

王维佳, 刘建西, 石立新, 等. 四川盆地降水云系飞机云物理观测个例分析[J]. 气象, 2011, 37(11): 1389-1394.

四川盆地降水云系飞机云物理观测个例分析^{* 1}

王维佳¹ 刘建西¹ 石立新² 刘 平¹ 张世林¹ 董晓波³

1 四川省人工影响天气办公室, 成都 610072

2 河北省气象科学研究所, 石家庄 050021

3 河北省人工影响天气办公室, 石家庄 050021

提 要: 利用 2008 年 10 月 26 日晚至 27 日凌晨成都上空连续两架次飞机穿云观测资料, 分析了探测云系的云物理特征和降水机制, 以期了解四川盆地降水形成的云物理过程。结果表明: 探测云系为上冷下暖的混合云系, 云系深厚, 云顶温度在 -10°C 左右, 0°C 层较高。云系中暖层厚, 约 3200 m; 过冷层较薄, 约 1800 m。在过冷层中, 从云顶往下, 大云粒子谱和降水粒子谱明显拓宽。在暖层中, 降水粒子的浓度和尺度减小。冰晶和过冷水存在使得冷云过程得以发动, 配合暖层中的暖云过程, 降水现象得以实现。而过冷水不够充沛, 形成的降水粒子不多, 同时暖层中液态水含量少, 供水不充分, 使得地面降水强度不大, 形成了小雨。

关键词: 云物理探测, PMS, 降水云系, 滴谱

Case Analysis of Microphysical Characteristics of Precipitation Cloud System in Sichuan Basin

WANG Weijia¹ LIU Jianxi¹ SHI Lixin² LIU Ping¹ ZHANG Shilin¹ DONG Xiaobo³

1 Weather Modification Office of Sichuan Province, Chengdu 610072

2 Hebei Institute of Meteorological Sciences, Shijiazhuang 050021

3 Weather Modification Office of Hebei Province, Shijiazhuang 050021

Abstract: Using the airborne observation data from two continuous flights on 26 and 27 October 2008, this paper analyzes the cloud microphysical characteristics and precipitation mechanisms of the observed cloud system to reveal the microphysical process of precipitation in Sichuan Basin. The results show that: (1) The observed cloud system is a deep mixed cloud system, with cold in the upper layer and warm in the lower layer. The cloud top is around -10°C , and the 0°C layer is high. The warm layer is deep (around 3200 m), while the cold layer is correspondingly thin (around 1800 m). (2) From top to bottom in the super-cooled layer, the size spectra of the large cloud particles and precipitation particles become remarkably wider. (3) In the warm layer, the precipitation particles become smaller and decreased. (4) The existence of ice nuclei and super-cooled water initiates the cold cloud process. The latter coordinates with the warm cloud process in the warm layer, and then the ground precipitation achieves. However, super-cooled water is not abundant, and the precipitation particles formed are not plentiful, as well as the liquid water content in the warm layer is small, thus, the ground precipitation is small.

Key words: cloud physics observation, PMS probe, precipitation cloud system, size spectra

* 中国气象局 2010 年面上推广项目(CMATG2010M21); 2010 年中国气象局成都高原气象开放实验室基金(LPM2010005); 四川省气象局 2010-重点-05 和四川省气象局 2010-青年-13 共同资助
2010 年 10 月 30 日收稿; 2011 年 5 月 31 日收修定稿
第一作者: 王维佳, 主要从事大气物理研究. Email: wjwang999@sohu.com

引言

云物理特征是研究云和降水的重要内容。缺乏穿云观测资料,影响了对云降水机制的了解和分析。美国 Particle Metrics Inc. 公司的 PMS 系列探头自 20 世纪 70 年代在国际上应用,促进了对云系内部结构的了解^[1-5]。20 世纪 80 年代开始,我国北方一些地区逐步使用 PMS 系列探头进行云物理探测试验^[6-13],许多有重大意义的发现得以提出。游来光等^[14]指出北方层状云中存在“播种云-供应云”,中间还常夹有干层。胡志晋^[15]探讨了层状云降水的机理。洪延超等^[16]利用数值模拟研究了“催化-供给”云降水形成机理。近几年,东北、华北、西北等地开展了一系列的飞机穿云探测试验^[17-22],提高了对北方地区的云降水物理特征的认识^[23-25],但是目前对于南方云物理特征和降水机制的了解依然不多。

