

三江源层状云系微物理结构特性的飞机观测研究

王黎俊^{①②*}, 康晓燕^{①②}, 王启花^{①②}, 郭世钰^②, 韩辉邦^{①②}

①青海省人工影响天气办公室, 青海 西宁 810001;

②青海省气象灾害防御技术中心, 青海 西宁 810001;

*联系人, E-mail: srshine@163.com

2024-00-00 收稿, 2024-00-00 接受

青海省基础研究计划项目 (2020-ZJ-711); 第二次青藏高原综合科学考察研究 (2019QZKK0104)

摘要 利用在三江源飞机观测试验期间机载粒子测量系统 (PMS) 对一次春季典型层状云系进行分层垂直探测的资料, 研究了云系的微物理结构特性。结果表明, 春季典型层状云系由 3 层云层组成, 卷层云 (Cs) 为冰云, 分为上、下两层的高层云 (As) 为过冷混合态云, 过冷水高值区位于下层高层云的中上至中下部位, 在其中下部过冷水含量及云粒子浓度最大, 具有较明显的地区特性。过冷水高值区的液态云粒子主要是中值直径在 $3.5\mu\text{m}$ - $27.5\mu\text{m}$ 范围内的云滴, $30.5\mu\text{m}$ 以上云粒子基本上为冰相。在下层高层云中上部的过冷水高值区有较明显的淞附增长现象, 而中下部存在较明显的“冰晶效应”。在下层高层云过冷水高值区, 过冷水含量比率的平均值达 $90.8\pm 10.9\%$, 且其中部至中下部位处 ($95.6\pm 5.6\%$) 明显高于中上部 ($79.8\pm 12.1\%$), 为人工增雨作业催化提供了有利条件。

关键词 三江源; 层状云系; 飞机观测; 机载粒子测量系统 (PMS)

三江源是长江、黄河和澜沧江的发源地, 地处青海省南部, 青藏高原腹地, 是生态环境脆弱的典型区域, 也是中国乃至东亚地区重要的水资源保护区 (靳铮等, 2020; 姚秀萍等, 2022)。该地区的冷锋降水云系是开展三江源生态修复型飞机人工增雨作业的主要目标云系 (赵仕雄等, 2003)。

目前对云的认识, 特别是准确的定量化描述仍然十分缺乏 (郭学良, 2013), 飞机观测仍然是直接获取云粒子相态的唯一手段, 因而飞机观测研究依然是未来云降水物理研究十分重要的组成部分 (郭学良等, 2021)。在利用飞机机载云粒子测量系统 (Particle Measuring System, PMS) 对不同地区锋面云系及混合态云垂直结构及微物理特性的飞机观测研究表明, 美国大平原地区中层混合态云中存在着复杂的动力、热力结构 (Fleishauer et al., 2002), 阿拉斯加地区云滴增长机制主要是凝结增长 (McFarquhar et al., 2007), 与北

29 极地区过冷层上部云粒子的谱分布基本一致(Lawson and Zuidema,2009), 但加拿大地区的过冷层中液水含
30 量、冰水含量均随温度降低而减小 (Korolev et al.,2003)。基于国内利用同期改进型 PMS 系统的飞机观测
31 研究 (杨文霞等, 2005; 王扬锋等, 2007; 张佃国等, 2011a) 和同类 DMT(Droplet Measurement Technology)
32 机载云微物理测量系统 (黄敏松等, 2021) 对锋面云系及层状冷云的观测结果 (张佃国等, 2011b; 封秋娟等,
33 2014; 王元等, 2017; 蔡兆鑫等, 2013; 彭冲等, 2016; 杨文霞等, 2018), 同样表明在不同地区的云系结
34 构及微物理特征存在着复杂性和多变性。同时, 在人工增雨领域云中液态过冷水含量是极为重要的参数
35 (雷恒池等, 2008), 区分混合态云中液态水和冰相粒子, 特别是 $5\mu\text{m}$ - $50\mu\text{m}$ 云粒子相态的判断是识别云
36 中过冷水的关键问题 (Field et al.,2004)。在不同地区、不同云系中的云粒子相态同样差异较大, 加拿大试
37 验发现混合态云中大于 $30\mu\text{m}$ 的云粒子是冰晶粒子 (Cober, et al.,2001), 而另一锋面云系液态过冷云中的
38 平均体积直径为 $10\mu\text{m}$ - $12\mu\text{m}$ (Korolev, et al.,2003), 三江源秋季高层云中液态云粒子集中在中值直径在
39 $3.5\mu\text{m}$ - $21.5\mu\text{m}$ 尺寸范围内 (王黎俊等, 2013a), 太行山东麓层状云云滴主要集中在 $4.5\mu\text{m}$ - $30\mu\text{m}$ (杨洁帆
40 等, 2021)。

41 2003 年至 2004 年期间, 由多部门联合, 首次利用 PMS 系统在该地区开展了飞机观测试验, 取得了
42 多架次冷锋降水云系的垂直分层探测资料。近年来, 装备有 DMT 系统的高性能飞机在该地区进行了探测
43 飞行, 但由于飞行最低安全高度等因素及实际飞行条件的限制 (韩辉邦等, 2022), 很难取得海拔高度 6000m
44 以下的观测资料。本文选取 2004 年对云系进行完整分层垂直探测的飞机观测资料, 在对云粒子相态进行
45 综合判别的基础上, 探究云系微物理结构特性。本研究对提高该地区典型层状云系微物理特征的认识,
46 优化飞机人工增雨作业技术具有重要的现实意义。

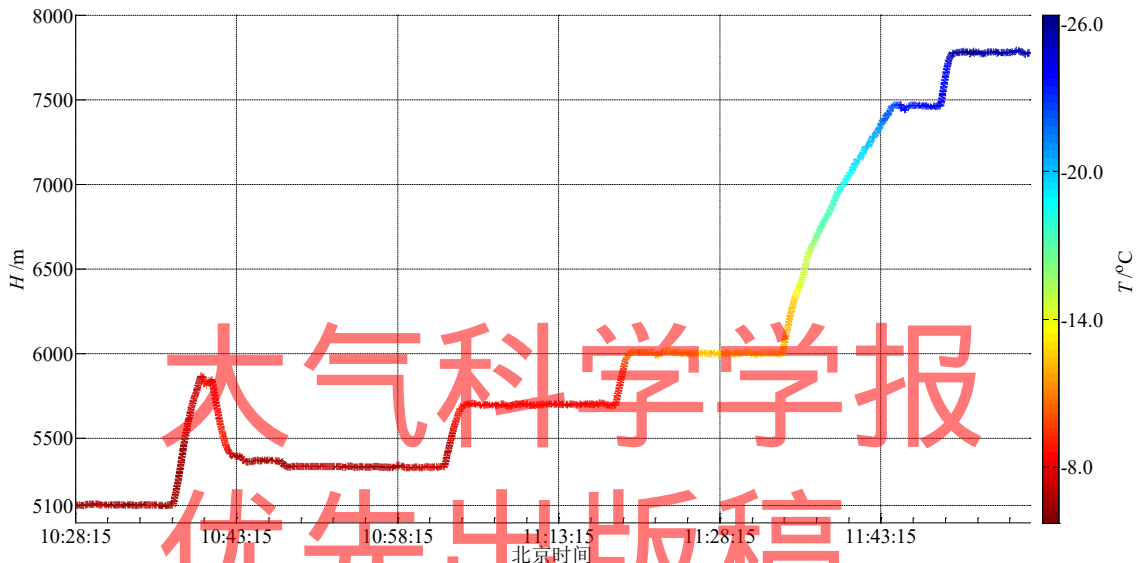
47 1 飞机观测资料和方法

48 1.1 天气过程概况与飞行观测

49 受西南暖湿气流和冷空气共同影响, 2004 年 5 月 13-14 日三江源自西向东出现系统性降水天气过程。5
50 月 13 日上午试验区处于槽前暖湿气流中, 飞机观测的层状云系为典型的冷锋降水云系。飞机抵达试验区后,
51 下降高度至云系底部, 10:28-11:48 期间, 在青海省河南县气象站 ($34^{\circ}44'N, 101^{\circ}36'E$; 3500m) 西北方向约 10km、
52 泽库县气象站 ($35^{\circ}2'N, 101^{\circ}28'E$; 3663m) 西南方向约 15km 的上空, 对云系分 6 层实施分层垂直探测, 探测
53

