

3 分析

3.1 云体结构演变

三机联合探测时间从 17:05 至 18:05,将 15 min 作为一个时次(图 3b 中分别以蓝、红、绿、橙表示),采用整体剖面的方法分析云中含水量、云滴和降水大滴(来自 PIP 及 2D-GB2 探头,量程为 100~6 200 μm)浓度垂直分布的演变。

由飞行轨迹(图 3b)可见,在云顶探测的 I 号飞机第一时次(17:05—17:20)未回穿作业,探测自然

层云区,中下层同为自然云;第二时次(17:20—17:35) I 号飞机人工播撒 AgI 后首次南北回穿探测,虽云滴数浓度存有明显突增,但两次南北飞行的东西间隔较远,且云中液态含水量增加,因而将其作为嵌入式积云区,而中下层则开始受其播种影响,作为响应前期;第三时次(17:35—17:50) I 号再次回穿探测,并在 17:46 爬升至 5 100 m 高度层,此次回穿在顶层探测到催化后的积云区,作为催化响应中期;第四时次(17:50—18:05)再次回穿,但飞行高度位于 5 100 m,作为后期检验。

表 2 中冰晶值来自 CIP 探头(Cloud Images Probe),其探测范围为 25~1 550 μm,包括冰晶和雪等稍大的冰相粒子。最小云区占比是指一段时间内飞行探测路径上入云总长度与总路径长度之比,以表征云区水平覆盖层度,而由于飞行过程中飞行员会主观避让强对流区,因而实测值应为实际云区占比的最小值。由图 4 及表 2 可见,层积混合云的主体在云的上部(4 800 m/5 100 m 层),此处累积了云中大部分过冷水,云区平均占比为 43%,远高于中层 15%及下层 20%。上层云滴数浓度小,量级为 10¹ cm⁻³,中下层云滴数浓度量级均为 10² cm⁻³;上层云滴尺度大,平均直径达 23 μm,中下层云滴的平均直径分别为 14 μm 和 6 μm;云滴数浓度与尺度变化呈反相关关系,随高度降低云滴数浓度增加而云滴尺度减小。上层云中冰晶数浓度极高,量级达 10³ L⁻¹,比中下层云中冰晶数浓度高出 1~2 个量级;而上层云中冰晶平均直径为 0.1 mm,小于中层 0.4 mm 及下层 0.5 mm。值得注意的是,CIP 探头在小粒径端(200 μm 以下)由于溅落破碎而导致的观测误差极大,因而上层云的高冰晶数浓度是仪器

测量误差与人工播撒后新冰晶生成共同作用的结果。

通过云中含水量和含冰量公式计算云上层和中层在响应前期 (17:20—17:35) 和中期 (17:35—17:50) 云水量和云冰量的转化,其中计算云冰量时

表 2 各时段云内微物理特征值分布(上/中/下层)

Table 2 Distribution of the microphysical parameters in the cloud at different times; top, middle, and bottom sections of the cloud

时段	最大含水量 $C_{LWCmax}/(g \cdot m^{-3})$	云滴数浓度 N_1/cm^{-3}	云滴直径 $D_1/\mu m$	冰晶数浓度 N_2/L^{-1}	冰晶直径 $D_2/\mu m$	最小云区占比/ %
17:05—17:20	0.9/0.1/—	10/171/—	24/10/—	3175/36/—	134/163/—	71/11/—
17:20—17:35	1.5/0.2/0.4	47/178/325	26/12/7	4712/97/157	99/353/583	59/24/26
17:35—17:50	1.1/0.1/0.2	53/60/332	20/22/6	2758/148/29	102/991/428	30/15/9
17:50—18:05	0.2/0.1/0.3	26/137/375	22/11/6	641/82/82	123/86/544	13/8/24