2008 年 10 月 26 日晚至 27 日凌晨,四川省人工影响天气办公室租用搭载有美国 Particle Metrics Inc. 公司生产的 FSSP-100ER(前向散射滴谱探头)、OAP-2D-GA2(二维光阵灰度云粒子探头)、OAP-2D-GB2(二维光阵灰度降水粒子探头)和热线含水量仪 KLWC-5 等系列云物理探测设备的夏延 III A 飞机,以中国民航飞行学院广汉分院机场为本场,在成都上空开展了 2 架次探测飞行。本文利用 KLWC-5 和 FSSP-100ER、OAP-2D-GA2、OAP-2D-GB2 探头的观测数据对云系的云物理结构和降水机制加以分析。

1 飞行概况

2008 年 10 月 26 日晚至 27 日凌晨,四川盆地受高空切变线和副热带高压 588 线西北侧偏西南气流影响,700 hPa 有明显的气旋曲度,副热带高压强,系统比较稳定。成都位于切变线西端末尾偏西气流中。据地面观测,26 日 20 时和 27 日 02 时,成都上空云量均为 10 成。

10 月 26 日晚执行第 1 架次探测任务,20:41 飞机起飞,在成都上空实施云物理探测。起飞前 3 小时,成都市地面雨量为 0.6 mm。22:38 第 1 架次飞行结束。10 月 27 日凌晨执行第 2 架次探测任务,飞机于 00:17 起飞,在成都上空开展云物理探测,02:00 降落。前后 2 架次飞行航迹如图 1。据目

测,探测云系由主体云 As 和低层的 Sc 组成。探测过程中和探测后,成都市出现连续性小雨。21 时至翌日 05 时,地面逐小时面雨量为 0.3、0.3、0.3、0.3、0.1、0.3、0.2 和 0.3 mm。

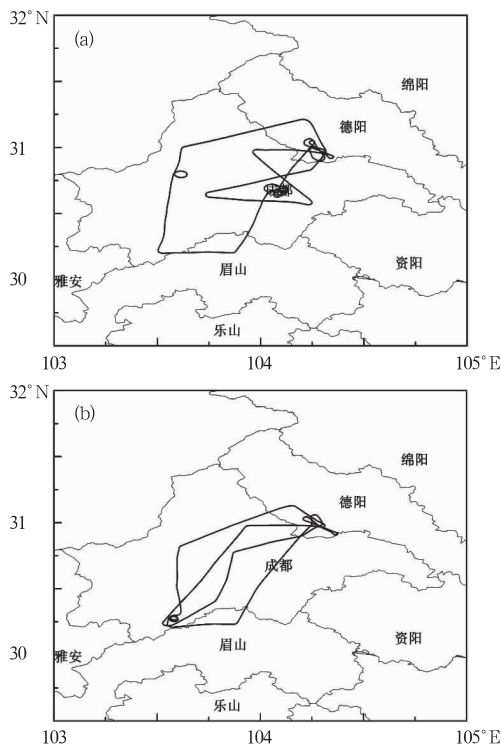


图 1 飞行航迹:(a)第 1 架次,(b)第 2 架次

Fig. 1 Flight paths for (a) the first flight on 26 October 2008, (b) the second flight on 27 October 2008

飞机所搭载的 3 个 PMS 粒子探头其量程分别是:1~95 μm (FSSP-100ER)、25~1550 μm (OAP-2D-GA2)、100~6200 μm (OAP-2D-GB2)。这两次飞行主要开展水平探测,以便对各探测参数进行持续的观测取样,探测云系中云场的中小尺度组织特征和各种粒子、液态水等微结构的水平分布,以了解云降水物理结构水平分布特征,并在飞机爬升和下降时附带进行垂直探测,希望通过两次连续探测了解和分析此次自然降水物理过程。

