

文章编号: 2096-1618(2023)05-0589-06

四川盆地冬季一次层状云消散期云微物理特征的飞机探测分析

张元¹, 范思睿¹, 刘晓璐¹, 王维佳¹, 王钦², 耿蔚³

(1. 四川省人工影响天气办公室, 四川 成都 610072; 2. 中国民航飞行学院广汉分院, 四川 广汉 618307; 3. 四川省气象灾害防御中心, 四川 成都 610072)

摘要:为研究四川盆地层状云系结构及微物理特征,利用2019年12月18日机载DMT探测系统获取的云微物理资料,结合高空、地面、卫星等气象数据,通过时空序列分析方法,对四川省一次层状云降水消散期微物理特征进行分析。结果显示:探测云系为云顶温度较低的稳定性层状云,云顶以小云滴为主,对应地面降水较小。空中云垂直和水平结构分布不均匀,云粒子探头(CDP)、二维冰晶粒子探头(CIP)、二维降水粒子探头(PIP)探测粒子浓度范围分别为 $0.035 \sim 338.318$ 个/ cm^3 、 $4.17 \times 10^{-5} \sim 18.203$ 个/ cm^3 、 $3.28 \times 10^{-6} \sim 0.408$ 个/ cm^3 ,粒子直径范围分别为 $2.50 \sim 49$ μm 、 $25.32 \sim 1547.18$ μm 、 $104.23 \sim 5525.68$ μm ,随着高度增加,粒子浓度及粒子直径范围均变大。根据二维云粒子图像显示,2700~3000 m以过冷水滴及小冰晶粒子为主,4500~4800 m高层为枝状冰晶和宽枝冰晶粒子。云粒子谱均呈多峰分布,总体上云粒子越大,其浓度越小。本次探测过程中云中存在着有利于人工增雨的“可播区”,云中“可播区”呈不连续分布,本次飞行的可播区在 -10 $^{\circ}\text{C} \sim -15$ $^{\circ}\text{C}$,对应高度在4500~4840 m。

关键词: DMT; 云降水; 微物理特征; 可播性

中图分类号: P412.24

文献标志码: A

doi: 10.16836/j.cnki.jcuit.2023.05.014

0 引言

由于天气系统、地形的不同,以及受热力和动力条件的共同作用,云的宏微观结构存在多变性和复杂性。目前通过地面观测、雷达和卫星等常规观测手段,已获得了大量云降水宏观特征的研究成果。飞机观测是探测云微物理结构和特征的主要手段,为提高人工播云催化的效果和成功率以及对云微物理特征有更详细的了解,20世纪80年代开始,中国许多学者利用飞机探测资料对云、降水微物理结构特征、降水形成机制及可播性进行研究^[1-6],郭学良等^[7]对中国云降水物理飞机观测研究进行系统总结,发现积层混合云中对流泡区含有更多的过冷水,淞附增长起重要作用,符合“播撒供给”降水的形成机制,中国北方冬季降雪过程的形成机制主要是凝华聚并机制。陶树旺等^[8]研究给出了利用PMS观测资料确定人工增雨可播度的指标。在对云的宏微观物理特征及云结构分析的基础上,部分学者越来越关注播云催化前后所产生的物理效应并取得了一定的进展^[9]。周德平等^[10]通过对1995年辽

宁省一次个例催化前后分析,发现播云后云中各粒子谱结构发生变化,云滴谱小滴端明显下降,大值端上升,作业层下部数密度明显减少。辛乐等^[11]对河北一次飞机播云过程进行分析,认为播云后液水含量明显降低,冰晶减少,降水粒子明显增加。近年来,部分研究利用飞机观测数据与其他观测数据进行比较分析。赵增亮^[12]将典型的层积云的飞机探测结果与卫星资料对比分析,认为中国利用粒子测量系统的谱分布资料计算云的含水量结果是合理的。李冬楠等^[13]利用飞机探测资料及多种常规气象数据,分析了一次东北冷涡的云宏微观特征。封秋娟等^[14]针对山西省2010年5月27日一次层状云降水过程,分析了云微物理特征,并对空中和地面雨滴谱进行比较。蔡兆鑫等^[15]利用飞机观测和播云资料,结合卫星雷达等观测资料,发现云的可播性与雷达回波有一定的对应关系。王维佳等^[16]分析了四川盆地云系的物理特征和降水机制,但由于探测手段的限制,对四川地区云宏微观物理特征的研究依旧不足。本文针对2019年12月18日在四川盆地东北部上空开展的一次外场试验,结合卫星等气象数据,分析了四川盆地层状降水云消散期的云微物理特征。进一步认识盆地不同发展阶段的降水云系结构,为今后的人工增雨作业提供一定的参考。