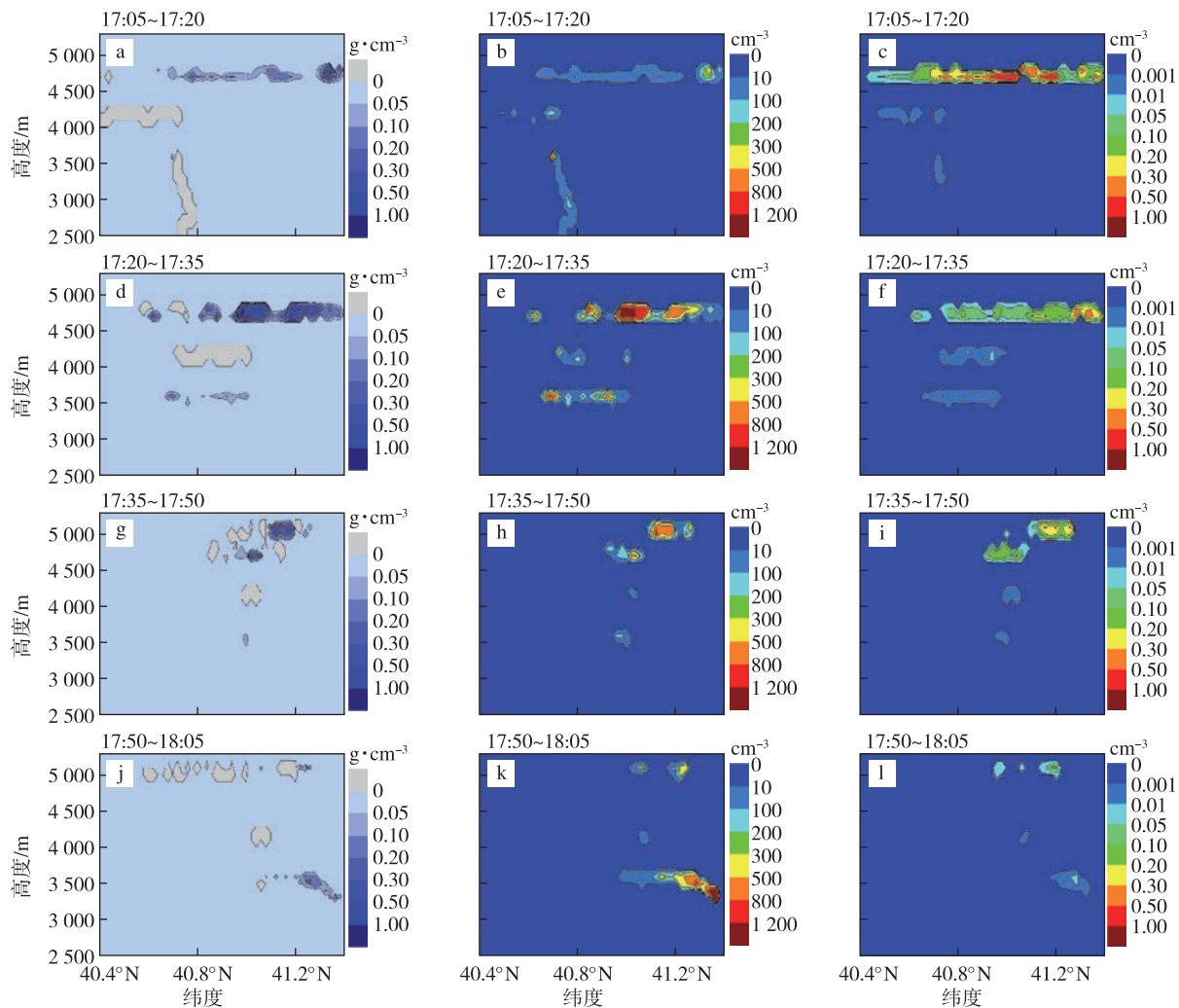


图 4 2009 年 4 月 18 日三机联合探测得到的云体微物理结构分布演变 a,d,g,j.云中含水量;b,e,h,k.云滴数浓度;c,f,i,l.降水大滴数浓度

Fig.4 Evolution of the microphysical structure of the cloud observed by the three aircrafts on April 18,2009 a,d,g,j.liquid content of the cloud;b,e,h,k.cloud droplet concentration;c,f,i,l.raindrop concentration

加 1.74 g/m^3 。上层水凝物减少总量 (0.68 g/m^3) 仅为中层水凝物增量 (1.91 g/m^3) 的 36%。造成此现象可能有三点原因:其一,上层播撒人工冰核后,部分冰核消耗云水通过贝吉龙过程凝华增长,余下冰核直接消耗云中水汽凝华增长;其二,在 $4\ 800 \text{ m}$ 乃至 $5\ 100 \text{ m}$ 之上,还存有高云向下输送冰晶,这同时可以解释上层 ($4\ 800 \text{ m}$) 自然云的高冰晶浓度;其三,上层掉落的冰晶在中间层 ($4\ 200 \sim 4\ 800 \text{ m}$) 云中淞附及聚并增长,消耗中间层云水而使中层云冰增加。

根据云微物理结构的时间演变,将播种后云体各时期特征总结如下。

响应前期 ($17:20 \sim 17:35$),上层为嵌入式积云区,云体的最大含水量出现在该层为 1.5 g/m^3 ,与 Carey et al. (2008) 分析的中纬度混合态云的云中含水量峰值区位置相同,同为 $4\ 800 \text{ m}$ 高度层而处于云体的中上部;上层受人工播种影响而产生高浓度冰晶,中层受上层部分冰晶掉落的影响,云滴及冰晶数浓度均增加,冰晶尺寸显著增长,云区范围扩大;下层相比于中上层,表现为云滴数浓度大而尺度小,冰晶尺度达到最大。

中期 ($17:35 \sim 17:50$),上层 AgI 冰核凝华形成的大量冰晶通过淞附及贝吉龙过程消耗该层过冷水,表现为云区范围减小,云滴数浓度维持而尺度变小,冰晶聚合增大并发生掉落;中层是相对干层,掉落至该层的冰晶部分升华变小后继续下落,部分碰冻该层云滴使得云滴数浓度减小而冰晶尺度增加;下层受到上层降水水滴的冲刷作用,云区范围迅速缩小。

