

张瑜, 银燕, 石立新, 等. 2007 年秋季河北地区云微物理结构的飞机探测分析[J]. 高原气象, 2012, 31(2): 530—537.

2007 年秋季河北地区云微物理结构的 飞机探测分析

张瑜^{1, 3}, 银燕^{1*}, 石立新², 段英², 吴志会²

(1. 南京信息工程大学 大气物理与大气环境重点实验室, 江苏 南京 210044; 2. 河北省人工影响天气办公室, 河北 石家庄 050021; 3. 中国人民解放军理工大学 气象学院, 江苏 南京 211101)

摘要: 利用 2007 年飞机探测资料, 对河北地区云微物理结构进行了分析。结果表明, 高层云底部云滴数大于中上部, 随高度增加粒子直径增大。最大云中液态水含量为 $0.25 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$, 底层平均云中液态水含量为 $0.025 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。层积云中上部数浓度高于底部, 云滴数浓度变化范围为 $10 \sim 80 \text{ cm}^{-3}$, 云滴平均直径为 $7.56 \mu\text{m}$, 总趋势随高度增加云滴直径先增大后减小。云滴谱变窄、双峰消失与含水量的起伏有一定的关系。综合增雨作业资料, 发现有时预设的飞机作业高度并不是十分合理, 在飞机性能条件允许的情况下, 可以适当提高或降低作业高度, 人工增雨的效果可能更好。鉴于作业层的温度, 9 月 29 日和 13 日可以考虑使用液氮或液态 CO_2 等制冷剂进行催化。

关键词: 云微物理结构; 飞机观测; 人工增雨

文章编号: 1000-0534(2012)02-0530-08 中图分类号: P426.5⁺1 文献标识码: A

1 引言

20 世纪 70 年代以来, 国际上在一些云和气溶胶的观测试验中开始应用机载测粒系统(PMS)。Hobbs et al^[1]通过对大量飞机观测 PMS 资料进行分析, 发现在层云和积云的顶部普遍存在过冷水层。Gorden et al^[2]分析了加利福尼亚雨带降水粒子尺度谱分布。Crabowski et al^[3]利用苏联冬季层状云观测到的云中冰晶、雪粒子浓度和尺度的分布特征, 通过计算得到粒子的含水量, 对了解云的结构特征, 进行云粒子谱分布的研究有很大作用。Robert et al^[4]分析了美国北科罗拉多州洛基山脉地区冬季风暴云中的层状云, 指出云滴谱与环境云滴数浓度有很大关系, 当浓度 $< 100 \text{ cm}^{-3}$, 粒子平均直径在 $15 \sim 18 \mu\text{m}$ 之间, 谱分布一般为双峰结构; 当数浓度增高时, 粒子谱变窄。

20 世纪 80 年代, 我国开始引进 PMS 探测系统。开展层状云降水研究始于游来光主持的“北方层状云人工降水试验”^[5]。李仑格等^[6]分析了 90 年

代青藏高原东部春季降水层状云和混合云系的微物理结构, 云层中平均液态水含量为 $0.05 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$, 平均冰晶浓度为 28.75 L^{-1} , 冰晶浓度较低, 有较大的人工催化能力。冯圆等^[7]分析了河南春季一次冷锋降水过程云的微物理结构, 结果表明, 冷锋前后云中粒子浓度、液态水含量以及粒子谱型存在较大差异, 锋前云粒子谱为单峰型, 锋面过境时谱型转变为双峰或多峰型。封秋娟等^[8]结合天气图、卫星云图及雷达回波等资料, 综合分析了热带气旋影响降水过程中云系的宏微观特征。王扬锋等^[9]利用 PMS 资料对延安降水性层状云各高度上的粒子特征量和粒子谱进行了分析研究, 结果表明, 存在过冷水滴和冰晶共存层, 冰晶快速增长, 此层的存在可能是发生降水的关键。随着云降水物理学研究的不断深入和发展, 以及各地开展的大量观测试验, 许多的新方法、新理论不断涌现^[10-20]。

根据河北省气候条件, 秋季大气中的水汽条件往往不足, 难以形成较好的降水天气, 水资源紧缺。秋季是河北地区冬小麦的播种季节, 一些地区

收稿日期: 2010-12-07; 定稿日期: 2011-05-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(41030962); 科技部公益性行业(气象)科研专项经费(GYHY200706036); 江苏省高校优势学科建设工程资助项目(PAPD); 江苏省高校优秀创新团队项目共同资助