收稿日期: 2022-10-20

基金项目: 中国气象局云雾物理环境重点实验室开放课题资助项目(2019Z01602); 中国气象局大气探测重点开放实验室开放课题资助项目(2021KLAS04M); 高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室科技发展基金资助项目(2017-青年-15、SCQXKJQN2019025、SCQXKJYJXZD202105)

1 天气形势及飞行概况

2019 年 12 月 17 日晚至 18 日上午,500 hPa 高空图显示,在中高纬度,从乌拉尔山到东北亚地区为两槽一脊的形势,四川地区为短波槽控制,槽后伴随有强冷平流。700 hPa 与 500 hPa 一致,整个华北地区为偏北气流,冷平流明显,长江以南地区为强劲的西南气流控制,暖平流明显。偏北风与西南风形成的东西向冷式切变自陕西向四川伸展,盆地内表现为辐合形势,配合相对湿度在 90% 以上。850 hPa 等温线密集区已位于四川以北,在盆地内有强烈的气旋式辐合,在地面有冷锋配合(图略)。本次天气过程是在锋面气旋影响下引起盆地大范围降水,在飞机探测时段,降水云系主体已处于消散期,对应地面仍有少量降水。

利用 2019 年 12 月 18 日在四川盆地东北部上空开展的一次外场试验资料,探测飞机采用的是新舟 B-3726 飞机,飞机搭载的是 DMT 粒子测量系统,使用的探头有云粒子探头(CDP),主要测量 2~50 μm 的小云粒子、二维冰晶粒子探头(CIP),主要测量 25~1550 μm 的大云粒子及冰雪晶粒子、二维降水粒子探头(PIP),主要测量 100~6200 μm 的云和降水粒子以及飞机综合气象要素测量系统探头(AIMMS20),测量温度、气压、湿度、风速、风向、飞行经纬度、飞行高度等。

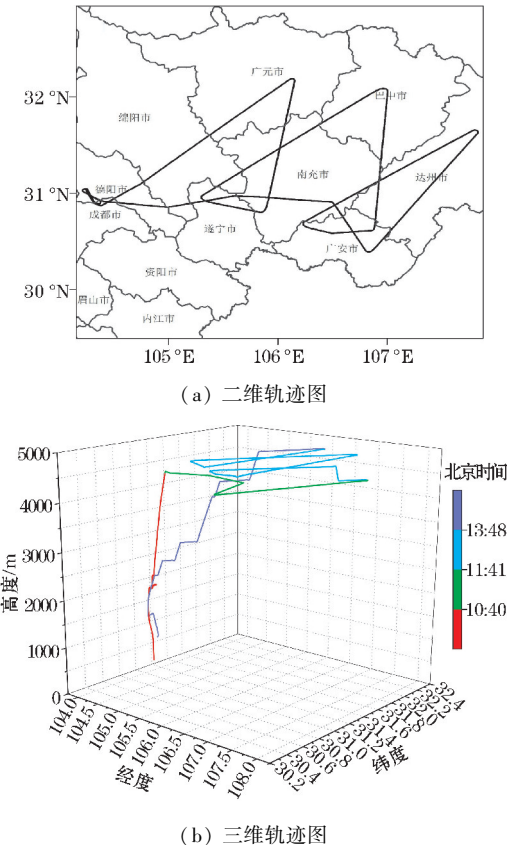


图1 2019 年 12 月 18 日飞行轨迹图

飞机 10:00 从广汉机场起飞,地面温度 8.2 ℃,探测的最高高度 4840 m,温度 -15.2 ℃,起飞后飞机持续爬升,10:40 飞至德阳市上空,高度升至 4550 m 左右后开始平飞,途经遂宁、南充、广安,11:47 到达州上空升至 4830 m 左右,继续平飞,到达达州宣汉县后又以字形飞行,经广安岳池、广安县,巴中南江县,遂宁射洪县,南充县,到广元旺苍县,13:48 到广元剑阁县开始下降,并返回广汉。飞机航线见图 1。整个飞机过程中云层均为稳定性层状云系,空气湿度大,0 ℃ 层在 1936 m,此次降水过程为冷云降水。图 2 为探测温度和高度随时间的变化曲线。