2 探测结果分析

第 1 架次穿云情况如图 2a。在 928 m 入云,云底温度 14.7℃。飞机 21:09—21:34 在 4200 m 高度附近平飞,记作 A 位置;21:42—21:50 在接近云顶约 6000 m 高度附近平飞,记作 B 位置;21:54—

22:24 在 4800 m 高度附近平飞,记作 C 位置。可见,云系内温度随高度垂直递减。A、B、C 位置均在 0℃ 层高度以上,其平均温度分别为 -1.5℃、-9.2℃ 和 -2.8℃。

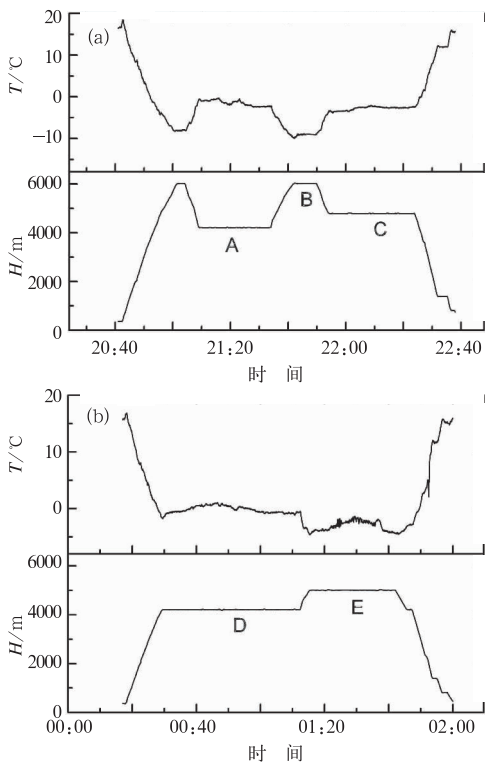


图 2 飞机穿云情况

(a) 第 1 架次; (b) 第 2 架次

A、B、C、D 和 E 分别为飞机水平飞行时的位置

Fig. 2 Variations of altitude and temperature for (a) the first flight, (b) the second flight

A、B、C、D、E are the positions of level flight respectively

第 2 架次穿云情况如图 2(b)。在 980 m 入云,云底温度 12.9℃。飞机 00:30—01:12 在 4200 m 高度附近平飞,记作 D 位置,在 D 位置观测到舷窗外降水;01:16—01:42 在 5000 m 高度附近平飞,记作 E 位置,在 E 位置飞机出现积冰,无法继续爬升。云系内温度随高度垂直递减。D 位置在 0℃ 层附近,平均温度为 -0.2℃;E 位置在 0℃ 层以上,平均温度为 -3.0℃。可见,D 位置和第 1 架次的 A 位置约在同一高度,E 位置和第 1 架次的 C 位置高度很接近。从这两架次穿云情况可发现,探测云系为上冷下暖的混合云系,云系较深厚,约 5000 m,云顶温度在 -10℃ 左右,云底温度在 13℃ 左右,0℃ 层较高。云系中暖层厚,约 3200 m;过冷层较薄,约 1800