54 飞行共约 1h20min。地面气象观测表明河南、泽库 2 站 08:00、14:00 云状均为蔽光高层云 (Asop)。

55 如图 1 所示, 飞行观测过程中大气温度随时间的演变符合该地区冷锋降水云系的垂直高度特征。飞行宏
56 观观测显示云系自上而下为卷层云-上层高层云-下层高层云 (Cs-上层 As-下层 As) 配置, 中间明显存在 2 层
57 干层。10:28 飞机降低高度至海拔高度 (H) 5100m, 以固定始航点、折返点的方式, 自下而上, 从下层 As 云
58 底开始盘旋平飞探测后, 盘旋爬升, 调整高度, 分别在下层 As 云中下部、中上部、顶部和 Cs 云底部、顶部,
59 即 5350m、5700m、6000m 层和 7500m、7800m 层平飞探测。每层探测水平距离约 50km。



60 图 1 分层垂直探测飞行的航迹示意图
61 Fig.1 The flight track of layered itinerant vertical detection
62
63

64 整个云系在 0°C 层以上, 无明显逆温出现。在云系下层 As 底部和中下部位平飞探测时温度变化幅度较
65 大, 但均未超过 1.5°C , 各高度层基本上可代表其相应的温度层。自下而上, 各平飞探测层平均温度依次为:
66 -8.9°C 、 -9.2°C 、 -10.4°C 、 -13.6°C 、 -23.2°C 、 -24.7°C 。探测飞行结束约 20min 后, 河南站、泽库站均出现降水,
67 稳定持续至次日凌晨结束, 过程降水量分别为 9.8mm、11.3mm。13 日 20:00 时河南站、泽库站云状也均为
68 Asop。

69 1.2 观测仪器、误差及资料处理

70 观测试验前, 对前向散射粒子谱探头 FSSP-100 (简称 FSSP)、二维灰度云粒子探头 OAP-2D-GA2 (简称
71 为 2DC) 和热线液态含水量仪 King-LWC-5 (简称 King) 进行了系统标定, 并对 King 探头进行了晴空飞行校
72 准, 飞行前维护良好, 观测时运行稳定, 数据质量可靠。探测时因云中未出现降水粒子, 二维灰度降水粒子
73 探头未观测到资料。

74 1.3 微物理量的计算方法

75 本文以 N_1 、 D_{m1} 分别表示 FSSP 所测的总数浓度、平均直径, 以 $N_2 (>50)$ 、 $D_{m2} (>50)$ 分别表示 2DC 所测

76 $D_j \geq 54.88 \mu\text{m}$ 以上测量通道内云粒子的总数浓度、平均直径。其中, N_1 单位为 cm^{-3} , D_{m1} 单位为 μm ; $N_2 (>50)$
77 单位为 L^{-1} , $D_{m2 (>50)}$ 单位为 μm 。 D_i 、 $n(D_i)$ 为 FSSP 第 i 测量通道的中值直径 (单位: μm)、粒子数浓度分
78 布函数 (单位: $\text{cm}^{-3}/\mu\text{m}$); D_j 、 $n(D_j)$ 为 2DC 第 j 测量通道的中值直径 (单位: μm)、粒子数浓度分布函数 (单
79 位: $\text{L}^{-1}/\mu\text{m}$)。总含水量 TWC (Total Water Content) 为液态含水量 LWC (Liquid Water Content) 和冰相含水
80 量 IWC (Ice Water Content) 之和。King 探头实测云中液态水含量 LWC (记为 LWC_{King})、FSSP 所测含水量
81 LWC_{FSSP} 、冰相含水量 IWC、总水量 TWC 单位均为 g/m^3 。过冷水含量比率 f_l (fraction of liquid water) 为混
82 合态云中液态过冷水含量 LWC 占总含水量 TWC 的比率 (单位: %)。

83 1.4 云粒子相态的判定方法

84 对于 2DC 量程内云粒子相态的判别, 本文采用 McFarquhar and Heymsfield(1996)的判据, 以 2DC 图像灰
85 度投影数据判别粒径大于 $125 \mu\text{m}$ 云粒子的相态; 采用 McFarquhar (2007) 的方法, 以 2DC 图像是否为非球
86 形判别 $50 \mu\text{m}$ 至 $125 \mu\text{m}$ 尺寸范围内的云粒子是否为冰晶。对于 FSSP 量程内云粒子相态的判别, 本文综合
87 FSSP 云粒子瞬时谱特性、 LWC_{FSSP} 与 LWC_{King} 的差异、King 探头实测值与 FSSP 量程内一定尺度范围内云粒
88 子含水量计算值的对称相关性来判别 FSSP 量程内云粒子的相态。

89 1.5 云的界定

90 本文根据三江源地区飞行宏观观测的实际情况, 并参照李照荣等 (2003)、张瑜等 (2012)、秦彦硕等 (2017)
91 和陆春松等 (2021) 的处理方法, 以 $N_2 (>50) > 0.1 \text{L}^{-1}$ 为冰云阈值, 以 $\text{LWC}_{\text{FSSP}} > 10^{-3} \text{g}/\text{m}^3$ 为混合态云阈值。

92 2 研究结果

93 2.1 云微物理量的垂直分布特征

94 图 2 为云系垂直分层结构示意图和 FSSP、2DC、King 探头观测值随高度的分布图。飞行宏观观测显示
95 Cs 位于约 7400m - 7800m 高度处, 厚约 300m - 400m , 云体呈白色丝缕状。分为上下两层的 As 分别位于约 6400 -
96 6600m 、 5100 - 6200m 高度处, 中间有约 200m 的干层。上层 As 为厚约 150 - 200m 的絮雾状松散透光云层, 下
97 层 As 为厚度达 1100m 的密实云层。