后期 ($17:50 \sim 18:05$):对 $5\ 100 \text{ m}$ 探测显示该层云含水量较小,多为干区,仍存有较高浓度冰晶;中层冰晶大多掉落,且冰晶尺度减小一个量级;下层则表现为新生云区的发展,云区范围扩大,云滴数浓度维持且云滴尺度仍较小。

3.2 上层云的催化响应

飞机进行催化后物理检验时,由于环境风场、冰晶增长及下落、扩散规律等因素的复杂性,探测区域不宜过大,时间不宜过长,否则很难找到播云的扩散区域(王以琳和雷恒池,2003)。同时为尽量避免自然云中粒子浓度及粒子谱特征空间变异性大这种“云内不均匀性”的影响,本文选用 3 min 的飞行探测资料作为局部的研究对象(图 3b)。汪学林等(2001)曾对层状云中对流热泡的特征进行统计分析,指出层状云中流单体直径一般在 $0.3 \sim 30 \text{ km}$ 。

CD 段为强盛的嵌入式积云区(图 5),飞机航速为 328 km/h ,则 3 min 飞行距离为 11 km ,若对流单体的水平剖面为圆形,飞机极可能未穿过积云区的圆心而只是经过一条弦,则该对流单体直径应至少大于 11 km (约 0.13 个经度)。EF 段和 GH 段为 CD 段催化后的两次回穿过程(图 3b),EF 和 GH 与 CD 段的東西间隔分别为 0.1° 与 0.15° ,时间间隔分别为 10 min 与 20 min,当考虑云体的移动,从尺度上判定 EF 与 GH 均探测该嵌入式积云区。

根据飞行轨迹、高空风向及云移动方向选取上层云 AB ($17:16 \sim 17:19$)、CD ($17:23 \sim 17:26$)、EF ($17:33 \sim 17:36$) 及 GH ($17:43 \sim 17:46$) 四段云资料用以分析云内区域演变(图 5)。其中,上层 ($4\ 800 \sim 5\ 100 \text{ m}$) 云温度区间在 $-6 \sim -9.5^\circ\text{C}$,AB 与 CD 段分别为层云和积云的自然云区,EF 和 GH 为 CD 段(积云区)催化后的响应区。

从图 5a 可见,King 探头测得的云中液态水含量与 FSSP 计算得到的小粒径段 ($2 \sim 47 \mu\text{m}$) 的云水加云冰量基本重合,且含水量 C_{LWCKing} 的值略高,对二者进行线性拟合得到: $C_{\text{LWCFSSP}} = 0.84C_{\text{LWCKing}} + 0.003$,这说明上层过冷水集中于小粒径段,由图 5c 可见,多存在于 $2 \sim 25 \mu\text{m}$ 段,而冰晶的尺度普遍较大 ($>50 \mu\text{m}$),这与早期居丽玲等(2011)对该地混合态云的观测结果一致。

对比层云区(AB)与积云区(CD)可见,嵌入式积云区的温度明显低于层云区,同一高度二者温差达 2°C ,证明此时积云区以下沉运动为主,积云处于成熟或消散阶段。积云区的云滴数浓度量级主要集中在 10^2 cm^{-3} ,云滴谱存有双峰,峰值直径分别为 $2 \mu\text{m}$ 和 $25 \mu\text{m}$,云中液态水含量分布不均匀,标准差为 0.4 g/m^3 ,最大值为 1.5 g/m^3 ,与 Hobbs et al. (1980) 统计的蒙大拿州夏季嵌入式积云特点相似;层云区的云滴数浓度较小,量级为 10^1 cm^{-3} ,云滴尺度分布离散,云滴谱存有双峰且谱宽较宽,峰值直径分别为 $2 \mu\text{m}$ 和 $15 \mu\text{m}$,云中液态水含量分布较均匀,标准差仅为 0.15 g/m^3 ,最大值为 0.6 g/m^3 。

分析上层云区的催化响应可以看出,催化后 10 min (EF 段) 云中液水含量略有下降,峰值为 1.0 g/m^3 ,标准差为 0.3 g/m^3 ,云滴数浓度基本维持不变,云滴尺度减小,云滴谱明显变窄, $25 \sim 50 \mu\text{m}$ 之间的云滴(液相、冰相)基本消失,这可能与较大云滴 ($25 \sim 50 \mu\text{m}$) 易被冰晶捕获相关,同时云中温度比 CD 时有近 0.5°C 的上升,这部分温差可能与凝华放热相关,或为云内不均匀性所致;催化后 20 min