m。以下主要分析穿云平飞时的观测数据。

取 FSSP-100ER 探头数据进行计算,得出 A、B、C、D、E 位置的小云粒子浓度(N)其平均值分别为 $1.4 \times 10^6 \text{ m}^{-3}$ 、 $5.2 \times 10^5 \text{ m}^{-3}$ 、 $2.9 \times 10^5 \text{ m}^{-3}$ 、 $1.4 \times 10^6 \text{ m}^{-3}$ 、 $4.0 \times 10^6 \text{ m}^{-3}$,A、B、C、D、E 位置的小云粒子直径(D)分别在 $4.4 \sim 45.3 \text{ }\mu\text{m}$ 、 $4.5 \sim 44.9 \text{ }\mu\text{m}$ 、 $4.7 \sim 45.1 \text{ }\mu\text{m}$ 、 $4.1 \sim 45.3 \text{ }\mu\text{m}$ 和 $4.1 \sim 45.3 \text{ }\mu\text{m}$ 。在 4200 m,前后两架次探测到的小云粒子平均浓度没有变化;在 4800~5000 m,较晚时刻的第 2 架次探测到的小云粒子平均浓度更大。作小云粒子谱如图 3,可知,各层小云粒子谱宽均是 $45.5 \text{ }\mu\text{m}$ 。A、B 位置小云粒子谱呈双峰型,主峰值直径均是出现在小粒子端的 $3.5 \text{ }\mu\text{m}$,第二峰值直径分别是 $12.5 \text{ }\mu\text{m}$ 和 $36.5 \text{ }\mu\text{m}$ 。C、D、E 位置小云粒子谱都是单调递减的,峰值直径均是 $3.5 \text{ }\mu\text{m}$ 。在 0℃ 层以上,FSSP-100ER 测得的小云粒子是小云滴和冰晶。云顶附近的 B 位置作为播种层,温度低(平均 -9.2℃),以冰晶的核化、凝华为主,小冰晶含量较多,可以作为凝结核向下播撒。冰晶在下落过程中将通过凝结(消耗液态水)、碰并(消耗小云滴)增长。同时,B 位置有少量较大尺度的冰质粒,在下落时将破裂、蒸凝、凝结而不断繁生,使得降水质粒增多。C、E 位置也有一定数量的冰晶,可以通过冰水转化增长。A、D 位置以下冰晶进入暖层开始融化,并通过暖云过程的凝结、碰并进一步增长为雨滴。

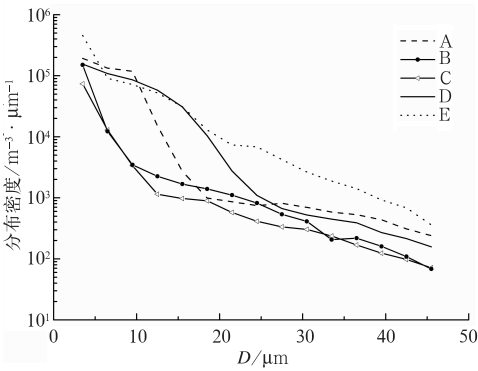


图 3 小云粒子谱(取自 FSSP-100ER)

A、B、C、D 和 E 含义见图 2 的表示

Fig. 3 Size spectra of small cloud particles (from FSSP-100ER)

A、B、C、D、E referring to Fig. 2

取 OAP-2D-GA2 探头数据进行计算,得出 A、B、C、D、E 位置的大云粒子数浓度(N)其平均值分别为 $6.6 \times 10^2 \text{ L}^{-1}$ 、 $9.5 \times 10^2 \text{ L}^{-1}$ 、 $1.1 \times 10^3 \text{ L}^{-1}$ 、

$4.0 \times 10^2 \text{ L}^{-1}$ 、 $1.5 \times 10^4 \text{ L}^{-1}$ ($1 \text{ L} = 10^{-3} \text{ m}^3$), A、B、C、D、E 位置的大云粒子直径(D)分别在 $66.4 \sim 292.8 \text{ }\mu\text{m}$ 、 $80.2 \sim 144.8 \text{ }\mu\text{m}$ 、 $66.4 \sim 177.1 \text{ }\mu\text{m}$ 、 $36.7 \sim 267.8 \text{ }\mu\text{m}$ 和 $36.4 \sim 232.0 \text{ }\mu\text{m}$ 。作大云粒子谱如图 4。各层大云粒子谱均是单调递减的,其峰值直径均出现在小粒子端的 $30.125 \text{ }\mu\text{m}$ 处, A、B、C、D、E 位置的大云粒子谱宽分别是 $301.375 \text{ }\mu\text{m}$ 、 $153.75 \text{ }\mu\text{m}$ 、 $178.25 \text{ }\mu\text{m}$ 、 $276.875 \text{ }\mu\text{m}$ 和 $253.375 \text{ }\mu\text{m}$ 。在 0°C 层以上, OAP-2D-GA2 测得的大云粒子包括直径大于 $300 \text{ }\mu\text{m}$ 的小雨滴、雪晶和冰晶聚合体以及直径小于 $300 \text{ }\mu\text{m}$ 的大云滴和冰晶。前后两架次的探测结果表明, 云系内大云粒子基本上是大云滴和冰晶。从云顶(B 位置)往下, 大云粒子谱明显拓宽, 说明大云粒子下落中增长, 进一步说明了冰晶在冰水转化区中得到增长。掉到 0°C 层以下, 冰晶将融化成水滴再按水滴繁生规律增多; 而进入暖层, 大云滴一方面可繁生出许多小云滴, 另一方面可依靠凝结和碰并增长到雨滴尺度。