98

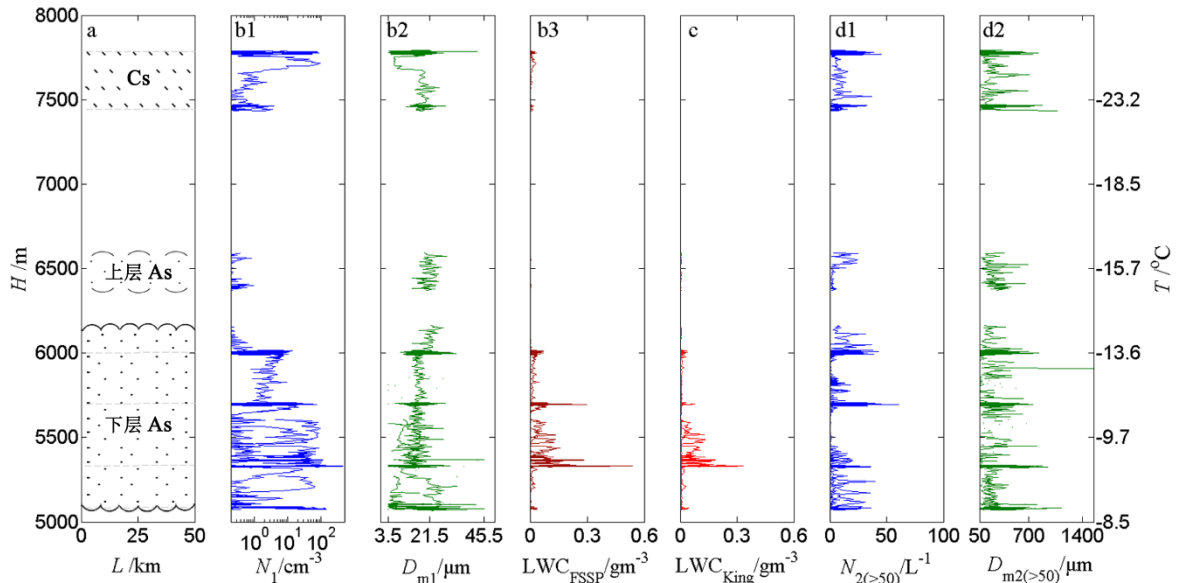


图 2 云系垂直分层结构图 (a) 和 N_1 (b1)、 D_{m1} (b2)、 LWC_{FSSP} (b3)、 LWC_{King} (c)、 $N_{2(>50)}$ (d1)、 $D_{m2(>50)}$ (d2) 随海拔高度的垂直变化

Fig. 2 The layered vertical structure of the cloud system with altitude. (a is the cloud system height distribution. b1 is N_1 . b2 is D_{m1} . c is LWC_{FSSP} . d1 is $N_{2(>50)}$. d2 is $D_{m2(>50)}$.)

由图 2 可见, FSSP 和 2DC 在 Cs、上层 As、下层 As 中都观测到云粒子存在 (图 2b1、b2、b3 和 d1、d2), 在 Cs 和上层 As 中 King 探头均未观测到液态过冷水 (图 2c)。由图 2b1、b2、b3 和 c 可见, Cs 云中 FSSP 观测到有浓度较高且直径较大的云粒子存在, 但 LWC_{FSSP} 很小, 表明其较大尺度云粒子浓度远远小于下层 As。上层 As 云体很稀疏, 云粒子零散分布。只有在下层 As 中 FSSP 观测到有浓度较高而直径较小的云粒子呈垂直连续分布。其中, 在下层 As 中上部、中下部位 (5700m 层、5350m 层) LWC_{FSSP} 和 LWC_{King} 均出现极值, LWC_{King} 最大值达 $0.33\text{g}/\text{cm}^3$ 。 LWC_{FSSP} 与 LWC_{King} 的垂直分布变化趋势一致, 但数值有明显差异。由图 2d1 和 d2 可见, 在 Cs、上层 As 和下层 As 中 2DC 都观测到大尺寸云粒子连续分布, $N_{2(>50)}$ 和 $D_{m2(>50)}$ 的极大值出现下层 As, 即位于云系底层的下层 As 中 $50\mu\text{m}$ 以上的云粒子浓度最高、谱宽最大。

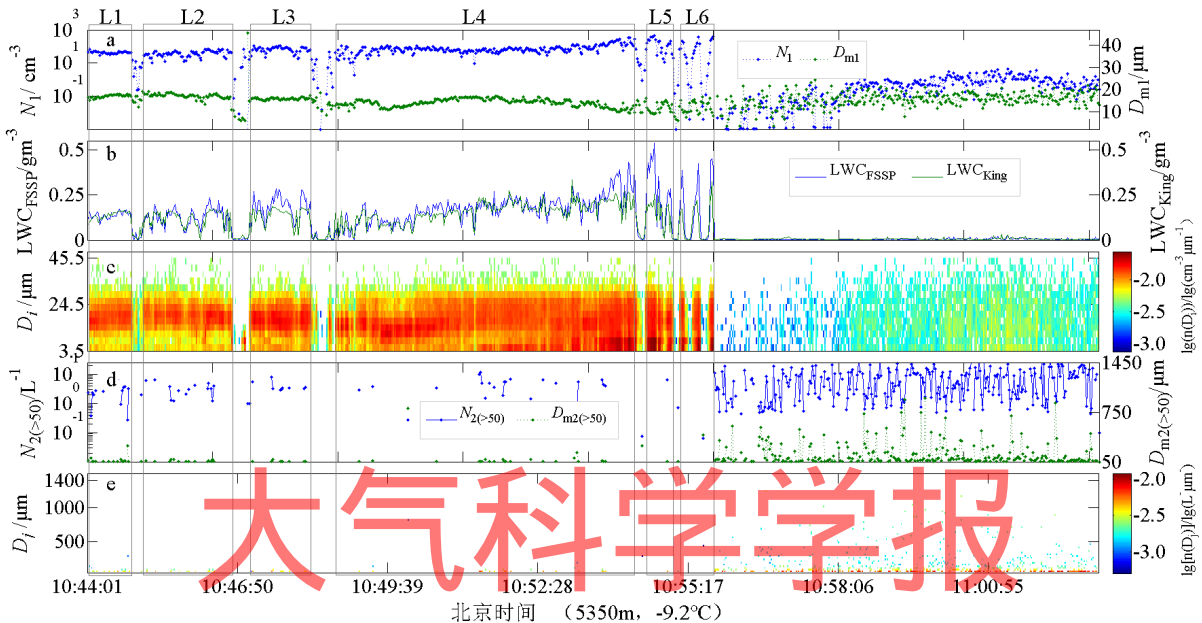
将下层 As 中的微物理量值, 与中国北方地区类似云型及三江源地区秋季的观测结果 (王黎俊等, 2013a) 比较表明, 该地区 As 的 FSSP 所测平均浓度明显高于中国北方内陆地区的层状云系, 且高于该地区秋季观测结果, 具有较为明显的地区特征, 这主要与三江源地区充沛水汽有关 (赵仕雄等, 2003)。

2.2 各云层云粒子水平分布特征及相态的判别

2.2.1 下层 As 中下部位

118 (1) 下层 As 中下部位云微物理量水平分布特征

119 在下层 As 云底 (5100 层) 平飞探测时, 时有云隙出现, 且无明显过冷水高值区出现, 因此本文对该层
120 资料不作单独分析。图 3 给出了 10:44:01-11:02:57 在下层 As 中下部位 (5350m 层, -9.2°C) 平飞时 FSSP、
121 2DC、King 探头观测的粒子浓度、直径、瞬时谱和含水量。



122

123 图 3 下层 As 中下部位的 N_1 和 D_{m1} (a)、 LWC_{FSSP} 和 LWC_{King} (b)、FSSP 瞬时谱 (c) (单位: $\lg(\text{cm}^{-3} \cdot \mu\text{m}^{-1})$)、
124 $N_{2(>50)}$ 和 $D_{m2(>50)}$ (d)、2DC ($D > 50\mu\text{m}$) 瞬时谱 (e) (单位: $\lg(\text{L}^{-3} \cdot \mu\text{m}^{-1})$) 随时间的水平变化

125 Fig. 3 The horizontal distribution of the middle-lower level As over time (a: N_1 and D_{m1} . b: LWC_{FSSP} and LWC_{King} .
126 c: FSSP instantaneous spectrum($\lg(\text{cm}^{-3} \cdot \mu\text{m}^{-1})$). d: $N_{2(>50)}$ and $D_{m2(>50)}$. e: 2DC($D > 50\mu\text{m}$) instantaneous spec-
127 trum ($\lg(\text{L}^{-3} \cdot \mu\text{m}^{-1})$).