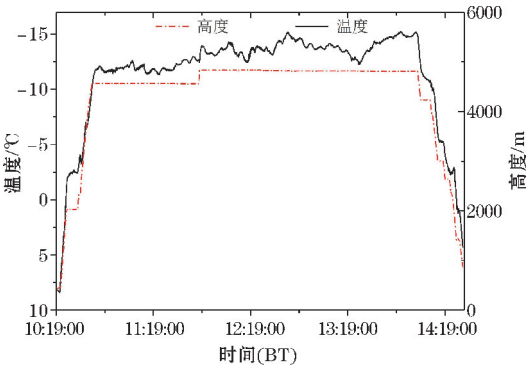


图2 飞行过程温度和高度变化

2 FY-4A 卫星资料分析

本文使用 Rosenfeld 等^[17] 的卫星反演方法,根据 RGB 合成颜色判断云类型,并根据 Re 随 T 的变化曲线,即 $T-Re$ 图,用于分析云中垂直结构。其中 T 为卫星反演的云顶温度, Re 为反演的云顶有效粒子半径^[18]。图 3 为 2019 年 12 月 18 日 10 时 FY-4A 卫星 RGB 合成图及对应区域的 $T-Re$ 廓线图,观测区域大部分地区有云系覆盖,主体为粉红色云(1 区)和黄色(2 区)云区,1 区云顶温度 $-6\text{ }^{\circ}\text{C} \sim -19\text{ }^{\circ}\text{C}$, Re $6 \sim 37.4\text{ }\mu\text{m}$,根据 Re 和 T 的大小此区域为云滴较大或冰晶数量较充分的冷云区,可有效启动碰并增长和进行冰水转化过程^[18],此云区所在的达州和广安等区域自动站已监测到降水,部分站点小时雨量超过 1 mm,说明 1 区与地面降水有较好的对应关系;2 区云区主要为淡黄色和淡粉色,云顶温度为 $-7\text{ }^{\circ}\text{C} \sim -16\text{ }^{\circ}\text{C}$, Re 大部分在 $5 \sim 10\text{ }\mu\text{m}$,最大达 $18.7\text{ }\mu\text{m}$,与区域 1 相比,云顶温度和 Re 均小很多,淡黄色和淡粉色云区主要为过冷水区,云滴有效半径较小,云粒子主要是通过凝结增长, $-dRe/dT$ 值较小,说明水汽和液水条件不是很好,区域 2 云区对应的南充、巴中等地地面降水较少。

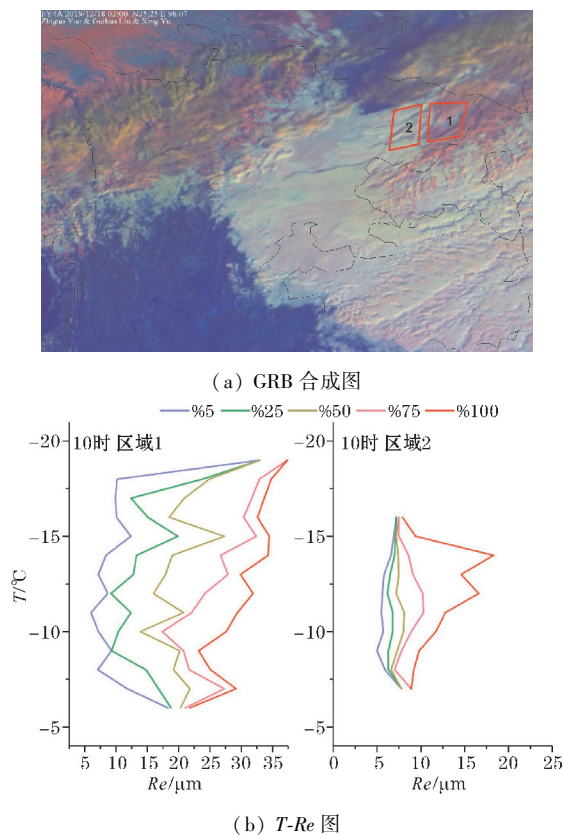


图3 2019年12月18日10:00 FY4卫星GRB合成图和 $T-Re$ 分布图(红色框为 $T-Re$ 图所选云区)