作者简介: 张瑜(1981—), 女, 吉林省磐石人, 助教, 主要从事大气气溶胶、云降水研究。E-mail: zy22104@163.com

* 通讯作者: 银燕, E-mail: yinyan@nuist.edu.cn

往往因缺水而不能及时播种, 实施飞机人工增雨作业(催化对象主要为降水性层状云), 增加少量的降水就可以解决农民秋播问题。利用 PMS 探测仪对层状云微物理结构进行系统的观测和分析, 可以更好地选择最佳作业时机和作业部位, 提高人工催化的效果和几率, 缓解干旱缺水的状况^[21]。

本文利用 2007 年 9 月 13 日一次西风槽天气过程和 27~29 日受副热带高压(下称副高)影响, 冷锋过境天气过程中 3 架次飞行个例进行分析(4 次飞行过程的详细情况见表 1), 分析了降水性层状云的宏微观物理特征, 主要从层状云的云滴微物理参数的垂直分布和水平分布以及云系降水潜力进行综合分析, 并对人工增雨催化的可播性进行了讨论, 以期提高对河北地区秋季层状云降水机理的了解, 为人工增雨提供参考依据。

2 探测仪器

探测使用夏延 III A 飞机作为探测平台, 飞机上装载的探测仪器有 GPS 全球定位系统、温湿度探头、机载微波辐射计、红外线热线含水量仪、PMS 粒子测量系统等。整套 PMS 系统由 4 个主探头和有关资料收集设备组成(各探头具体探测范围和用途参见表 2)。仪器每秒钟采集一次数据, 粒子直径单位为 μm , 数浓度单位为 cm^{-3} 。

3 2 次云过程的微物理结构观测分析

云中液态水含量和云滴数浓度是云中重要的微物理要素之一, 特别是在人工增雨工作中这 2 个物理量显得尤为重要。河北省秋季降水性层状云多为层状冷云, 就层状冷云人工降水的潜力条件而言, 云中液态水含量和云滴数浓度是最重要的参数之一。本文选取 2007 年 9 月 13 日和 27 日进行层状云微物理结构分析。

3.1 云滴特征量的垂直分布

Hobbs^[22] 提出, 利用 FSSP-100 探头观测到云中直径 $>2 \mu\text{m}$ 的粒子总浓度超过 10 cm^{-3} 可看作云水区。本文在处理云滴资料时取云中液态水含量 $>10^{-4} \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$, 云滴总浓度 $>10 \text{ cm}^{-3}$ 时为云水区。为了研究云带的微观特征, 图 1 给出了 FSSP-100 探头观测到的不同云系的云滴数浓度、平均直径和云粒子液态水含量随高度的垂直分布。

13 日探测过程为飞机上升探测, 此次天气系统降水云系为高层云(As), 从图 1a 中看到, 云底高度约为 3 000 m, 云顶高 5 700 m。0 °C 层高度为 4 000 m。高层云云滴分布不均匀, 底部云滴数大于中上部, 云滴数变化范围在 $10 \sim 120 \text{ cm}^{-3}$ 之间。高层云云滴平均直径为 $9.21 \mu\text{m}$, 底部平均直径为 $8.19 \mu\text{m}$, 中上部平均直径为 $11.66 \mu\text{m}$, 底部小于中上部, 随高度增加粒子直径增大。云滴直径在 3 500 m 和 5 300 m 处出现极大值, 说明该高度处

表 1 2007 年 9 月 4 次飞行概况

Table 1 The introduction of four flight cases in September 2007

日期/(年-月-日)	飞行时间/北京时	飞行航线	天气系统
2007-09-13	10:02~12:07	正定—涉县—邯郸—邢台—宁晋—深泽—无极	西风槽
2007-09-27	08:41~11:44	正定—行唐—张家口—张北—张家口—行唐—正定	副高、冷锋
2007-09-28	19:41~23:21	正定—藁城—邢台—沙河—宁晋—赞皇—石家庄	副高、冷锋
2007-09-29	09:44~11:23	无极—鹿泉—元氏—邢台—邯郸—涉县	副高、冷锋

表 2 PMS 测粒系统简介

Table 2 The introduction of PMS specification system

设备名称	简称	探测范围	用途
气溶胶粒子探头	PCASP-100X	$0.1 \sim 3 \mu\text{m}$, 共 15 个档	探测气溶胶粒子
前向散射滴谱扩展量程探头	FSSP-100-ER	$1.0 \sim 95.0 \mu\text{m}$, 4 个量程, 各分 15 个档	探测云粒子
二维灰度粒子探头	OAP DGA-2 OAP DGB-2	$17.75 \sim 1567.75 \mu\text{m}$, 共 62 个档	获取二维粒子图象
GPS 卫星全球定位系统	—	—	精确获取探测平台方位
King LWC 热线含水量仪	—	—	获取液态水含量