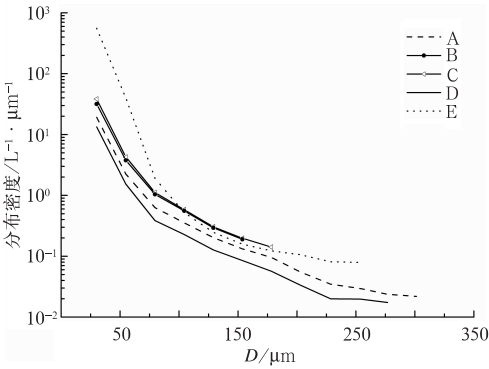


图 4 大云粒子谱(取自 OAP-2D-GA2)
A、B、C、D 和 E 含义见图 2 的表示
Fig. 4 Size spectra of large cloud particles
(from OAP-2D-GA2)
A, B, C, D, E referring to Fig. 2

取 OAP-2D-GB2 探头数据进行计算, 得出 A、B、C、D、E 位置的降水粒子浓度(N)其平均值分别为 5.2 L^{-1} 、 5.5 L^{-1} 、 2.4 L^{-1} 、 5.1 L^{-1} 、 16.8 L^{-1} , A、B、C、D、E 位置的降水粒子直径(D)分别在 $535.0 \sim 1737.8 \text{ }\mu\text{m}$ 、 $856.5 \sim 1213.3 \text{ }\mu\text{m}$ 、 $465.8 \sim 2381.5 \text{ }\mu\text{m}$ 、 $437.8 \sim 1700.2 \text{ }\mu\text{m}$ 和 $335.1 \sim 898.1 \text{ }\mu\text{m}$ 。作降水粒子谱如图 5。得到 A、B、C、D、E 位置的降水粒子谱宽分别是 $1800.0 \text{ }\mu\text{m}$ 、 $1304.0 \text{ }\mu\text{m}$ 、 $2400.0 \text{ }\mu\text{m}$ 、 $1800.0 \text{ }\mu\text{m}$ 和 $910.5 \text{ }\mu\text{m}$ 。A、B、C、D 位置的降水粒子谱型都是双峰型, 其主峰值直径均出现在小

粒子端的 $120.5 \text{ }\mu\text{m}$ 处, A、D 位置降水粒子谱的第二峰值直径都是 $318.5 \text{ }\mu\text{m}$, B、C 位置降水粒子谱的第二峰值直径分别是 713.0 和 $811.5 \text{ }\mu\text{m}$ 。E 位置的降水粒子谱是单调递减的, 其峰值直径为 $120.5 \text{ }\mu\text{m}$ 。在 4200 m 高度附近, 前后两架次降水粒子尺度范围没有什么变化。在 5000 m 高度附近, 第 2 架次的降水粒子尺度范围较第 1 架次向尺度较小端移动, 说明 5000 m 高度附近的降水粒子尺度在云系发展中减小了。由此可见, 在过冷层中, 从云顶往下, 降水粒子谱明显拓宽, 说明冷云降水机制发挥作用, 形成了降水粒子。但是降水粒子数浓度低, 说明形成的降水粒子少, 所以地面降水强度不大。降水粒子往下进入暖层, 暖云降水机制参与进来, 降水粒子通过雨滴的繁生增快增多, 云滴通过凝结、碰并形成新的降水粒子, 最终形成了地面降水。