128

由图 3a 可以发现, 下层 As 中下部的 N_1 水平分布差异较大, 高、低值区相差 2-3 个量级, 最大值可达

129

450 cm^{-3} 。当 N_1 超过 10cm^{-3} 以上时, 有明显的 LWC_{FSSP} 、 LWC_{King} 高值区 (均 $>0.1\text{g}/\text{cm}^3$) 出现 (L1-L6 区) (图

130

3b), D_{m1} 集中在 $15\mu\text{m}$ - $20\mu\text{m}$ 间。而当 N_1 小于约 1cm^{-3} 时, D_{m1} 及 $n(D_i)$ 呈离散分布, 无明显液态过冷水区出

131

现。

132

同时, 由图 3b 可见, LWC_{FSSP} 与 LWC_{King} 变化趋势基本相同, 而在过冷水高值区 LWC_{FSSP} 明显高于 LWC_{King} ,

133

且 N_1 越大、 LWC_{FSSP} 越大, 与 LWC_{King} 差异越明显 (见 L5-L6)。结合图 3c 可知, FSSP 量程内不同尺寸云粒

134

子 $n(D_i)$ 的不同变化是造成这种差异的原因。

135

进一步由 FSSP、2DC 所测的云粒子瞬时谱 (图 3c、e) 可见, 其谱分布在过冷水高、低值区存在明显差

136 异。结合图 3d 所示, 在下层 As 中下部 2DC 所测大尺寸云粒子主要出现在过冷水低值区, $N_{2(>50)}$ 集中在 1-20L⁻¹
137 范围内, $D_{m2(>50)}$ 离散分布, 最大直径在 1000 μm 以上。而在过冷水高值区, 2DC 几乎未观测到大尺寸云粒
138 子。表明在该云层中, 一方面因充沛的水汽供应及饱和水汽压, 小尺寸云粒子由凝结产生, 并不断凝结增长,
139 但这种云滴增长方式很难产生较大尺寸云粒子 (见 L1-L6); 另一方面, 因相对于冰面的过饱和水汽压, 使较
140 小尺寸的冰相云粒子迅速凝华增长, 并不断使较小的液态云粒子蒸发变小, 而越小的液态云粒子蒸发越快。
141 在 L1-L3 过冷水高值区, 3.5 μm -9.5 μm 尺寸范围内云粒子的 $n(D_i)$ 明显小于 12.5 μm -27.5 μm 云粒子 (图 3c)。
142 同时, 由过冷水低值区的 FSSP、2DC 瞬时谱 (图 3c、e) 分布表明, 由前述“冰晶效应”产生的大量冰晶粒
143 子, 不断与液态云粒子碰并及淞附增长, 出现大量的大尺寸冰相粒子, 并不断消耗液态过冷水形成过冷水低
144 值区。

145 (2) 下层 As 中下部位云粒子相态的判定

146 首先, 辨别 2DC 所测粒径大于 50 μm 以上云粒子相态。在该层的 2DC 云粒子图像主要为冰雪晶聚合体、
147 不规则冰晶和少量柱状冰晶 (图略), 且在 53 μm -125 μm 粒径范围内未发现球形粒子存在, 由此判定粒径 50 μm
148 (即 $D_i \geq 54.88\mu\text{m}$) 以上的云粒子相态为冰相。

149 其次, 判断 FSSP 量程内云粒子相态。通过观察 LWC_{King} 与 LWC_{FSSP} 在过冷水高值区的差异情况 (图 3b)
150 可见, 在 L1、L2 区和 L4 区的大部分区域, LWC_{King} 与 LWC_{FSSP} 相近, 在 3.5 μm 至 27.5 μm 尺寸范围内的云
151 粒子以高 $n(D_i)$ 值连续分布 (图 3c)。而在 L3、L5、L6 区和 L4 区的部分区域, LWC_{King} 明显小于 LWC_{FSSP} ,
152 $D_i \geq 30.5\mu\text{m}$ 均有大量 $n(D_i)$ 值较高的云粒子不连续分布。此外, 分析图 3c 所显示的过冷水高值区的 FSSP 瞬
153 时谱发现, LWC_{King} 主要随 3.5 $\mu\text{m} \leq D_i \leq 27.5\mu\text{m}$ 区间内 $n(D_i)$ 值的变化而变化。计算该区间内的含水量 (记为
154 $\text{LWC}_{\text{FSSP}}(3.5-27.5)$), 与过冷水高值区的 LWC_{King} 比较, 并由 King 探头有效探测下限 0.01g/m³ (Tessendorf, et
155 al., 2012) 以上数据检验二者的相关性。

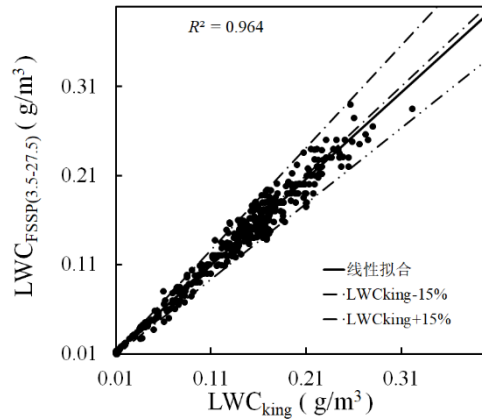


图 4 下层 As 中下部位液态含水量 LWC_{King} 与 $LWC_{FSSP(3.5-27.5)}$ 线性相关性

Fig.4 The linear correlation between liquid water content LWC_{King} and $LWC_{FSSP(3.5-27.5)}$ in the middle and lower parts of lower As.