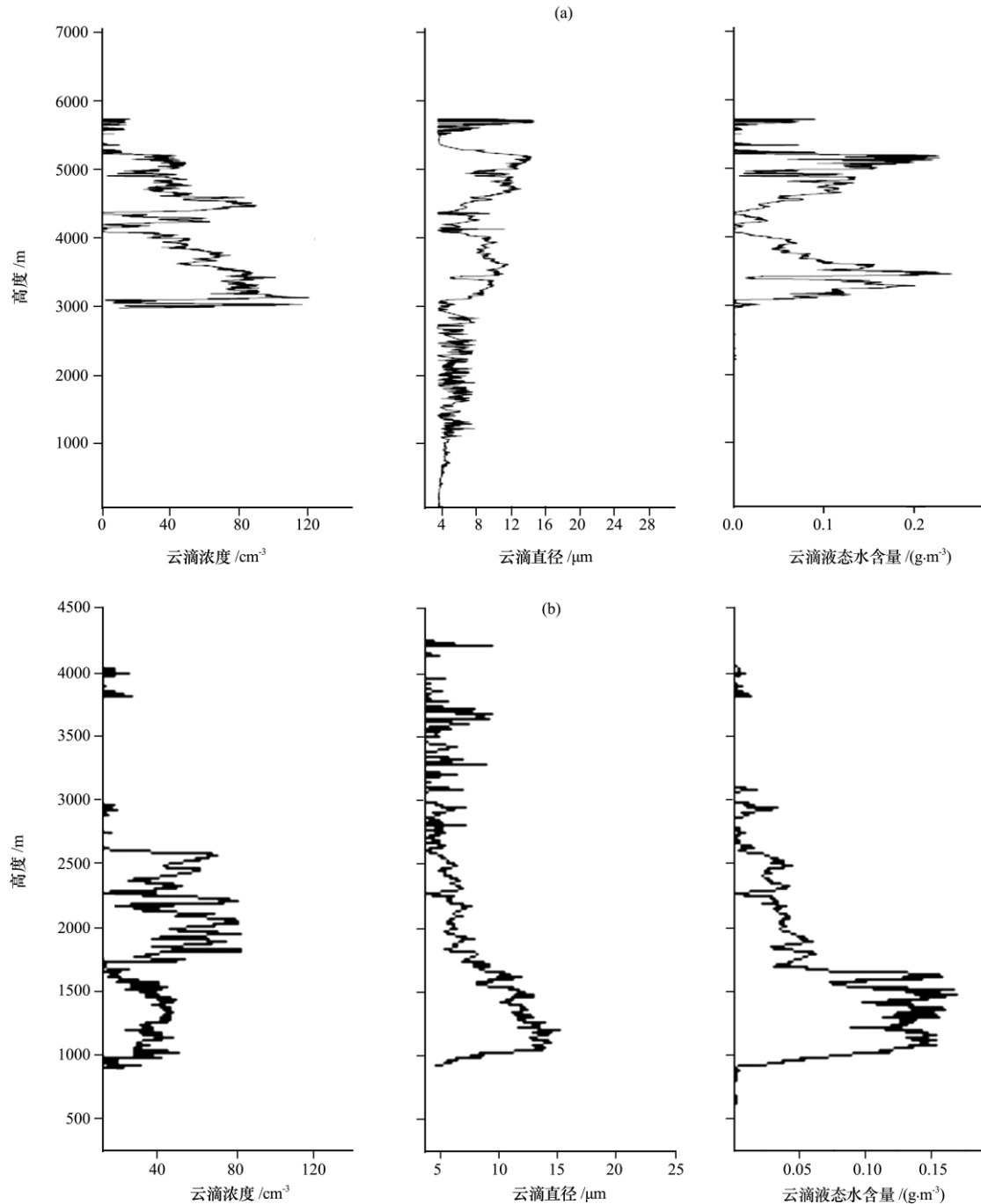


图 1 2007 年 9 月 13 日(a)和 27 日(b)云滴浓度、云滴直径和云中液态水含量随高度的垂直分布
取自 FSSP-100 探头

Fig. 1 The vertical distributions of cloud droplet concentration, mean diameter and liquid water content with height(from FSSP-100) on 13 (a) and 27 (b) September 2007

云滴和冰粒子增长活跃。从云中液态水含量分布曲线可看出,高层云云滴液态水含量分布不均匀,最大云水含量为 $0.25 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$,底层平均云中液态水含量为 $0.025 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$; $4100\sim 4300 \text{ m}$ 高度层内,出现液态水含量小值区,平均云中液态水含量仅为 $0.013 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$,导致该高度层内云滴和冰粒