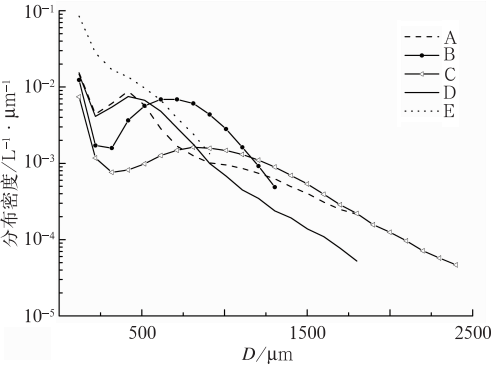


图 5 降水粒子谱(取自 OAP-2D-GB2)
A、B、C、D 和 E 含义见图 2 的表示
Fig. 5 Size spectra of precipitation particles
(from OAP-2D-GB2)
A, B, C, D, E referring to Fig. 2

FSSP-100ER 探头和热线含水量仪 KLWC-5 都可以测量液态含水量。FSSP-100ER 探头属于光学测量仪器, 是将通过取样区的粒子全部假定为水滴, 反算出的含水量。由于 FSSP-100ER 的有限量程, 其得到的液态水量只计算了一定尺度范围内的云滴。KLWC-5 属于恒温型热线含水量仪, 通过对云中液滴碰撞在感应元件上时引起的电压和功率变化计算云中液水含量。由于测量原理不同, 两种仪器其测量值有所不同。取 FSSP-100ER 探头和 KLWC-5 在 A、D 位置测量的液态含水量, 如图 6。可见, 两者分布趋势相同, 但 KLWC-5 测量值略大, 这是由于 FSSP-100ER 探头的液态水值是根据一定尺度内的粒子计算得出的, 而 KLWC-5 所能测量的

粒子范围更广,所以 KLWC-5 探测的液态含水量更能真实地反映云中实际含水量^[26]。本文中,液态含水量值采用 KLWC-5 探测的含水量。由此,进一步得到 C、E 位置的液态含水量分布如图 7。同时,测量结果显示云顶附近的 B 位置没有液态水存在。由于平飞的各高度层均在 0℃层以上,所以探测到的液态水即过冷水。前后两架次在不同高度上,相同的是,水平方向上过冷水不均匀。在不同高度其平均过冷水量分别是:A 位置 $0.025\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$,C 位置 $0.021\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$,D 位置 $0.032\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$,E 位置 $0.095\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$,云系内有一定的过冷水存在,但是含量不多。过冷水的存在,使得冰晶得以与过冷水共存,从而通过蒸凝过程长大。C、E 位置就成为了冰水转化区,冷云降水机制得以发动。

对云系暖层的垂直探测结果进行计算,KLWC-5 测得第 1 架次暖层中液态含水量平均 $0.025\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$,最大浓度 $0.085\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ (出现在 3430 m,

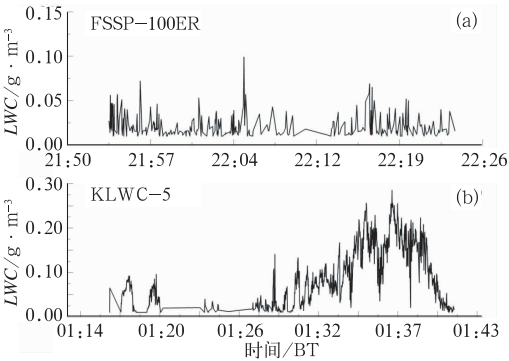


图 7 C、E 位置液态含水量分布
(取自 KLWC-5)(a)C 位置,(b)E 位置
C、E 含义见图 2 的表示

Fig. 7 Distributions of liquid water content
at positions of C, E (from KLWC-5)
(a) C, (b) E
C, E referring to Fig. 2