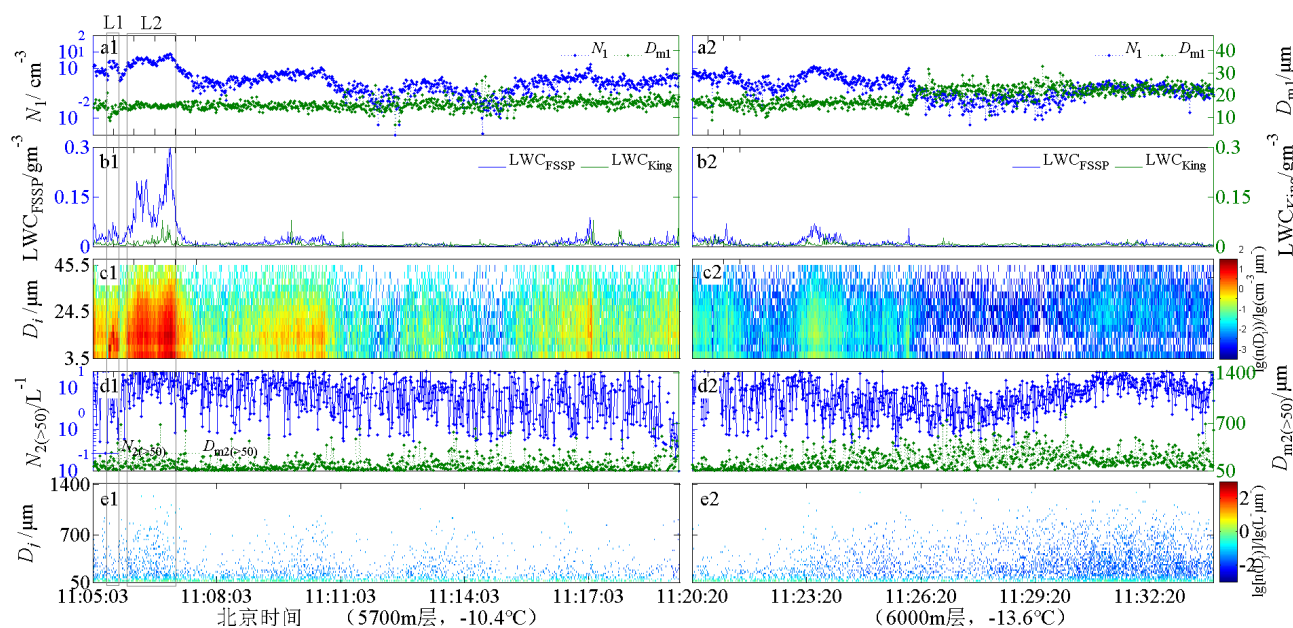
如图 4 所示, 在 $LWC_{King} > 0.01 \text{ g/m}^3$ 的过冷水高值区, $LWC_{FSSP(3.5-27.5)}$ 数值基本在 $LWC_{King} \pm 15\%$ 的相对误差范围内, LWC_{King} 与 $LWC_{FSSP(3.5-27.5)}$ 线性相关的判定系数 R^2 为 0.965, 通过 95% 显著性检验, 且线性拟合线几乎与中轴线重合, 说明 LWC_{King} 与 $LWC_{FSSP(3.5-27.5)}$ 存在显著的对称相关性。

由以上分析表明, 在下层 As 中下部位液态云粒子集中分布在 $3.5 \mu\text{m} - 27.5 \mu\text{m}$ 的尺寸范围内, 而 $30.5 \mu\text{m} - 45.5 \mu\text{m}$ 尺寸范围内的云粒子基本上为冰晶。

2.2.2 下层 As 中上部及顶部

(1) 下层 As 中上部及顶部云微物理量水平分布特征

图 5 给出了 11:05:03-11:18:15、11:20:20-11:34:13 分别在下层 As 中上部(5700m, -10.4°C)和顶部(6000m, -13.6°C) 平飞探测时 FSSP、2DC、King 探头观测的粒子浓度、直径、瞬时谱和含水量。



170
171 图 5 下层 As 中上部位的 N_1 和 D_{m1} (a)、 LWC_{FSSP} 和 LWC_{King} (b)、FSSP 瞬时谱 (c) (单位: $\lg(\text{cm}^{-3} \cdot \mu\text{m}^3)$)、
172 $N_{2(>50)}$ 和 $D_{m2(>50)}$ (d)、2DC ($D > 50\mu\text{m}$) 瞬时谱 (e) (单位: $\lg(\text{L}^{-3} \cdot \mu\text{m}^3)$) 随时间的水平变化; a2-e2 同
173 a1-e1, 但为下层 As 顶部
174 Fig. 5 The horizontal distribution of the lower As middle part over time (a1: N_1 and D_{m1} , b1: LWC_{FSSP} and LWC_{King} .
175 c1: FSSP instantaneous spectrum. d1: $N_{2(>50)}$ and $D_{m2(>50)}$, e1: 2DC ($D > 50\mu\text{m}$) instantaneous spectrum. a2-e2
176 are same to a1-e1, but for the top of the lower As.)
177

178 由图 5a1 可见, 在下层 As 中上部的 N_1 高值区与低值区同样相差 2-3 个量级, 但 D_{m1} 集中在 $15\mu\text{m}$ - $20\mu\text{m}$
179 范围内, 无明显变化。同样当 N_1 超过 10cm^{-3} 以上时有含水量高值区出现 (L1 和 L2), 过冷水高值区对应 $n(D_i)$
180 在 $3.5\mu\text{m}$ - $27.5\mu\text{m}$ 粒径范围内出现高值区 (图 5c)。但与下层 As 中下部不同, 2DC 同时观测到有较高浓度的
181 大尺度云粒子出现 (图 5d1、d2)。另外, 由 2DC 云粒子图像 (图略) 可见, 该时刻有冰雪晶聚集体、冰雪晶
182 淞附体出现。表明在下层 As 中上部过冷水高值区产生的冰晶, 同时与液态过冷水聚合, 从而出现淞附增长。
183 在下层 As 顶部无明显 N_1 、 $n(D_i)$ 高值区及含水量高值区出现 (图 5a2、b2、c2)。在 N_1 低值区, 即松散云体
184 区域, $n(D_i)$ 离散分布, 且其瞬时谱在 $D_i=6.5\mu\text{m}$ - $9.5\mu\text{m}$ 粒径范围内出现大量空白区域 (图 5c2), 这主要是由
185 云层顶部较小尺寸液态云滴的蒸发造成。

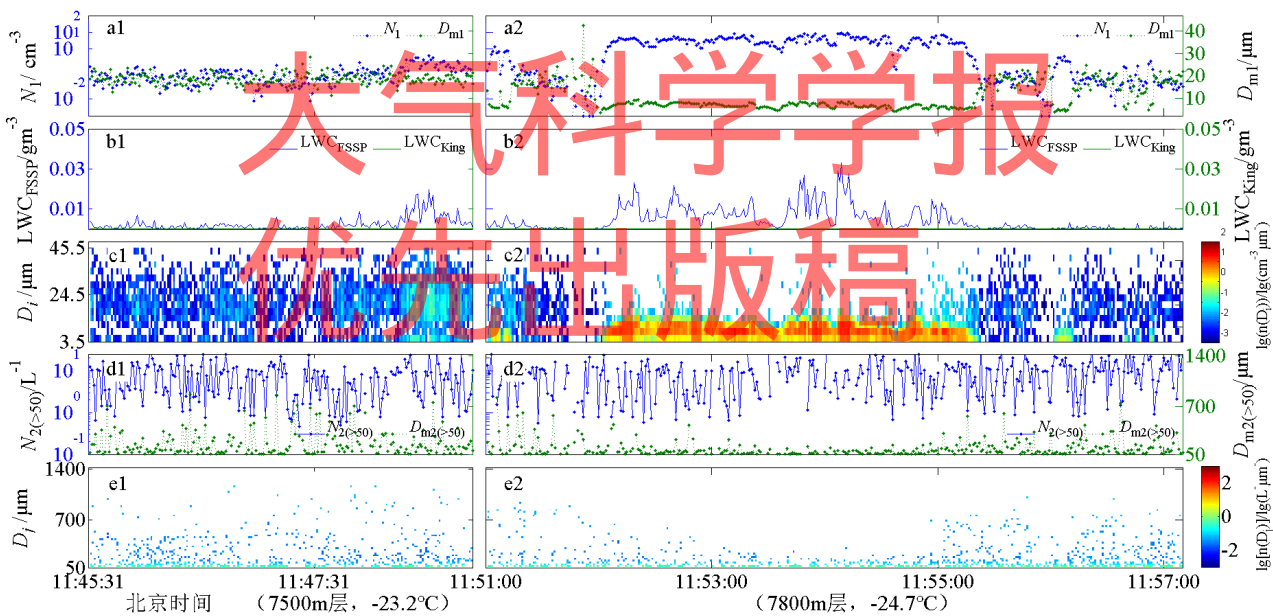
186 (2) 下层 As 中上部过冷水高值区云粒子相态的判定

187 由图 5b1、b2 可见, 在 As 中上部位过冷水高值区 LWC_{King} 与 LWC_{FSSP} 变化趋势基本相同, 但差值较大。
188 根据本文 2.2.1 相同方法判别, 结果表明下层 As 中上部和顶部粒径大于 $50\mu\text{m}$ 以上的云粒子相态为冰相。