子数出现谷值; $4300\sim 5200 \text{ m}$ 高度层内,平均云中液态水含量为 $0.088 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$;云层中上部云水含量大于中下部,云中液态水含量随高度增加。 $5200\sim 5500 \text{ m}$ 高度层内有干层存在、无云滴,此高度层内为大的气溶胶粒子,平均直径为 $3.5 \mu\text{m}$ 。

27日探测过程为飞机下降穿云探测,此次天

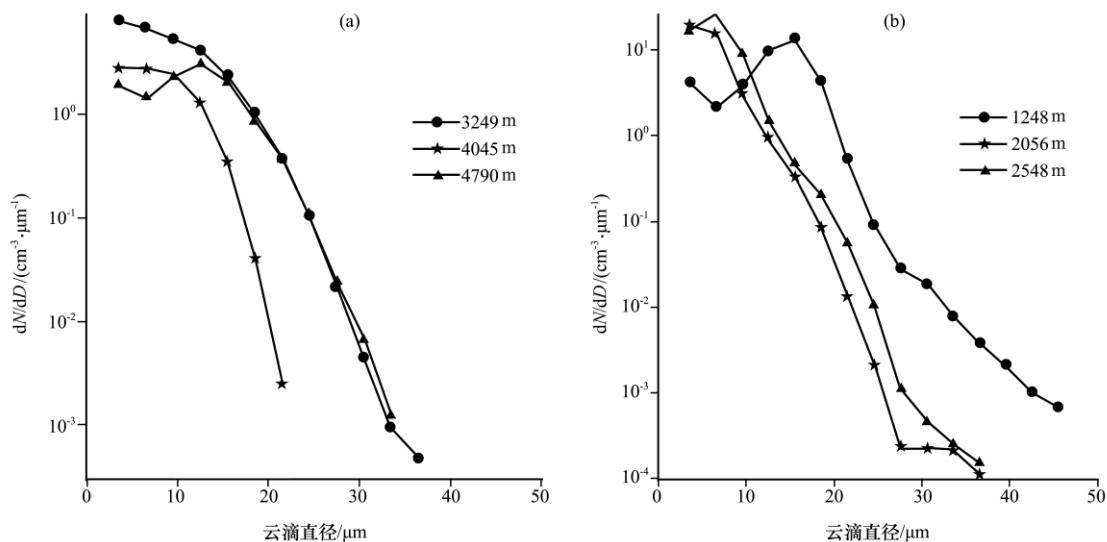


图 2 2007 年 9 月 13 日高层云 As(a)和 27 日层积云 Sc(b)云滴谱分布
取自 FSSP 探头

Fig. 2 The cloud droplet-size distribution of As cloud on 13 (a) and Sc cloud on 27 (b)
September 2007(from FSSP-100)

气系统降水云系为层积云(Sc)。从图 1b 中可看到,云底高度为 907 m。探测到的云体内云滴数浓度分布不均匀,在 1 700 m 处出现了一个小的谷值,中上部数浓度高于底部,云滴数浓度变化范围在 $10 \sim 80 \text{ cm}^{-3}$ 之间。3 100~3 700 m 高度层内无云滴,粒子为大的气溶胶粒子,且气溶胶浓度 $< 10 \text{ cm}^{-3}$ 。层积云云滴平均直径为 $7.56 \mu\text{m}$,云滴直径随高度先增大后减小,这与云滴液态水含量有关,在云底 1 200 m 高度处出现极值,为 $15.22 \mu\text{m}$; 1 750 m 以上液态水含量减少,云滴直径减小,平均直径为 $5.14 \mu\text{m}$ 。从云滴液态水含量垂直分布曲线可看到,云中液态水含量分布不均,平均含水量为 $0.0418 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$,最大含水量为 $0.169 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$,底部高于中上部,液态水含量随高度减小;云中液态水含量较大处云滴直径也较大,云滴数浓度较小。可见,云粒子液态水含量主要由大云滴提供。

3.2 云滴平均谱分布

研究云中粒子尺度谱的变化特征对于认识云微物理机制有着重要的意义。不同性质的云,由于云凝结核和上升气流不同,粒子浓度和谱型上有很大的差异。层状云云滴谱主要有单峰型、负指数型和双峰型,有时也会出现多峰型。云系结构的不同使得云滴在各高度层上表现出不同的谱分布,同高度上的谱型较为相似^[23]。图 2 给出了高层云、层积云云滴谱分布随高度的变化情况(每 200 m 做一次平均谱)。