3 云微物理量随高度的变化特征

利用飞机爬升阶段的探测资料研究云系的垂直结构。图4给出了CDP、CIP、PIP 3个探头观测到粒子数

浓度及粒子直径的垂直分布,探测高度范围为426~4838 m。由图4(a)看见,CDP探测到小云粒子浓度在 $0.035 \sim 338.318$ 个/ cm^3 ,粒子直径范围 $2.5 \sim 49 \mu\text{m}$,3000~4800 m高度云滴数浓度较大,在2000 m高度以下有云滴密集区,云滴浓度范围在10个/ cm^3 左右。4200 m以下粒子直径变化小,基本在 $10 \mu\text{m}$ 以下,4200 m以上粒子尺度分布在 $0 \sim 50 \mu\text{m}$,CIP探测到粒子浓度为 $4.17 \times 10^{-5} \sim 18.203$ 个/ cm^3 ,粒子直径为 $25.32 \sim 1547.18 \mu\text{m}$,2500~3500 m粒子数浓度量级分布在 $10^{-4} \sim 10^2$ 个/ cm^3 ,粒子尺度范围主要集中在 $200 \mu\text{m}$ 左右,在4550 m及4830 m高度左右粒子数浓度量级变化大部分在 $10^{-4} \sim 10$ 个/ cm^3 ,粒子尺度跨度较大。PIP探测的粒子浓度范围为 $3.28 \times 10^{-6} \sim 0.408$ 个/ cm^3 ,粒子直径为 $104.23 \sim 5525.68 \mu\text{m}$,显示2500~3500 m粒子数浓度量级分布在 $10^{-6} \sim 10^{-2}$ 个/ cm^3 ,粒子直径基本小于 $500 \mu\text{m}$,在4550 m及4830 m左右粒子数浓度量级为 $10^{-6} \sim 10^{-2}$ 个/ cm^3 ,粒子尺度跨度也较大,可以看到随着高度增加,粒子浓度及粒子直径范围均变大。张正国等^[3]研究的广西秋季层状云典型的微物理垂直结构特征为云下层云滴数浓度、平均直径和液态水含量随高度逐步增加,由于逆(等)温层、上升气流减弱、湍流等因素影响,云中上层云微物理量达最大值后随高度减小。本文研究结果与其较为一致,但由于飞机是在爬升阶段做的垂直探测,过程水平距离比较大,获得的垂直探测数据并不在垂直线上,因此垂直探测数据代表性不是特别理想。

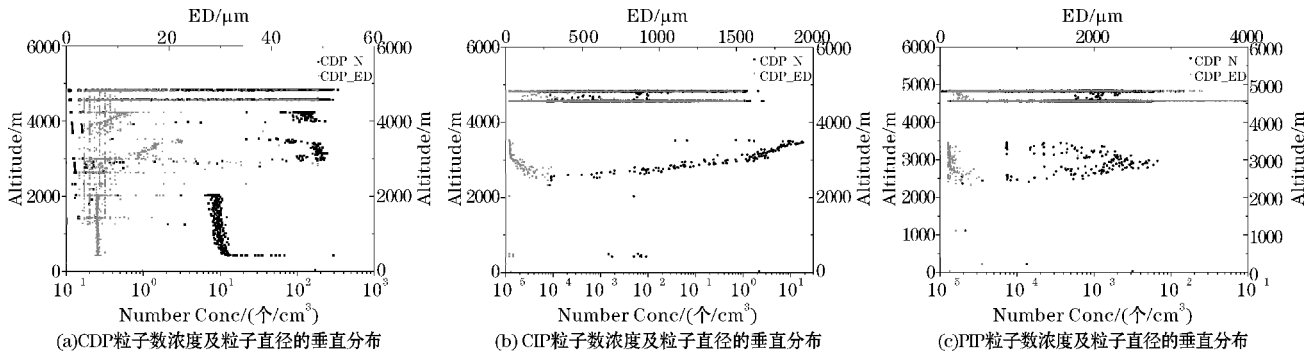


图4 云微物理量垂直分布

图5为不同高度探测到的二维粒子图像。在2741 m和3044 m高度上,温度 $-5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右时,测到的粒子大多为球状粒子,说明粒子主要为过冷水滴或小冰晶粒子,这个高度上,过冷水滴不断蒸发,冰晶不断凝华增大,贝吉龙过程活跃,促进过冷水向冰晶转化。在4568 m、4831 m均测到的是冰晶粒子,主要是枝状冰晶和宽枝冰晶,温度在 $-12 \text{ }^{\circ}\text{C} \sim -15 \text{ }^{\circ}\text{C}$,粒子形态清晰,随着高度增加,冰晶越大,主要以凝华增长为主。