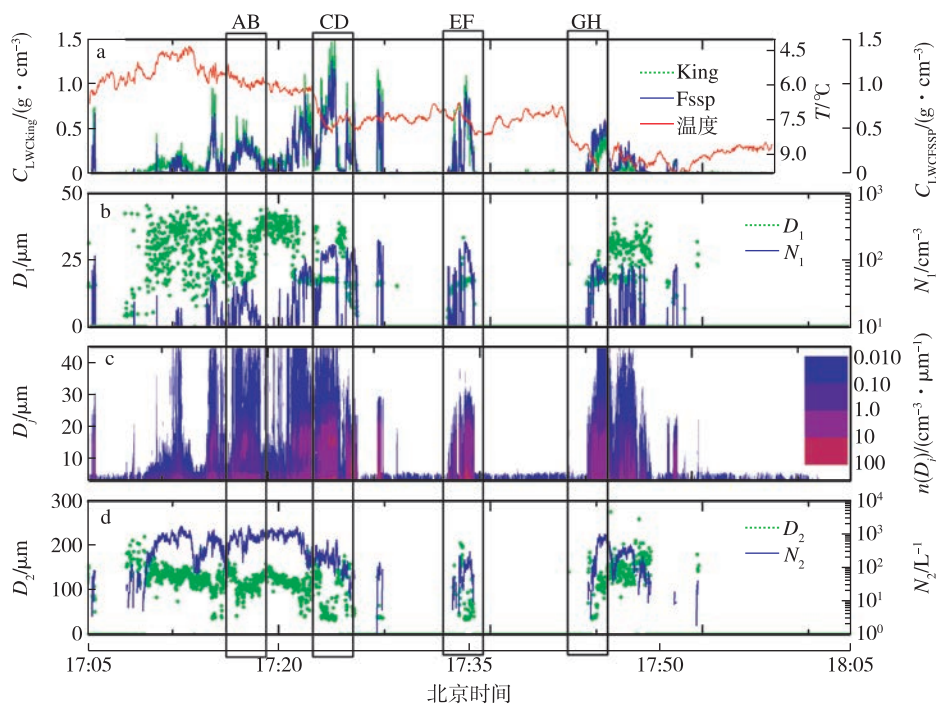


图 5 A—H 时间内云上部作业及回穿时的 $C_{LWCKing}$ 和 $C_{LWCFssp}$ 及温度 (a)、云滴浓度 N_1 和直径 D_1 (b)、瞬时云滴谱 $N(D_j)$ (c)、降水水滴浓度 N_2 和直径 D_2 (d) 随时间的水平分布

Fig. 5 Horizontal distribution of: (a) $C_{LWCKing}$, $C_{LWCFssp}$, and temperature cloud droplets; (b) concentration of N_1 and diameter D_1 ; (c) instant cloud droplet spectrum (D_j); (d) raindrop concentration N_2 and diameter D_2 at the upper section of the cloud over time (A to H)

(GH 段) 云中液水含量继续下降且趋于均匀分布, 峰值为 0.5 g/m^3 , 标准差为 0.15 g/m^3 , 与 AB 段层云特征相似, 此时 FSSP 探测到的直径大于 $24 \mu\text{m}$ 大云滴数量较多 (数浓度为 1.5 cm^{-3} , 约为此刻总云滴数浓度的 12%), 直径小于 $12.3 \mu\text{m}$ 的小云滴同时存在, 且温度为 $-8 \sim -9^\circ\text{C}$, 满足 H-M 结凝繁生机制条件 (Hallett and Mossop, 1974), 因而产生较多小冰晶及冰屑 (小于 $50 \mu\text{m}$), 王黎俊等 (2013) 观测到类似结果, 进而导致 $C_{LWCFssp}$ 值大于 $C_{LWCKing}$, 而 FSSP 不区分粒子相态, 因而同时又拓宽了云滴谱, 其次降水大滴的尺度与数浓度均有所增长。

3.3 中下层云的催化响应

为进一步探索混合云的垂直结构, 对混合云的中下层进行联合分析 (图 6)。中下层的两架探测飞机的飞行轨迹在 17:40—17:50 期间有很好的时空一致性, 如图 3b 所示, 均为前 5 min 自东向西飞行 (L1 与 L3), 后 5 min 自西向东回穿 (L2 与 L4)。

L1 与 L2 时段对比 (表 3) 可见, 5 min 内 4 200 m 层该区域云区范围显著增加, 云区直径增加 3.4 倍, 云中含水量由单峰变为双峰, 云中平均含水量略有增加, 云滴数浓度维持而直径增加 1 倍, 云内冰晶

显著增长, 数浓度增加 2 倍且直径增加 1 倍。L3 与 L4 时段对比可见, 3 600 m 层该区域微物理结构变化明显, 由原来的非云区衍生出较旺盛云区, 表现为小云滴的爆发增长, 云滴数浓度突增, 达到 10^2 cm^{-3} 量级, 同时出现较多冰晶粒子, 同层云、冰粒子间相互作用不会导致这般由非云区至旺盛云区的突变, 因而推测这是受到上层播撒催化后降水大滴掉落的影响, 在一定的浮力条件下衍生而成。