189 $LWC_{FSSP(3.5-27.5)}$ 基本在 $LWC_{King} \pm 15\%$ 范围内, LWC_{King} 与 $LWC_{FSSP(3.5-27.5)}$ 同样有显著的对称相关性 (线性判
 190 定系数 R^2 为 0.957, 通过 95% 显著性检验), 下层 A_s 中上部过冷水高值区的液态过冷水也主要集中在 $D_i = 3.5\mu\text{m}$ -
 191 $27.5\mu\text{m}$ 的尺寸范围内。

192 2.2.3 卷层云

193 图 6 给出了在 C_s 底部和顶部的 FSSP、2DC 所测云粒子浓度、直径及瞬时谱随时间变化图。在 C_s 内 King
 194 探头未探测到液态过冷水 (图 6b1、b2), FSSP 瞬时谱、2DC 瞬时谱同时存在明显的不连续现象 (图 6c1、
 195 c2、e1、e2), 由此推断 C_s 为冰云。由图 6a1、b1、c1 可见, FSSP 在 C_s 底部未观测到明显的 N_1 高值区, $n(D_i)$
 196 基本上为离散分布, 但 2DC 观测到有较高浓度的大尺寸云粒子存在 (图 6d1、e1)。而在 C_s 顶部出现明显的
 197 N_1 、 LWC_{FSSP} 高值区及 $n(D_i)$ 高值区 (图 6a2、b2、c2), 云粒子主要集中在 $D_i = 3.5\mu\text{m}$ - $9.5\mu\text{m}$ 粒径范围内, 且
 198 2DC 未观测大尺寸云粒子。推测在 7800m 层存在高空水汽输送, 凝华产生较高浓度的小尺寸冰晶。

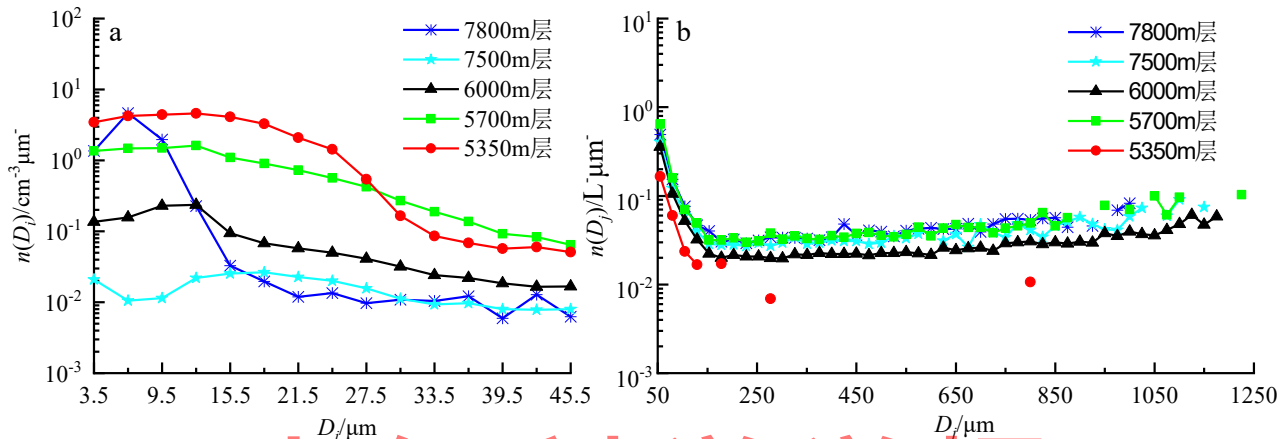


199 图 6 C_s 底部的 N_1 和 D_{m1} (a1)、 LWC_{FSSP} 和 LWC_{King} (b1)、FSSP 瞬时谱 (c1) (单位: $\text{lg}(\text{cm}^{-3} \cdot \mu\text{m}^{-1})$)、(d1)
 200 $N_{2(>50)}$ 和 $D_{m2(>50)}$ 、2DC ($D > 50\mu\text{m}$) 瞬时谱 (e1) (单位: $\text{lg}(\text{L}^{-3} \cdot \mu\text{m}^{-1})$) 随时间的水平变化; a2-e2 同 a1-
 201 e1, 但为 C_s 顶部
 202

203 Fig. 6 The horizontal distribution of C_s bottom part over time (a1: N_1 and D_{m1} . b1: LWC_{FSSP} and LWC_{King} . c1: FSSP
 204 instantaneous spectrum. d1: $N_{2(>50)}$ and $D_{m2(>50)}$. e1: 2DC ($D > 50\mu\text{m}$) instantaneous spectrum. a2-e2 are same
 205 to a1-e1, but for the top of the C_s .)
 206

207 2.3 平均谱分布特征和云粒子增长机制的探讨

208 此次分层垂直探测时段为云系的成熟阶段。图 7 给出了在各平飞探测高度层的 FSSP 和 2DC 平均谱分
 209 布。云系由冰晶层和过冷混合态层组成。7800m、7500m 层为冰晶层，6000m、5700m、5350 层为过冷混合态
 210 层。因 FSSP、2DC 所测云粒子浓度及瞬时谱在同一高度层存在不同差异，云系各过冷混合态层的 FSSP 平均
 211 谱分布主要体现为浓度高值区、过冷水高值区的云粒子谱特征，而 2DC 平均谱分布体现为该层平均状况。



212
 213 图 7 云系各高度层平均云粒子谱分布图：(a) FSSP 观测；(b) 2DC 观测
 214 Fig. 7 The distribution of mean cloud particle spectrum diagram for each height layer of cloud system: (a) FSSP
 215 observation; (b) 2DC observation
 216

217 由云系的冰晶层到过冷混合态层，除 Cs 底部（7500m 层）外，FSSP 平均谱分布的谱型基本上为单峰型
 218 Γ 分布（图 7a），而中国北方地区混合态云中观测的谱型（张佃国等，2007，2011；王扬锋等，2007；彭冲等，
 219 2016）为负指数型分布，其 FSSP 观测到的云粒子相态均为液态。在过冷混合态层，从下层 As 顶部到中下部，
 220 谱峰值依次上行，而峰值均在约 12.5 μm 处。下层 As 中下部（5350m 层）的谱线在 27.5 μm 处与中上部（5700m
 221 层）的谱线交叉下行，表明下层 As 云中下部液态云滴（ $D_i=3.5\mu\text{m}-27.5\mu\text{m}$ ）浓度比中上部高，而较小尺寸冰
 222 晶粒子（ $D_i=30.5\mu\text{m}-45.5\mu\text{m}$ ）浓度比中上部低。这是云系中液态水含量最大值出现在下层 As 中下部的原因。