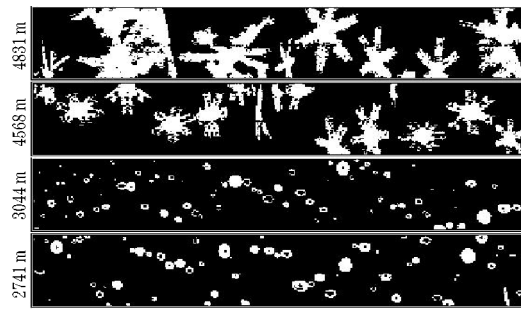


图5 不同高度的二维粒子图像

4 云微物理量随时间的变化特征

图6给出了整个探测时段内云微物理参量随时间的变化。包括LWC、CDP探测的云中粒子数浓度、有效粒子直径;CIP探测的云中大粒子数浓度,有效粒子直径;以及PIP测得的云中降水粒子数浓度和有效直径。LWC平均值为 0.012 g/m^3 ,最大值为 0.453 g/m^3 ,含水量较大,但分布不均匀,呈现多峰分布,有很大一部分没有探测到过冷水。主要中间存在的干层容易造成云滴或雨滴的蒸发,不利于降水的形成。整个探测时段内均有测到小云粒子,大多在 $2\sim49\text{ }\mu\text{m}$ 。 $10:35\sim10:38$ 、 $11:04\sim11:18$ 、 $12:04\sim12:08$ 、 $12:17\sim12:22$ 这几个时间段小云粒子浓度和直径均有明显增加,CDP-N与LWC有比较好的对应,入云时起伏变化比较明显,整个探测时段内小云粒子有效直径大多在 $10\text{ }\mu\text{m}$ 以内,在LWC大值区均有明显增加,此时处在云中含水量丰富,有利于小云粒子通过凝结增长及碰并机制等长大,促进降水产生。CIP探测到粒子水平分布起伏较大,数浓度极值间相差3个量级,粒子尺度存在较大的起伏,最大值为 $1547\text{ }\mu\text{m}$,在 $10:35\sim10:38$ 、 $11:04\sim12:08$ 、 $12:17\sim12:22$ 、 $12:45\sim12:48$ 这几个时间段均有探测到比较多的大云粒子,CIP-N和CIP-ED有比较好的对应;PIP探测到的降水粒子数浓度分布不均匀,有3个量级变化。粒子尺度分布不均匀,在 $10:35\sim10:38$ 、 $11:04\sim12:08$ 、 $12:17\sim12:22$ 、 $12:45\sim12:48$ 这几个时间段均有探测到较多的粒子。

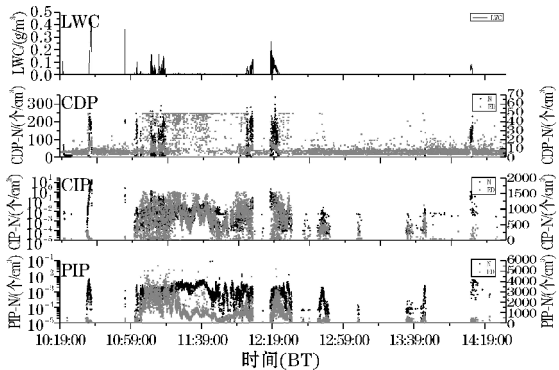


图6 云微物理量水平分布

孙鸿娉等^[9]利用DMT探测系统的CDP探头探测云中粒子浓度和CIP探头探测的云中大粒子浓度作为判别云中可播度的两项主要指标,CDP探测的粒子浓度不小于 30 个/cm^3 的云区才具有一定的可播度,其中CIP探测的大粒子浓度小于 10 个/cm^3 ,确定为强可播区,否则为可播区。本文采用该判别方法,对该次过程云的可播性进行分析,发现CDP探测的小云粒子浓