暖层的上部),第 2 架次暖层中液态含水量平均 $0.020\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$,最大浓度 $0.050\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ (出现在 3174 m,暖层的上部)。暖层中液态水含量少,这使得“播种-供给”机制中暖层的液态水的供给不是很好,供水机制不充分,云系中就不能形成高效的降水机制。而在暖层中,虽然有启动碰并的降水元存在,但数量有限。同时,云系中降水粒子的浓度和尺度在暖层减小,最终形成的地面降水量级不大。需要说明的是,由于飞机对云系暖层的探测是在爬升和下降的垂直探测过程中进行的,而这两架次飞行中飞机完成爬升和下降动作时的水平飞行距离较大,使得飞机在云低层获得的探测资料和在云中上层获得的探测资料并不能处于垂直线上,即其对应的地面点的水平跨距较大,所以垂直探测资料的代表性并不理想。

3 结论与讨论

(1) 这次探测的是上冷下暖的混合云系,云系较深厚,约 5000 m,云顶温度在 -10°C 左右, 0°C 层较高。云系中暖层厚,约 3200 m;过冷层较薄,约 1800 m。

(2) 在过冷层中,从云顶往下,大云粒子谱和降水粒子谱明显拓宽。在暖层中,降水粒子的浓度和尺度则减小了。

(3) 前后两架次的降水粒子尺度范围在 4200

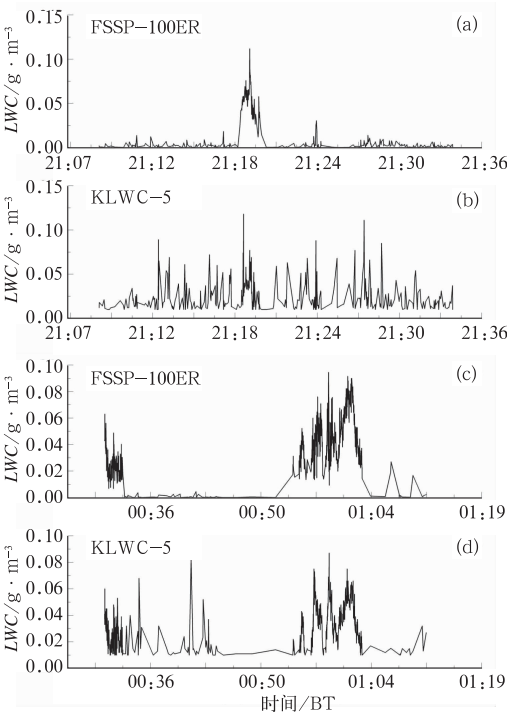


图 6 A、D 位置液态含水量分布
(取自 KLWC-5、FSSP-100ER)
(a),(b)A 位置;(c),(d)D 位置
A、D 含义见图 2 的表示

Fig. 6 Distributions of liquid water
content at positions of A, D
(from KLWC-5, FSSP-100ER)
(a), (b) A, and (c), (d) D
A, D referring to Fig. 2

m 高度附近没有什么变化。在 5000 m 高度附近,第 2 架次的降水粒子尺度范围较第 1 架次向尺度较小端移动。

(4) 冰晶和过冷水水的存在使得冷云过程得以发动,配合暖层中的暖云过程,降水现象得以实现。而过冷水不够充沛,形成的降水粒子不多,使得地面降水强度不大,形成了小雨。

探测云系顶部为播种层,以冰晶核化、凝华为主,有较多的冰晶存在,冰晶作为凝结核向下播撒。自云顶往下,过冷层中存在冰晶和液态水共存的冰水转化区,冰晶迅速增长,冷云过程得以发动。掉到 0℃ 层以下,冰晶将融化成水滴。同时,暖层中存在启动碰并的降水元,暖云过程能够启动。但暖层中液态水含量少,供水不充分。从过冷层到暖层,降水粒子的浓度和尺度没有增加,而是减小了。形成降水的雨滴主要是由冰晶增长并融化形成的,降水元尺度增长主要是在过冷层中,所以该云系中降水机制以冷云机制为主。