上述分析表明,13 日云区飞机上升探测垂直高度为 3 000~5 700 m,27 日由 4 250 m 高度下降垂直探测,云区探测高度为 907~3 000 m。从图 2a 3 249,4 045,4 790 m 处 FSSP-100 粒子谱分布可以看出,云滴谱呈单峰分布,峰值位于 $3.5 \mu\text{m}$ 处,在 4 045 m 高度附近,云中液态水含量出现一个低值区(图 1a),导致大云滴数减少,粒子谱变窄,谱宽最大值为 $22 \mu\text{m}$ 。4 790 m 高度附近,云中液态水含量增加,水汽供应较多,导致 $> 10 \mu\text{m}$ 的粒子增多,粒子谱变宽,最大谱宽为 $37 \mu\text{m}$ 。从 1 248,2 056 和 2 548 m 处云粒子谱分布(图 2b)可以看出,在云底 1 248 m 处,云中液态水含量丰富,粒子谱最宽,最大谱宽达 $47 \mu\text{m}$;粒子谱呈双峰分布,峰值分别位于 $3.5 \mu\text{m}$ 和 $15 \mu\text{m}$ 处。随高度的增加,云中液态水含量逐渐减少,小云粒子增多,大粒子减少,云粒子谱逐渐变窄,最大谱宽减小到 $37 \mu\text{m}$,双峰消失,粒子谱呈单峰分布,峰值位于 $8 \mu\text{m}$ 处。该次探测云区正是由于冷锋产生的,谱分析结果与洪钟祥等^[24]的研究结果相吻合。由此可见,云滴谱的谱宽与云中液态水含量密切相关,粒子谱宽,云中液态水含量较丰富;粒子谱窄,云中液态水含量较少。

4 层状冷云催化可播性分析

根据 20 世纪 90 年代河北的观测经验:降水性层状云中,催化层高度在 4~5.5 km,对应温度在

表 3 飞机增雨作业实况

Table 3 Artificial precipitation enhancement operation

日期/(年-月-日)	预设作业高度/m	作业层温度/°C	0 °C层高度/m	结冰现象
2007-09-13	5100	-4.1~-4.7	4000	—
2007-09-27	5400	-2.7	4800	中度
2007-09-28	5400	-2.0~-3.3	4845	—
2007-09-29	5400	-2.0~-3.3	4857	轻度

-6~-13 °C, 且云系处于发展时期进行作业时, 有较好的催化效果^[25]。河北省近年来秋季增雨作业时, 在 4~5 km 高度层内, 大气温度一般高于 -6 °C(表 3), 温度比 90 年代高。对飞机作业时的结冰现象也做了统计, 由于有时是夜间飞行(28 日)或其他原因, 记录不全。有记录结冰现象共 2 次, 多出现于降水云系的中上部。结冰程度不一, 有时是轻度结冰, 有时是中度结冰, 结冰现象反映

出在降水性层状云中存在过冷水区。

陶树旺等^[26]研究认为, 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的发展, 并且当 FSSP 探测的粒子浓度 ≥ 20 个 $\cdot\text{cm}^{-3}$ 的云区才具有一定的可播性, 其中 2D-C 探测的大粒子浓度 $< 20 \text{ L}^{-1}$ 时, 可确定为强可播区, 否则为可播区。为了研究云中作业层的可播性, 图 3 给出了 13, 28, 29 日 3 次水