度($N1$)不小于 30 个/cm^3 的区域很少,其中CIP探测到大云粒子浓度($N2$)小于 10 个/cm^3 的云区占很大的比例,根据可播性条件,整个观测过程中云中存在有利于人工增雨的“可播区”,在云中“可播区”呈不连续分布,A为强可播区,B为可播区,C为不可播区(图6),本次飞行的可播区基本在 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}\sim-15\text{ }^{\circ}\text{C}$,符合播云温度窗范围,对应高度在 $4500\sim4840\text{ m}$ 。

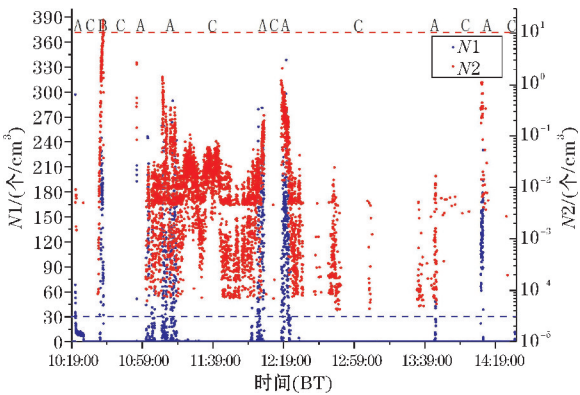


图7 整个飞机探测过程中N1(蓝色)和N2(红色)随时间的分布

5 云粒子谱特征

根据图7的分析结果,分别绘制 $11:16:50\sim11:17:52$ (时段1,高度 $4569\sim4571\text{ m}$)、 $12:06:16\sim12:08:00$ (时段2,高度 $4830\sim4831\text{ m}$)以及 $12:18:46\sim12:22:11$ (时段3,高度 $4832\sim4836\text{ m}$)3个不同可播区的典型时段的粒子总谱($2\sim6200\text{ }\mu\text{m}$)(图8)。其中横坐标为粒子直径,单位为 μm ,纵坐标为 dN/dD ,单位为 $(\text{cm}^{-3}\mu\text{m}^{-1})$ 。从粒子尺度谱分布特征可以看到,粒子浓度与直径一般呈反相关,粒子越大,浓度越小,3个平飞时段的粒子谱均呈现出多峰分布,小云粒子的主峰值对应的粒子直径均为 $7.5\text{ }\mu\text{m}$,小云粒子谱浓度最大值为 $75\text{ 个}/(\text{cm}^{-3}\cdot\mu\text{m}^{-1})$,时段1、2的第二峰值直径是 $13.5\text{ }\mu\text{m}$,时段3的第二峰值直径是 $4.5\text{ }\mu\text{m}$ 。时段1的小云粒子谱谱宽最小,时段2的小云粒子谱宽最大,为 $46.5\text{ }\mu\text{m}$;大云粒子的峰值直径均出现在小粒子端的 $50\text{ }\mu\text{m}$,时段1谱宽最小,时段3的谱宽最大,为 $1500\text{ }\mu\text{m}$,大于 $100\text{ }\mu\text{m}$ 的大云粒子浓度值接近,数量级在 $10^{-6}\sim10^{-4}\text{ 个}/(\text{cm}^{-3}\cdot\mu\text{m}^{-1})$;降水粒子谱的峰值直径也均出现在粒子端的 $200\text{ }\mu\text{m}$,同样时段1谱宽最小,时段3谱宽最大,为 $5500\text{ }\mu\text{m}$,降水粒子尺度较大,但降水粒子浓度比较小。

在这3个平飞阶段,冰晶浓度均不超过 10 个 ,浓度只有 10^{-3} 个/cm^3 量级,而云滴浓度超过 30 个/cm^3 ,最大为 75.599 个/cm^3 ,表明云中过冷水丰富,此时引入适量的人工冰核,有可能使其转化为降水,因此这几个