223 云系中 2DC 平均谱谱型均为负指数型（图 7b）。除下层 As 中下部有 150 μm 以上云粒子离散分布，且未
 224 出现 800 μm 以上云粒子外，其它各高度层的谱线较为接近，谱宽随着高度降低而变宽，在下方 As 中上部达
 225 机制值，且随着尺度增大有浓度随之增大的趋势。

226 此次观测发现在冰晶层中有较高浓度的 1000 μm 以上粒子出现，这与在三江源秋季层状云的观测结果（王
 227 黎俊等，2013a）不同，后者在冰晶层中未观测 400 μm 以上云粒子。由此推测，因该高度层的高空水汽输送，
 228 除冰晶的凝华增长、碰并增长外，可能存在丛集、凇附增长，从而产生大尺寸的雪晶粒子及雪晶结凇体、冰

229 雪晶聚合体。

230 当层状云厚度较大、过冷水含量较为丰富，凝华、聚并和淞附增长起主导作用，基本符合“播撒-供给”
231 降水形成机制 (郭学良等, 2021)。本次观测到的下层 As 厚度达 1000m 以上，且云滴浓度、液态过冷水含量
232 较高，为产生淞附增长提供了有利条件。由下层 As 的 FSSP、2DC 谱分布推测，一方面因该高度层充沛的水
233 汽输送，液态云滴在云层中下部大量产生，并形成过冷水含量高值区，但仅通过云内的冰水转化及凝华增长、
234 碰并增长，很难产生大尺寸的冰相粒子。另一方面，因锋面暖湿气流的向上运动，促使在下层 As 中下部及中
235 上部的过冷水含量高值区，通过淞附增长产生 1250 μm 以上冰相粒子及可降水性冰相粒子。由此表明，作为
236 主体降水云层的下层 As 中淞附增长是产生大尺寸冰相粒子的主要机制。

237 2.4 云系含水量及过冷水含量比率的垂直分布特征

238 本文参照王黎俊等(2013b)的方法分段计算 IWC:对于 FSSP 所测 $30.5\mu\text{m}\leq D_i\leq 45.5\mu\text{m}$ 范围内 ($i=10,\dots,15$)
239 冰晶粒子,假定为球形冰相粒子计算;对于 2DC 所测 $50\mu\text{m}$ 至 $125\mu\text{m}$ (即 $54.88\mu\text{m}\leq D_j\leq 104.38\mu\text{m}$, $j=2,\dots,4$)
240 尺寸范围内的非球形冰相粒子,采用新疆层状云的经验回归系数 $a=0.04$ 、 $b=3$ (游来光等, 1989);对于 2DC
241 所测 $D_j\geq 129.12\mu\text{m}$ ($j\geq 5$) 的冰相粒子,采用美国阿拉斯加地区混合态云的经验回归系数 $a=1.07\times 10^{-10}\text{g}/\mu\text{m}^{1.7}$ 、
242 $b=1.7$ (McFarquhar, et al.,2007)。则 IWC 可表示为:

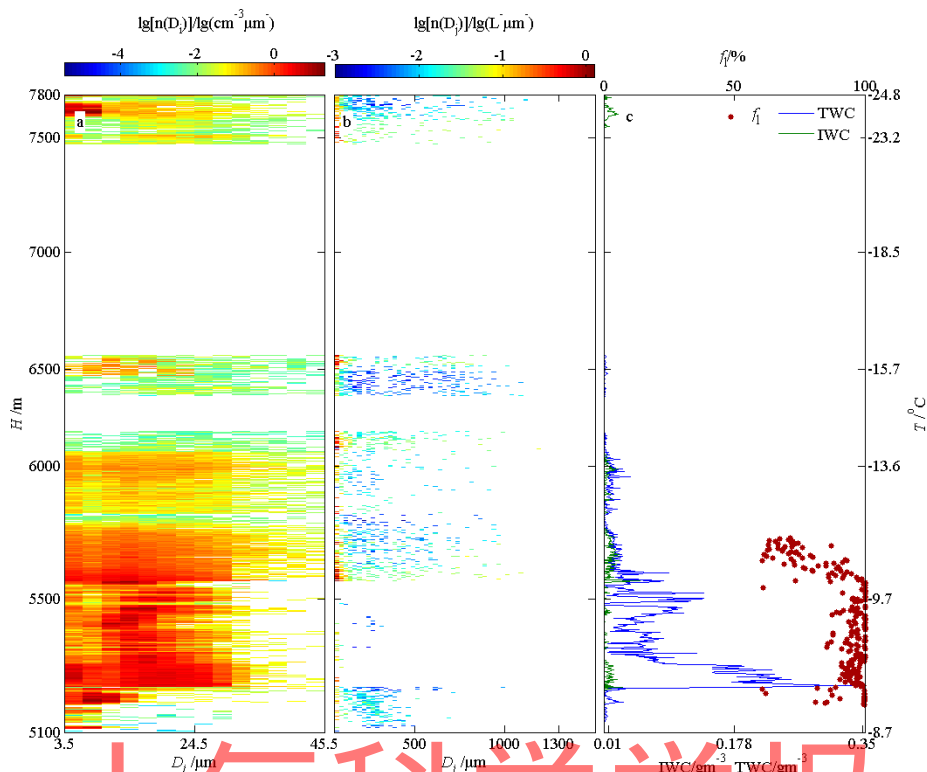
$$243 \quad \text{IWC} = \frac{\pi}{6} \times 10^{-6} \rho_i \sum_{i=10}^{15} D_i^3 n(D_i) \Delta D_i + \sum_{j=2}^4 0.04 \times 10^{-9} D_j^3 n(D_j) \Delta D_j + \sum_{j=5}^m 0.107 \times 10^{-9} D_j^{1.7} n(D_j) \Delta D_j \quad (1)$$

244 其中, ρ_i 为冰相水密度 (单位: g/cm^3)。

245 用 King 探头实测值来表示 LWC (McFarquhar, et al,2007)。则过冷水含量比率 f_l 可表示为:

$$246 \quad f_l = \frac{\text{LWC}_{\text{King}}}{\text{LWC}_{\text{King}} + \text{IWC}} \quad (2)$$

247 图 8 给出了飞机在整个云系底部至顶部盘旋上升垂直探测的 FSSP 瞬时谱、2DC ($D > 50\mu\text{m}$) 瞬时谱、
248 IWC、TWC 和过冷水高值区 f_l 随高度及温度的变化图。其中在各平飞高度层的数据，以该层过冷水高值区的
249 平均数据代替。



250
 251 图 8 云系垂直结构的 FSSP 瞬时谱 (a) (单位: $\lg(\text{cm}^{-3} \cdot \mu\text{m}^{-1})$); 2DC ($D > 50 \mu\text{m}$) 瞬时谱 (b) (单位: $\lg(\text{L} \cdot$
 252 $^3 \cdot \mu\text{m}^{-1})$); 冰相含水量 IWC、总含水量 TWC、过冷水高值区过冷水含量比率 f_i (c) 随高度的变化图
 253 Fig.8 The vertical structure diagram of cloud system: (a) FSSP instantaneous spectrum (units: $\lg(\text{cm}^{-3} \cdot \mu\text{m}^{-1})$); (b)
 254 2DC($D > 50 \mu\text{m}$) instantaneous spectrum (units: $\lg(\text{L}^{-3} \cdot \mu\text{m}^{-1})$); (c) Variations of ice phase water content IWC,
 255 total water content TWC and supercooled water content ratio f_i with height.
 256