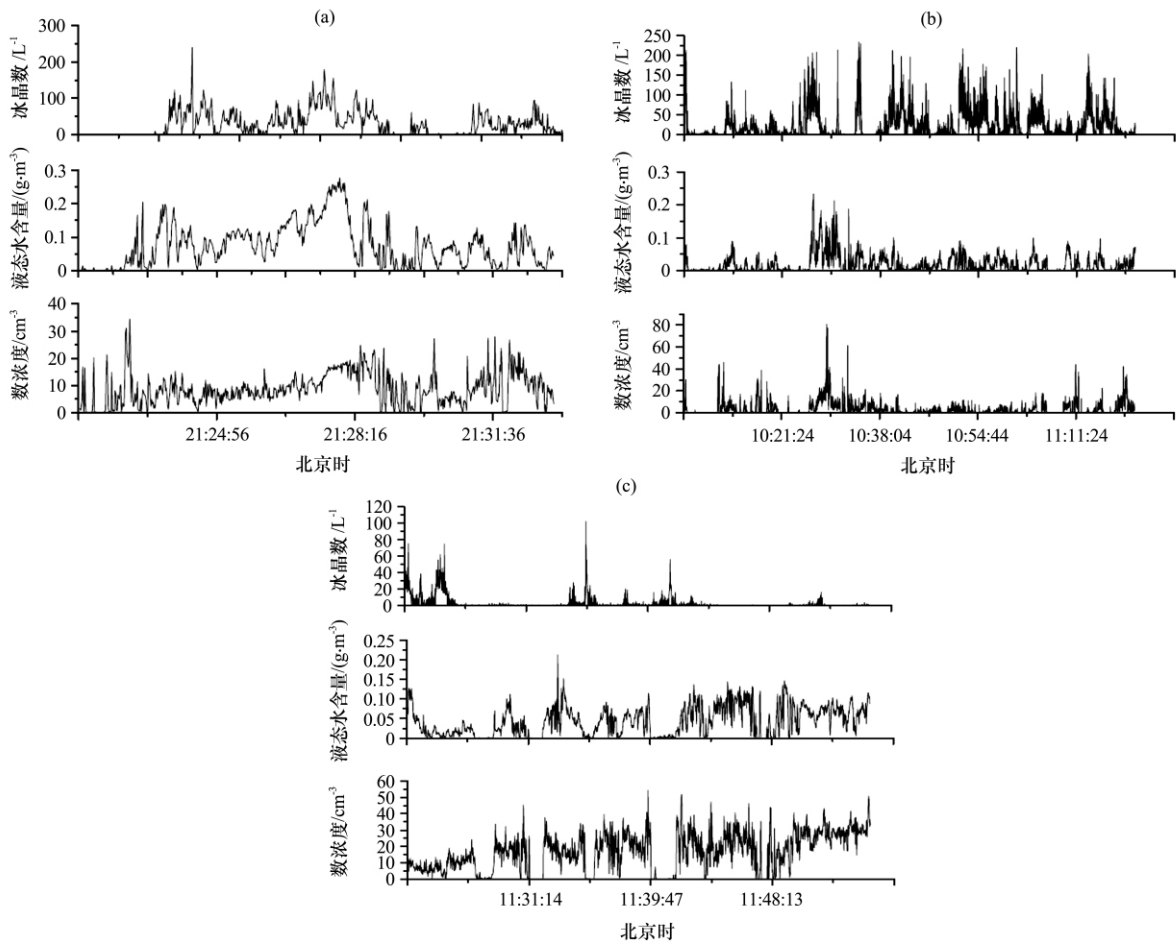


图 3 2007 年 9 月 28 日(a)、29 日(b)和 13 日(c)飞机水平穿云探测的云滴数浓度、云中液态水含量及冰晶数水平分布特征

(a) 4807 m, (b) 5420 m, (c) 4800 m

Fig. 3 The horizontal distribution characteristics of cloud droplet concentration, liquid water content and 2D-C number concentration on 28 (a), 29 (b) and 13 (c) September 2007

平作业时云粒子数浓度、2D-C 浓度以及液态水含量的分布情况。

图 3a 为 28 日增雨作业时 4 807 m 高度飞机水平探测云微物理特征量的水平分布情况。从图 3a 中可以看出, 该层大气环境温度为 2.56 °C, 云滴浓度最大值为 35 cm⁻³, 2D-C 数浓度最大值为 250 L⁻¹, 平均数浓度在 31 L⁻¹ 左右。云层中云中液态水含量丰富, 一般都在 0.05 g·m⁻³, 最大值达 0.28 g·m⁻³。该高度层云中液态水含量丰富, 冰晶数浓度较高, 但大气温度较高, 不适合催化, 飞机只是探测飞行, 没有实施人工催化。

图 3b 为 29 日增雨作业时 5 420 m 高度云微物理特征量水平分布情况。从图 3b 中可看出, 该层的大气环境温度为 -0.56 °C, 云滴数浓度最大值达 60 cm⁻³, 冰晶数浓度最大值为 225 L⁻¹, 平均数浓度在 25 L⁻¹ 左右, 云中液态水含量丰富, 最大值为 0.25 g·m⁻³, 具有可播性。根据胡志晋等^[27]的研究结果, 自然冰晶 < 20 L⁻¹ 时, 具有播撒潜力, 可用一般剂量催化剂; 自然冰晶 > 20 L⁻¹ 时, 采用的剂量应加大。由于该层自然冰晶浓度稍大于阈值 (20 L⁻¹), 作业层温度为 -0.56 °C, 因此对该云层使用碘化银催化是不合适的 (注: 河北增雨作业使用的催化剂是碘化银复合配方, 核化阈温为 -4 °C, 云室检测成核率在 -10 °C 以下为 1.03 × 10¹⁵ 个·g⁻¹)。图 3c 为 13 日增雨作业过程 4 800 m 高度云微物理特征量水平分布情况。从图 3c 中可看出, 该层大气温度为 -1.70 °C, 云区内云滴平均数浓度达 16.4 cm⁻³, 最大云滴数为 55 cm⁻³; 云中液态水含量丰富, 在 11:41~11:54 时间段内, 冷云区内液态水含量 > 0.1 g·m⁻³, 冰晶粒子几乎没有, 在这种情况下可播性很强。一些研究表明^[28-30], 液氮在 0~-5 °C 时, 成冰核率 > 1 × 10¹⁰ 个·g⁻¹。因此, 鉴于作业层的温度, 29 日和 13 日可以考虑使用液氮或液态 CO₂ 等制冷剂进行催化。