对比 L1 与 L3 以及 L2 与 L4 发现, 17:40 至 17:45 时中层已经出现较旺盛的云区, 而下层在同一位置却不曾探测到对应区域; 而在 17:45 至 17:50 时, 中层旺盛云区得到加强且下层也探测到对应云区。这表明, 该旺盛云区并非像对流热泡般从下至上发展, 而是从上至下扩展。Locatelli and Hobbs (1974) 曾统计冰雪晶下落末速度与尺度的关系, 朱士超和郭学良 (2014) 曾分析此次混合云的各层粒子形态, 并指出 4 200 m 层冰晶主要是板状和针柱状冰晶, 参考此结果, 则中层等效直径为 1~2 mm 的板状及柱状冰晶下落末速度约为 1~1.5 m/s, 降落至下层需要的时间约为 6~10 min, 而 L1 与 L4 中旺盛云区所对应的时间间隔

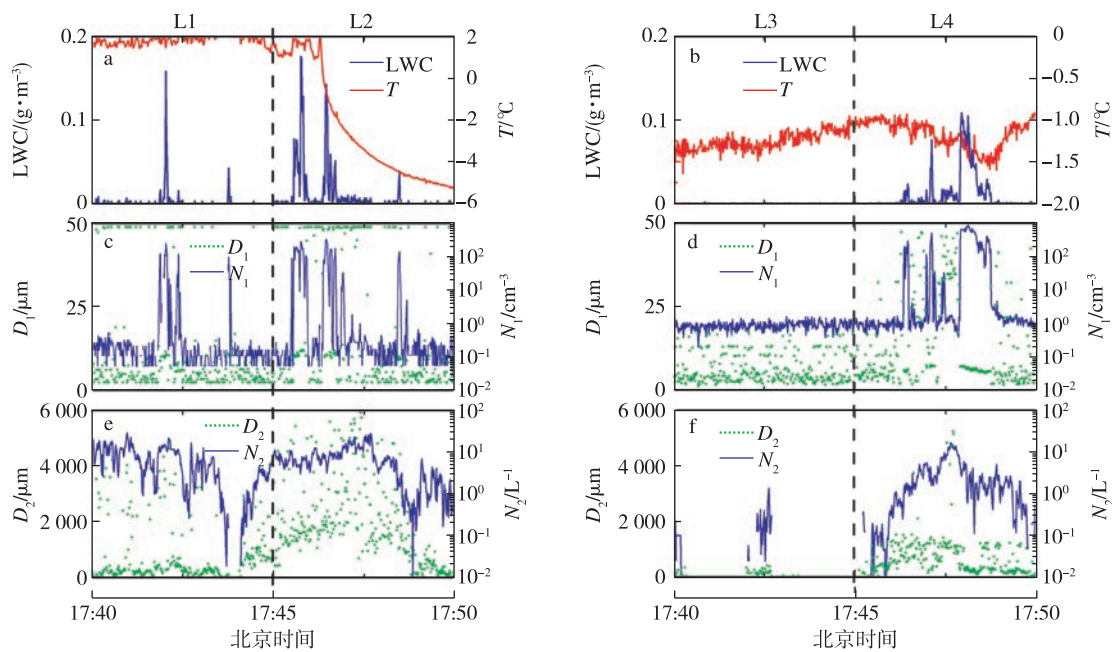


图 6 云中部 4 200 m(a,c,e)及下部 3 600 m(b,d,f)一次回穿过程中(a) C_{LWCCDP} 和(b) C_{LWCCAS} 及温度,(c,d)云滴浓度 N_1 和直径 D_1 ,(e,f)降水大滴浓度 N_2 和直径 D_2 随时间的水平分布(L1—L4)

Fig.6 Horizontal distribution of: (a, b) C_{LWCCDP} , C_{LWCCAS} and temperature; (c, d) clouddroplets concentration N_1 and diameter D_1 ; (e, f) raindrop concentration N_2 and diameter D_2 at the middle of 4,200 m(a, c, and e), and the bottom section of 3,600 m(b, d, and f) of the cloud over time (L1 to L4)

表 3 4 200 m 层与 3 600 m 层云内微物理量均值的分时段分布

Table 3 The microphysical parameters distribution of 4 200 m and 3 600 m in different moments

探测位置		$D_1/\mu\text{m}$	$D_2/\mu\text{m}$	N_1/cm^{-3}	N_2/L^{-1}	$\text{LWC}/(\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$	最小云区占比/%
4 200 m	L1(17:40-17:45)	12	554	64	55	0.022	8
	L2(17:45-17:50)	24	1090	59	169	0.024	35
3 600 m	L3(17:40-17:45)	0	0	0	0	0	0
	L4(17:45-17:50)	6	406	292	26	0.036	25

约为 7 min,时间上的吻合可以佐证旺盛云区是自上而下扩展的推断。

4 结论

2009 年春季开展的环北京地区多架飞机云观测试验是中国首次多机联合测云试验,三架飞机在云内不同高度进行同步探测,获得了宝贵的云资料。本研究对 4 月 18 日探测到的层积混合云的微物理结构及其催化响应进行分析,得到以下结论。