阶段均具有较大的人工增雨潜力。

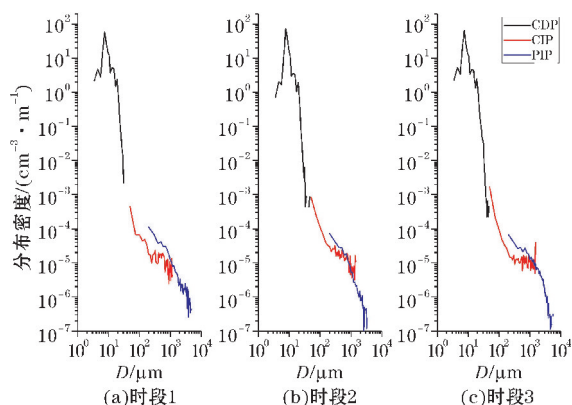


图8 平飞阶段典型时段云粒子总谱

6 结论

本文利用四川省2019年12月18日一次层状云降水过程的飞机探测资料,研究四川盆地冬季降水云的微物理量随高度和时间的变化特征,讨论云中可播性,并分析典型时刻云粒子谱特征,结论如下:

(1) 飞机探测区域和时段主要位于高空500 hPa、700 hPa低压槽前和地面冷锋之后,整个飞机过程为短波槽天气系统影响的稳定性层状云系,此次降水过程为冷云降水,在飞机探测时段,降水云系主体已处于消散期,探测区域大部分地区有云系覆盖,云体分布不均,云顶温度为 $-6\text{ }^{\circ}\text{C} \sim -19\text{ }^{\circ}\text{C}$,云顶以小云滴为主, $-dRe/dT$ 值较小,说明水汽和液水条件不是很好,对应地面降水较小。

(2) 根据飞机机载DMT系统探测分析,发现空中云垂直和水平结构分布不均匀,CDP、CIP、PIP探测粒子浓度范围分别为 $0.035 \sim 338.318\text{ 个}/\text{cm}^3$ 、 $4.17 \times 10^{-5} \sim 18.203\text{ 个}/\text{cm}^3$ 、 $3.28 \times 10^{-6} \sim 0.408\text{ 个}/\text{cm}^3$,粒子直径范围分别为 $2.50 \sim 49\text{ }\mu\text{m}$ 、 $25.32 \sim 1547.18\text{ }\mu\text{m}$ 、 $104.23 \sim 5525.68\text{ }\mu\text{m}$ 。随着高度增加,粒子浓度及粒子直径范围均变大,CDP探测的粒子浓度与LWC有比较好的对应,小云粒子有效直径在LWC大值区均有明显增加,此时云区含水量丰富,有利于小云粒子通过凝结增长及碰并机制等长大,促进降水产生。根据二维云粒子图像,2700~3000 m左右以过冷水滴及小冰晶粒子为主,4500~4800 m高层为枝状冰晶和宽枝冰晶粒子。

(3) 利用CDP探头探测云中粒子浓度和CIP探头探测的云中大粒子浓度作为判别云中可播度的两项主要指标,分析本次降水云系消散阶段云中存在有利于人工增雨的“可播区”,云中“可播区”呈不连续分布,本次飞行的可播区在 $-10\text{ }^{\circ}\text{C} \sim -15\text{ }^{\circ}\text{C}$,符合播云温度

窗范围,对应高度在4500~4840 m。此外还分析了典型时刻云粒子谱特征,发现云粒子谱均呈多峰分布,总体上云粒子越大,其浓度越小。

由于空域等原因,本次飞机探测时段处于降水云系消散期,且没有进行垂直分层探测,因此得到的飞机观测资料有限,各种观测资料之间的时空匹配也需要进一步提高,故只能在此基础提出一些试探性的结论。以后应做更多的有针对性的飞行探测,更进一步了解云微物理结构特征及降水机制。

参考文献:

- [1] 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(Z1): 10-13.
- [2] 刘莹莹, 牛生杰, 封秋娟, 等. 一次积层混合云的形成过程和微物理观测[J]. 大气科学学报, 2012, 35(2): 186-196.
- [3] 张正国, 卢广献, 汤达章, 等. 广西秋季层状云微物理特征分析[J]. 气象科技, 2018, 46(3): 545-555.
- [4] 张佃国, 姚展予, 龚佃利, 等. 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, 2011, 34(1): 109-121.
- [5] 秦彦硕, 刘世玺, 范根昌, 等. 华北地区春季一次层状云的微物理特征及可播性分析[J]. 干旱气象, 2015, 33(3): 481-489.
- [6] 孙泓聘, 李培仁, 闫世明, 等. 华北层状冷云降水微物理特征及人工增雨可播性研究[J]. 气象, 2011, 37(10): 1252-1261.
- [7] 郭学良, 付丹红, 郭欣, 等. 我国云降水物理飞机观测研究进展[J]. 应用气象学报, 2021, 32(6): 641-652.
- [8] 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): 14-22.
- [9] 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): 8-23.
- [10] 周德平, 官福久, 高建春, 等. 一次飞机播云的微物理效应分析. 气象科学, 2004, 24(4): 405-412.
- [11] 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.
- [12] 赵增亮. 层状云的微物理结构探测研究[D]. 北京: 北京大学, 2010.
- [13] 李冬楠, 刘星光, 高倩楠, 等. 一次东北冷涡过