观测记录表明, 13, 28 和 29 日飞机预设增雨作业高度为 5 100, 5 400 和 5 400 m (表 3), 而实际作业高度为 4 800, 4 807 和 5 420 m。由此可见, 预设作业高度并不是十分合理, 在飞机性能条件允许的情况下, 可以适当提高或降低作业高度, 人工增雨的效果可能会更好。

从云物理学角度出发, 结合前人的分析经验, 对层状冷云, 在负温区一定范围内有一定量的过冷水存在, 一般认为过冷水含量 > 0.1 g·m⁻³, 且存在一段时间, 认为有一定的降水催化潜力, 并将

此区称为人工降水催化潜力区。按照 PER 定义降水潜力为

$$\eta = K_1/K, \quad (1)$$

其中: K 为在负温区总飞行时间; K_1 为在负温区飞行过程中过冷水含量 > 0.1 g·m⁻³ 的飞行时间; η 表示具有过冷水含量的云层 (有催化潜力的云层) 占整个探测云层的百分比。表 4 给出了 2007 年 9 月 13 日和 29 日降水潜力的估算值。

表 4 2007 年 9 月 13 日和 29 日降水潜力估算

Table 4 The estimation of precipitation enhancement potentials on 13 and 19 September 2007

日期/日	云系	K/s	K_1/s	$\eta/\%$
13	As	1921	801	41.2
29	Sc	4595	600	10.9

从以上分析结果来看, 13 日降水潜力较大, 通过地面场站的观测记录来看, 当天作业区普降小到中雨, 与推算潜力相符。

5 结论

(1) 高层云底部云滴数大于中上部, 云滴数变化范围在 10~120 cm⁻³ 之间, 云滴平均直径为 9.21 μm, 底部平均直径为 8.19 μm, 中上部平均直径为 11.66 μm, 随高度增加粒子直径增大; 最大云中液态水含量为 0.25 g·m⁻³, 底层平均云中液态水含量为 0.025 g·m⁻³。层积云中上部数浓度高于底部, 云滴数浓度变化范围在 10~80 cm⁻³ 之间; 云滴平均直径为 7.56 μm, 总趋势随高度增加云滴直径先增大后减小。平均液态水含量为 0.042 g·m⁻³, 最大云中液态水含量为 0.169 g·m⁻³, 底部高于中上部, 云中液态水含量随高度减少。

(2) 云滴谱的谱宽与云中液态水含量密切相关, 粒子谱宽, 云中液态水含量较丰富; 粒子谱窄, 云中液态水含量较少。

(3) 鉴于作业层的温度, 29 日和 13 日不适合使用 AgI 进行催化, 可以考虑使用液氮、液态 CO₂ 等制冷剂进行催化。根据公式推算, 13 日降水潜力较大, 与实际情况相符合。