1)采用整体剖面的方法研究云微结构及其演变,将联合探测时段分为自然云区及催化响应的前中后期,分析发现:云上部(4 800 m/5 100 m 层)累积云中大部分过冷水,是云的主体;人工播撒 AgI 冰核促进上层云消散,上层云区占比在 1 h 内由催化

前的 71%减小至 13%;随高度降低,云滴数浓度增加而尺度减小,冰晶数浓度减小而尺度增加;AgI 冰核凝华核化后通过淞附及贝吉龙过程消耗该层过冷水,冰晶聚合增大后掉落。

2)采用局部对比的方法补充分析云微结构演变及催化响应。对上层云(4 800 m)分析发现,过冷水集中于 2~25 μm 小粒径段,而冰晶的尺度普遍较大(>50 μm);对比层云与积云区发现,积云区温度低于周围层云区 2 $^{\circ}\text{C}$,积云区云滴数浓度量级为 10^2 cm^{-3} ,云滴谱峰值直径为 25 μm ,云中液态水含量分布不均匀,最大值为 1.5 g/m^3 ,而层云区云滴数浓度量级为 10^1 cm^{-3} ,峰值直径为 15 μm ,云中液态水含量分布较均匀,最大值为 0.6 g/m^3 ;分析上层积云区的催化响应发现,催化后云中液态含水量

持续下降且趋于均匀,催化 10 min 内云滴谱变窄, 20 min 后满足 H-M 冰晶繁生条件,产生大量小冰晶,又拓宽云滴谱。对中(4 200 m)下(3 600 m)层联合分析发现,受上层催化影响而产生旺盛云区,中

层云区占比增大 3.4 倍,下层则衍生出新云区,微物理结构上表现为冰晶数浓度的增加及云内粒子尺度的增大,同时发现旺盛云区自上至下扩展,从两层间的冰雪晶掉落的时间间隔上给出佐证。

参考文献(References)

- Blossey P N, Bretherton C S, Cetrone J, et al., 2007. Cloud-resolving model simulations of KWAJEX: Model sensitivities and comparisons with satellite and radar observations[J]. *J Atmos Sci*, 64(5): 1488.
- Bukovčić P, Zrnčić D, Zhang G, 2015. Convective-stratiform separation using video disdrometer observations in central Oklahoma-the Bayesian approach [J]. *Atmos Res*, 155: 176-191.
- 蔡兆鑫, 周毓荃, 蔡森, 2013. 一次积层混合云系人工增雨作业的综合观测分析[J]. *高原气象*, 32(5): 1460-1469. Cai Z X, Zhou Y Q, Cai M, 2013. Analysis on comprehensive of Artificial precipitation enhancement operation for a convective-stratiform mixed cloud [J]. *Plateau Meteorology*, 32(5): 1460-1469. (in Chinese).
- Carey L D, Niu J, Yang P, et al., 2008. The vertical profile of liquid and ice water content in midlatitude mixed-phase altocumulus clouds[J]. *J Climate Appl Meteor*, 47(9): 2487-2495.
- Evans A G, Locatelli J D, Stoelinga M T, et al., 2010. The IMPROVE-1 Storm of 12 February 2001. Part II: Cloud structures and the growth of precipitation[J]. *J Atmos Sci*, 62(10): 3456-3473.
- 范焯, 郭学良, 张佃国, 等, 2010. 北京及周边地区 2004 年 8、9 月层积云结构及谱分析飞机探测研究[J]. *大气科学*, 34(6): 1187-1200. Fan Y, Guo X L, Zhang D G, et al., 2010. Airborne particle measuring system measurement on structure and size distribution of stratocumulus during August to September in 2004 over Beijing and its surrounding areas[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 34(6): 1187-1200. (in Chinese).
- 郭学良, 付丹红, 胡朝霞, 2013. 云降水物理与人工影响天气研究进展(2008—2012 年)[J]. *大气科学*, 37(2): 351-363. Guo X L, Fu D H, Hu Z X, 2013. Progress in cloud physics, precipitation, and weather modification during 2008—2012 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 37(2): 351-363. (in Chinese).
- Hallett J, Mossop S C, 1974. Production of secondary ice particles during the riming process[J]. *Nature*, 249(5452): 26-28.
- Hobbs P V, Politovich M K, Radke L F, 1980. The structures of summer convective clouds in Eastern Montana. I: Natural clouds[J]. *J Appl Meteorol*, 19(6): 645-663.
- 居丽玲, 牛生杰, 段英, 等, 2011. 石家庄地区一次秋季冷锋云系垂直微物理结构的观测研究[J]. *高原气象*, 30(5): 1324-1336. Ju L L, Niu S J, Duan Y, et al., 2011. Observational study on vertical microphysical structure of autumn cold-front cloud in Shijiazhuang Region[J]. *Plateau Meteorology*, 30(5): 1324-1336. (in Chinese).
- 李艳伟, 牛生杰, 罗宁, 等, 2009a. 山地对流云并合形成积层混合云的过程分析[J]. *气象科学*, 29(2): 157-164. Li Y W, Niu S J, Luo N, et al., 2009a. Convective clouds merger into convective and stratiform mixed clouds in mountainous area[J]. *Scientia Meteorologica Sinica*, 29(2): 157-164. (in Chinese).
- 李艳伟, 牛生杰, 罗宁, 等, 2009b. 积云并合扩展层化型层积混合云的数值模拟分析[J]. *地球物理学报*, 52(5): 1165-1175. Li Y W, Niu S J, Luo N, et al., 2009b. Numerical simulation about mixture of convective and stratiform clouds by convection merger[J]. *Chinese J Geophys*, 52(5): 1165-1175. (in Chinese).
- 林磊, 姚展予, 2011. 华北地区一次积层混合云降水的数值模拟研究[J]. *气象*, 37(12): 1473-1480. Lin L, Yao Z Y, 2011. Numerical study on the complex of the stratiform clouds and embedded convective clouds of North China[J]. *Meteorological Monthly*, 37(12): 1473-1480. (in Chinese).
- Locatelli J D, Hobbs P V, 1974. Fall speeds and masses of solid precipitation particles[J]. *J Geophys Res*, 79(79): 2185-2197.
- Mcfarquhar G M, Zhang G, Poellot M R, et al., 2007. Ice properties of single-layer stratocumulus during the Mixed-Phase arctic cloud experiment: 1. Observations[J]. *J Geophys Res*, 112(D24): 177-180.
- 牛生杰, 2012. 云降水物理研究[M]. 北京: 气象出版社. Niu S J, 2012. *Physics of Clouds and Precipitation*[M]. Beijing: China Meteorological Press. (in Chinese).
- Niu S, Jia X, Sang J, et al., 2009. Distributions of raindrop sizes and fall velocities in a semiarid plateau climate: Convective versus stratiform rains[J]. *J Climate Appl Meteor*, 49: 632-645.
- 王慧娟, 牛生杰, 雷恒池, 等, 2010. 降水性层云含水量跃变对应的微结构观测研究[J]. *大气科学学报*, 33(2): 212-219. Wang H J, Niu S J, Lei H C, et al., 2010. An observational study on the leaps of liquid water content and corresponding changes in microphysical structure in a stratiform cloud precipitation process[J]. *Trans Atmos Sci*, 33(2): 212-219. (in Chinese).
- 王黎俊, 银燕, 姚展予, 等, 2013. 三江源地区秋季一次层积云飞机人工增雨催化试验的微物理响应[J]. *气象学报*, 71(5): 925-939. Wang L J, Yin Y, Yao Z Y, et al., 2013. Microphysical responses as seen in a stratocumulus aircraft seeding experiment in autumn over the Sanjiangyuan National Nature Reserve[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 71(5): 925-939. (in Chinese).