参考文献

- [1] Hobbs P V, Radke L R. The nature of winter clouds and precipitation in Cascade Mountains and their modification by artificial seeding, Part II: Techniques for the physical evaluation of seeding[J]. J Appl Meteor, 1975, 14 (5): 805-818.
- [2] Gayet Jean-Francois, Philip R A Brown, Frank A. A comparison of in-cloud measurements obtained with six PMS 2D-C probes[J]. J Atmos Oceanic Technol, 1993, 10: 180-194.
- [3] Heymsfield Andrew J, Sharon Lewis, Aaron Bansemer, et al. A general approach for deriving the properties of cirrus and stratiform ice cloud particles[J]. J Atmos Sci, 2002, 59: 3-29.
- [4] Shcherbakov Valery, Jean-Francois Gayet, Olivier Jourdan, et al. Assessment of cirrus cloud optical and microphysical data reliability by applying statistical procedures[J]. J Atmos Oceanic Technol, 2005, 22: 409-420.
- [5] Nissen Robert, Roland List, David Hudak, et al. Constant raindrop fall speed profiles derived from Doppler radar data analyses for steady nonconvective precipitation[J]. J Atmos Sci, 2005, 62: 220-230.
- [6] 何绍钦. 西安市一次晴空气溶胶粒子的观测分析[J]. 气象, 1987, 13 (5): 19-22.
- [7] 廖飞佳, 张建新, 黄钢. 北疆冬季层状云微物理结构初探[J]. 新疆气象, 1996, 19 (5): 31-34.
- [8] 张连云, 冯桂利. 降水性层状云的微物理特征及人工增雨催化条件的研究[J]. 气象, 1997, 23 (5): 3-7.
- [9] 王俊, 张连云, 陈金敏, 等. 秋季层状云中高值过冷水区的微物理特征[J]. 1999, 25(12): 24-27.
- [10] 苏正军, 刘卫国, 王广河, 等. 青海一次春季透雨降水过程的云物理结构分析[J]. 应用气象学报, 2003, 22 (6): 584-589.
- [11] 李照荣, 李荣庆, 李宝梓. 兰州地区秋季层状云垂直微物理特征分析[J]. 高原气象, 2003, 22 (6): 584-589.
- [12] 杨文霞, 牛生杰, 魏俊国, 等. 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, 2005, 24 (1): 85-90.
- [13] 陈保国, 樊鹏, 雷崇典, 等. 2002 年秋季陕北地区一次锋面云系综合探测分析[J]. 气象, 2005, 31(1): 45-49.
- [14] 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 (S): 19-56.
- [15] 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 (S): 10-13.
- [16] 洪延超, 周非非. “催化-供给”云降水形成机理的数值模拟研究[J]. 大气科学, 2005, 29 (6): 885-896.
- [17] 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[J]. 大气科学, 2007, 31(4): 621-634.
- [18] 于丽娟, 姚展予. 一次层状云飞机播云试验的云微物理特征及响应分析[J]. 气象, 2009, 35(10): 8-24.
- [19] 彭亮, 姚展予, 戴进, 等. 河南春季一次云降水过程的宏微物理特征分析[J]. 气象, 2007, 33(5): 4-11.
- [20] 王扬锋, 雷恒池, 樊鹏, 等. 一次延安层状云微物理结构特征及降水机制研究[J]. 高原气象, 2007, 26(2): 388-395.
- [21] 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分析[J]. 气象, 2011, 37(2): 194-202.
- [22] 党娟, 王广河, 刘卫国. 甘肃省夏季层状云微物理特征个例分析[J]. 气象, 2009, 35(1): 24-36.
- [23] Guo X L, Zheng G G. Advances in weather modification from 1997 to 2007 in China[J]. Adv Atmos Sci, 2009, 26(2): 240-252.
- [24] 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.
- [25] 石爱丽. 层状云降水微物理特征及降水机制研究概述[J]. 气象科技, 2005, 33(2): 1042-1081.
- [26] 王柏忠, 刘卫国, 王广河, 等. KLWC-5 含水量仪原理及在人工增雨中的应用[J]. 气象科技, 2004, 32(4): 294-296.