- 程的宏微观物理特征分析[J]. 气象科技, 2021, 49(2): 227–234.
- [14] 封秋娟, 李培仁, 丁建芳, 等. 山西地区一次层状云降水过程的微观特征观测分析[J]. 大气科学学报, 2013, 36(5): 537–545.
- [15] 蔡兆鑫, 周毓荃, 蔡森. 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, 2013, 32(5): 1460–1469.
- [16] 王维佳, 董晓波, 石立新, 等. 一次秋季暖云微物理结构探测试验[J]. 气象科技, 2011, 39(5): 656–660.
- [17] Rosenfeld D, Lensky I M. Spaceborne sensed insights into precipitation formation processes in continental and maritime cloud[J]. Bull Amer-Meteor Soc, 1998, 79(11): 2457–2476.
- [18] 刘贵华, 余兴, 师春香, 等. FY-3A/VIRR 反演云微物理特征及与 TERRA/MODIS 反演结果的比较[J]. 高原气象, 2011, 30(2): 461–470.

Cloud Microphysical Characteristics Detection and Analysis based on Aircraft Observations during a Winter Stratiform Cloud Dispersal Period in the Sichuan Basin

ZHANG Yuan¹, FAN Sirui¹, LIU Xiaolu¹, WANG Weijia¹, WANG Qin², GENG Wei³

(1. Weather Modification Office of Sichuan Province, Chengdu 610072, China; 2. Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China; 3. Meteorological Disaster Prevention Center of Sichuan Province, Chengdu 610072, China)

Abstract: To investigate the cloud structure and microphysical characteristics of stratiform precipitation system in Sichuan Basin, the cloud microphysical data obtained by the airborne DMT detection system on December 18, 2019, were used to analyze the microphysical characteristics of a stratiform precipitation dissipation period in Sichuan Province by spatio-temporal series analysis method, combined with the upper air, ground, and satellite meteorological data. The results show that the detection cloud system is a low stability stratiform cloud in cloud top temperature, and the cloud top is dominated by small cloud droplets, corresponding to small surface precipitation. The vertical and horizontal structures of clouds in the air were uneven. The particle concentration ranges detected by the Cloud Droplet Probe (CDP), Cloud Imaging Probe (CIP), and Precipitation Imaging Probe (PIP) were $0.035\text{--}338.318\text{ cm}^{-3}$, $4.17\times 10^{-5}\text{--}18.203\text{ cm}^{-3}$ and $3.28\times 10^{-6}\text{--}0.408\text{ cm}^{-3}$ respectively, and the particle diameter ranges were $2.50\text{--}49$ respectively μm , $25.32\text{--}1547.18\text{ }\mu\text{m}$, $104.23\text{--}5525.68\text{ }\mu\text{m}$. With the increase in height, the range of particle concentration and particle diameter increases. According to the two-dimensional cloud particle image, supercooled water droplets and small ice crystal particles were mainly at about 2700–3000 m, and dendritic ice crystals and wide dendritic ice crystals was at about 4500–4800 m. Using the concentration of particles in the cloud detected by CDP probe and the concentration of large particles in the cloud detected by CIP probe as the two main indicators to judge the seeding degree in the cloud. The analysis revealed the presence of a "seeding area" in the cloud that was favorable for artificial precipitation enhancement. The "seeding area" exhibited a discontinuous distribution. The characteristics of the cloud particle spectrum at typical times were analyzed, and it is found that the cloud particle spectrum was multi-peak distribution, In general, the larger the cloud particle, the smaller its concentration. During this exploration process, there was a "seeding area" in the cloud that was conducive to artificial precipitation enhancement. The "seeding area" in the cloud showed a discontinuous distribution, and the seeding area for this flight was basically between $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$, with corresponding heights ranging from 4500 m to 4840 m.

Keywords: DMT; cloud precipitation; microphysical characteristics; artificial raincast reproductive