- 汪晓滨,毛节奏,郑国光,等,2006.新型 AgI 末端燃烧器及其在增雨作业中的应用[J].气象科技,34(1):93-97. Wang X B, Mao J T, Zheng G G, et al., 2006. Application of new airborne AgI flare seeding generator to precipitation enhancement with aircraft[J]. Meteorological Science and Technology, 34(1):93-97. (in Chinese).
- 汪学林,秦元明,吴宪君,等,2001.层状云中对流泡特征及其在降水场中的作用[J].应用气象学报,12(S1):146-150. Wang X L, Qin Y M, Wu X J, et al., 2001. The characteristics of convective bubbles and its role in precipitation field[J]. Quar J Appl Meteor, 12(S1):146-150. (in Chinese).
- 王以琳,雷恒池,2003.冷云飞机人工引晶检验[J].大气科学,27(5):929-938. Wang Y L, Lei H C, 2003. Test of cold cloud seeding[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 27(5):929-938. (in Chinese).
- 辛乐,姚展予,2011.一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,37(2):194-202. Xin L, Yao Z Y, 2011. Studies on the microphysical characteristics of an aircraft seeding in convective line with trailing stratiform cloud[J]. Meteor Mon, 37(2):194-202. (in Chinese).
- 杨洁帆,雷恒池,胡朝霞,2010.一次层状云降水过程微物理机制的数值模拟研究[J].大气科学,34(2):275-289. Yang J F, Lei H C, Hu Z X, 2010. Simulation of the stratiform cloud precipitation microphysical mechanism with the numerical model[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 34(2):275-289. (in Chinese).
- 杨文霞,牛生杰,魏俊国,等,2005.河北省层状云降水系统微物理结构的飞机观测研究[J].高原气象,24(1):84-90. Yang W X, Niu S J, Wei J G, et al., 2005. Airborne observation for microphysical structure of precipitation system of stratiform cloud in Hebei Province[J]. Plateau Meteorology, 24(1):84-90. (in Chinese).
- Yuter S E, Houze R A, Smith E A, et al., 2005. Physical characterization of tropical oceanic convection observed in KWAJEX[J]. J Appl Meteorol, 44(4):385-415.
- 张佃国,郭学良,付丹红,等,2007. 2003 年 8—9 月北京及周边地区云系微物理飞机探测研究[J].大气科学,31(4):596-610. Zhang D G, Guo X L, Fu D H, et al., 2007. Aircraft observation on cloud microphysics in Beijing and its surrounding regions during August-September 2003[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 31(4):596-610. (in Chinese).
- 张佃国,姚展予,龚佃利,等,2011.环北京地区积层混合云微物理结构飞机联合探测研究[J].大气科学学报,34(1):109-121. Zhang D G, Yao Z Y, Gong D L, et al., 2011. Microphysical structures of stratocumulus mixed cloud detected by aircraft around Beijing area[J]. Trans Atmos Sci, 34(1):109-121. (in Chinese).
- Zhao Z, Lei H, 2014. Aircraft observations of liquid and ice in midlatitude mixed-phase clouds[J]. Adv Atmos Sci, 31(3):604-610.
- 周毓荃,欧建军,2010.用探空数据分析云垂直结构的方法及其应用研究[J].气象,36(11):50-58. Zhou Y Q, Ou J J, 2010. The method of cloud vertical structure analysis using rawinsonde observation and its applied research[J]. Meteor Mon, 36(11):50-58. (in Chinese).
- 朱士超,郭学良,2014.华北层积混合云中冰晶形状、分布与增长过程的飞机探测研究[J].气象学报,72(2):366-389. Zhu S C, Guo X L, 2014. Ice crystal habits, distribution and growth process in stratiform clouds with embedded convection in North China: Aircraft measurements[J]. Acta Meteorological Sinica, 72(2):366-389. (in Chinese).
- 朱士超,郭学良,2015.华北一次积层混合云微物理和降水特征的数值模拟与飞机观测对比研究[J].大气科学,39(2):370-384. Zhu S C, Guo X L, 2015. A case study comparing WRF-Model-Simulated cloud microphysics and precipitation with aircraft measurements in stratiform clouds with embedded convection in Northern China[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 39(2):370-384. (in Chinese).