(4) 有时预设的飞机作业高度并不是十分合理, 在飞机性能条件允许的情况下, 可以适当提高或降低作业高度, 人工增雨的效果可能更好。

参考文献

- [1] Hobbs P V, Rangno A L. Ice particale concentrations in clouds[J]. J Atmos Sci, 1985, 23: 2523—2549.
- [2] Gordien G L, Marwitz J D, et al. Hydrometeor distributions in California rainbands[C]. Conference on Cloud Physis, 1982: 207—210.
- [3] Crabowski, Wu W X, Moncrieff M. Cloud resolving modeling of tropical clouds systems during Phase III: Effects of cloud microphysics[J]. J Atmos Sci, 1999, 56: 2384—2402.
- [4] Robert R M, Grant Lewis O. The characteristics and distribution of cloud water over the mountains of northern Colorado during wintertime storms. Part II: Spatial distribution and microphysical characteristics[J]. J Appl Meteor, 1986, 25: 589—504.
- [5] 李大山. 人工影响天气现状与展望[M]. 北京: 气象出版社, 2000: 358—360.
- [6] 李仑格, 德力格尔. 高原东部春季降水云层的微物理特征分析[J]. 高原气象, 2001, 20(2): 191—196.
- [7] 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.
- [8] 封秋娟, 牛生杰, 雷恒池, 等. 吉林省一次层状云降水宏微观特征的观测研究[J]. 南京气象学院学报, 2007, 30(6): 770—778.
- [9] 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, 2006, 26(2): 388—395.
- [10] 苏正军, 王广河, 刘卫国, 等. 青海省春季降水云的微物理特征分析[J]. 应用气象学报, 2003, 14(增刊): 36—40.
- [11] 黄梦宇, 赵春生, 周广强, 等. 华北地区层状云微物理特征及气溶胶对云的影响[J]. 南京气象学院学报, 2005, 28(3): 360—368.
- [12] 杨文霞, 牛生杰, 魏俊国, 等. 河北省层状降水云系统微物理结构的飞机观测研究[J]. 高原气象, 2005, 24(1): 84—90.
- [13] 王扬锋, 雷恒池, 吴玉霞, 等. 延安层状云暖层中水凝物粒子的谱分布[J]. 南京气象学院学报, 2005, 28(6): 787—793.
- [14] 牛生杰, 马铁汉, 管月娥, 等. 宁夏夏季降水性层状云微结构观测分析[J]. 高原气象, 1992, 11(3): 241—248.
- [15] 赵仕雄, 陈文辉, 杭洪宗. 青海东北部春季系统性降水高层云系微物理结构分析[J]. 高原气象, 2002, 21(3): 281—287.
- [16] 刘健, 李茂伦, 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—615.
- [17] 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): 583—589.
- [18] 牛生杰, 何珍珠. 降水性层状云中水凝物粒子的谱分布[J]. 高原气象, 1995, 14(2): 114—119.
- [19] 张王伟, 刘晓莉, 桑建人, 等. 宁夏夏季层状暖云降水观测研究[J]. 高原气象, 2011, 30(2): 471—481.
- [20] 洪延超, 李宏宇. 一次锋面层状云云系结构、降水机制及人工增雨条件研究[J]. 高原气象, 2011, 30(5): 1308—1324.
- [21] 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[C]. WMO云的微物理及其对全球气候变化的应用科学研讨会, 加拿大, 1992.
- [22] Hobbs P V. Twenty years of airborne research at the University of Washington[J]. Bull Amer Meteor Soc, 1991, 11(72): 1707—1716.
- [23] Kenneth Sassen. Deep orographic cloud structure and composition derived from comprehensive remote sensing measurements[J]. Climate Appl Meteor, 1984, 23: 568—583.
- [24] 洪钟祥, 黄美元. 南岳云滴谱第二极大及其他特征, 我国云雾降水微物理特征研究[M]. 北京: 科学出版社, 1965: 18—29.
- [25] 吴志会. 河北省春夏季层状云微物理结构及人工增雨潜力的初步研究—云降水物理和人工增雨技术研究[M]. 北京: 气象出版社, 1994: 83—88.
- [26] 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.
- [27] 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(增刊): 10—13.
- [28] 曹学成, 韩光, 王美玲, 等. 液氮成冰核效率的小云室试验[M]//北京市人工影响天气办公室. 液氮人工增雨技术的应用研究. 北京: 北京市人工影响天气办公室, 1995: 13—16.
- [29] 任捷. 液氮小云室试验结果与分析[M]//北京市人工影响天气办公室. 液氮人工增雨技术的应用研究. 北京: 北京市人工影响天气办公室, 1995: 9—12.
- [30] 莫天麟, 张瑞莲, 雷连科, 等. 降雨弹催化剂改进试验[J]. 气象科学, 1980, 1(2): 104—111.

Analysis of Cloud Microphysics Structure over Hebei Region during Autumn of 2007

ZHANG Yu^{1,3}, YIN Yan¹, SHI Li-xin², DUAN Ying², WU Zhi-Hui²

(1. Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;

2. Hebei Provincial Office of Weather Modification, Shijiazhuang 050021, China;

3. Institute of Meteorology, PLA University of Science & Technology, Nanjing 211101, China)

Abstract: The cloud microphysical properties are analyzed based on the aircraft measurements conducted over Hebei region, Northern China during autumn of 2007. The results show that the droplet number on the bottom layer of altostratus is greater than that on the upper layer, and the particle diameter increases with height. The maximum content of liquid water is $0.25 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$, and the average content of liquid water is $0.025 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ at the bottom. It is also shown that the concentration of cloud droplet on the upper layer were higher than that on the bottom, the droplet number concentration ranges from 10 to 80 cm^{-3} . The diameters are around $7.56 \mu\text{m}$, with height increasing the particle diameter increases first and then decreases. Cloud droplet spectrum narrows and the disappearance of two peaks are cloud droplet related with the change of water content. Comprehensive analysis of cloud microphysics structure suggests that planning in advance the flying pattern is possibly not the best scheme for cloud seeding in some cases, and the seeding operation should be designed based aircraft condition and weather as well as cloud conditions. In view of the temperature, it could be considered using the catalytic of liquid nitrogen or liquid CO_2 .

Key words: Microphysical structure of Cloud; Airborne measurement; Cloud seeding