An examination of the microphysical responses to aircraft seeding of stratiform clouds with embedded convection using the joint observational data of three aircrafts

WANG Yuan¹, NIU Shengji^{1,2}, LEI Hengch³

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

²Collaborative Innovation Center on Atmospheric Environment and Equipment Technology, Nanjing 210044, China;

³Key Laboratory of Cloud-Precipitation Physics and Severe Storms, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

In this research study, the microphysical responses of stratiform clouds on April 18, 2009 were studied by analyzing the observational data of three aircrafts. On the basis of distinguishing between the natural and seeded clouds, the observations from radar, satellite, and ground-based sites, together with MICAPS reanalysis, were used. The results indicated that the upper part of the cloud at approximately 4,800 m (1,700 m under the cloud top, and

3,000 m above the cloud base) was the strongest part, with the majority of the subcooled water accumulated within this section. It was observed that the embedded cumulus section maintained a temperature measuring 2°C lower than that of the stratus cloud at the same altitude. Even though the liquid water concentration in the cumulus section were observed to vary greatly, the maximum value of the liquid water concentration was determined to be 1.5 g/m^3 , with a standard deviation of 0.4 g/m^3 . The maximum liquid water concentration, and its standard deviation in the stratus area, were 0.6 and 0.15 g/m^3 , respectively. The peak diameters of the cloud droplet spectra in the cumulus and stratus sections were determined to be 25 and $15\text{ }\mu\text{m}$, respectively. Also, differences existed in the cloud drop concentrations, with 10^2 cm^{-3} in the cumulus section, and 10^1 cm^{-3} in the stratus section.

In regard to the seeded clouds, the observations revealed a response in the cumulus section at $4,800\text{ m}$. The artificial AgI which was released in the cloud caused a dissipation in the top portion of the cloud, which resulted in a decrease in the proportion of the cloud's area from 71% to 13% . The liquid water in the cloud was consumed, and tended to fit an equal distribution. Then, at 10 and 20 minutes after the AgI release, the maximum cloud liquid water concentrations were observed to drop to 1.0 and 1.5 g/m^3 , respectively, and their corresponding standard deviations were 0.3 and 0.15 g/m^3 , respectively. Also, the riming and cohering effects were found to be the major microphysics processes in the ice phase. The cloud droplet spectrum was first narrowed, and then widened, due to the H-M ice crystal proliferation mechanism. It was found that the cloud became vigorous below the top section due to the catalytic process which occurred in that region. Furthermore, within 10 minutes, it was observed that the cloud's range increased significantly from top to bottom, with the cloud droplets and ice crystals enlarging horizontally to double their original size.

joint observational data of three aircrafts; stratiform clouds with embedded convection; cloud microphysical parameter; microphysical responses to cloud seeding

doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20161012002

(责任编辑:刘菲)