257 由图 8a、b 和 c 可见, 在整个下层 As 内, 基本上为 $n(D_i)$ 高值区, 并在 $3.5 \mu\text{m} - 27.5 \mu\text{m}$ 段 (液态云滴集
 258 中分布的粒径范围) 的 $n(D_i)$ 高值区, 即下层 As 中下部至中上部, 出现过冷水高值区。 $n(D_i)$ 高值区出现在
 259 下层 As 中部至顶部的高度范围内。在过冷混合态云层中, 因 $D_i = 30.5 \mu\text{m} - 48.5 \mu\text{m}$ 冰晶粒子的 $n(D_i)$ 较 $50 \mu\text{m}$ 以
 260 上冰相粒子的 $n(D_i)$ 要大 2-3 个量级, 所以 IWC 主要由 $30.5 - 45.5 \mu\text{m}$ 粒径范围内云粒子浓度决定。IWC 相应
 261 在下层 As 中下部、中上部和近顶部出现高值区。TWC 高值区主要出现在云层中下部至中上部, 并在云层中
 262 下部达到最大值 $0.34 \text{g}/\text{cm}^3$ 。在 Cs 中, 因无液态过冷水, IWC 线与 TWC 线重合。在 Cs 顶部因出现 $3.5 \mu\text{m} -$
 263 $9.5 \mu\text{m}$ 、 $50 \mu\text{m} - 150 \mu\text{m}$ 粒径范围的冰晶粒子的 $n(D_i)$ 、 $n(D_i)$ 高值区, IWC 相应出现高值区。

264 由图 8c 可见, 在下层 As 过冷水高值区, f_i 在云层中下部至中部的高度范围内存在高值区, 平均值及标
 265 准差 (σ) 达 $95.6 \pm 5.6\%$, 明显高于其中上部 ($79.8 \pm 12.1\%$)。下层 As 中上部至中下部高度范围内的 f_i 平均值
 266 为 $90.8 \pm 10.9\%$ 。

3 结论

本文利用三江源飞机观测试验期间进行完整分层垂直探测的飞机观测资料，基于云粒子相态综合判别，详细分析了典型降水性层状云系的垂直结构、水平分布、平均谱分布和含水量及过冷水含量比率的垂直分布特征，得到如下结论：

1) 三江源春季典型层状云系主要由 3 层云层组成，其中位于最高层的卷层云为冰云，分为上、下两层的高层云为过冷混合态云。处于成熟阶段的下层高层云厚度达 1000m 以上，过冷水高值区主要分布在云层中上至中下部位，在中下部位云粒子浓度和过冷水含量最大，具有较明显的地区特性。

2) 对下层高层云过冷水高值区云粒子相态判别结果认为，粒径大于 $50\mu\text{m}$ 的云粒子为冰相粒子， $30.5\mu\text{m}$ - $45.5\mu\text{m}$ 的云粒子基本上为冰晶，液态云粒子主要集中在中值直径为 $3.5\mu\text{m}$ - $27.5\mu\text{m}$ 的粒径范围内。

3) 云系各高度层 $50\mu\text{m}$ 以上云粒子的平均谱均为负指数型分布，淞附增长是下层高层云产生可降水性云粒子的主要机制。下层高层云各高度层 $3.5\mu\text{m}$ 至 $48.5\mu\text{m}$ 云粒子的平均谱基本上为单峰型 Γ 分布，过冷水高、低值区的 FSSP 云粒子瞬时谱分布存在明显差异。下层高层云中下部过冷水高值区存在较明显的“冰晶效应”，中上部有较明显的淞附增长现象。

4) 云系含水量 (TWC) 高值区主要分布在下层 A_s 中下部至中上部的高度范围内，在下层高层云中下部达到最大值 $0.34\text{g}/\text{cm}^3$ 。在云系过冷水高值区，液态过冷水含量比率的平均值达 $90.8\pm 10.9\%$ ，且在下层 A_s 中部至中下部位 ($95.6\pm 5.6\%$) 明显高于中上部 ($79.8\pm 12.1\%$)，该云系的微物理结构特性为人工增雨作业催化提供了有利条件。

- 300 Brown P R A, Francis P N. 1995. Improved measurements of ice water content in cirrus using a total-water probe[J]. *J. Atmos. Oceanic*
301 *Technol.*, 12:410–414.
- 302 Cober S G, George A I, Korolev A V, et al. 2001. Assessing cloud-phase conditions[J]. *J. Appl. Meteor.*, 40:1967–1983.
- 303 Coelho A A, Brenguier J L, Perrin T. 2005. Droplet spectra measurements with the FSSP-100. Part II: Coincidence effects[J]. *J. Atmos.*
304 *Oceanic Technol.*, 22:1756–1761.
- 305 蔡兆鑫, 周毓荃, 蔡淼, 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,
306 Zhou Y Q, Cai M, 2013. Analysis on comprehensive of Artificial precipitation enhancement operation for a convective-stratiform
307 mixed cloud [J]. *Plateau Meteorology*, 32(5):1460-1469. (in Chinese).
- 308 Feind R E, Detwiler A G, Smith P L. 2000. Cloud liquid water measurements on the armored T-29: Intercomparison between Johnson-
309 Williams cloud water meter and CSIRO (King) liquid water probe[J]. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 17:1630–1638
- 310 Field P R, Hogan R J, Brown P R A, et al. 2004. Simultaneous radar and aircraft observations of mixed-phase cloud at the 100-m Scale[J].
311 *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 130:1877–1904.
- 312 Field P R, Wood R, Brown P R A, et al. 2003. Ice particle inter-arrival times measured with a fast FSSP[J]. *J. Atmos. Oceanic Technol.*,
313 20:249–261.
- 314 Fleishauer R P, Larson V E, Vonder Haar T H. 2002. Observed microphysical structure of midlevel, mixed-phase clouds[J]. *J. Atmos.*
315 *Sci.*, 59:1779–1804.
- 316 Gardiner B A, Hallett J. 1985. Degradation of in-cloud forward Scattering spectrometer probe measurements in the presence of ice
317 particles[J]. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 2:171–180.
- 318 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,
319 Fu D h, Hu Z X, et al. 2013. Progress in Cloud Physics, Precipitation, and Weather Modification during 2008-2012[J]. *J Appl Meteor*
320 *Sci*, 37 (2) :351–363.
- 321 郭学良, 付丹红, 郭欣, 等. 2021. 我国云降水物理飞机观测研究进展[J]. *应用气象学报*, 32(6):641-652. Guo X L, Fu D h, Guo X, et al.
322 *Advances in aircraft measurements of clouds and precipitation in China*[J]. *J Appl Meteor Sci*. 2021, 32(6): 641-652. DOI:
323 10.11898/1001-7313.20210601.
- 324 韩辉邦, 张玉欣, 郭世钰, 等. 2022. 三江源区积层混合云微物理特征机载观测试验研究 [J]. *干旱区研究*, 39 (05): 1360-1370.
325 HAN Hui bang, ZHANG Yuxin, GUO Shiyu, et al., 2022. Experimental study on microphysical characteristics of cumulus
326 hybrid clouds in the Sanjiangyuan region in relation to aircraft observation [J]. *Arid Zone Research*, 39 (05): 1360-1370.
327 DOI:10.13866/j.azr.2022.05.03. (in Chinese)
- 328 Heymsfield A J, Lewis S, Bansmer A, et al. 2002. A general approach for deriving the properties of cirrus and stratiform ice cloud
329 properties[J]. *J. Atmos. Sci.*, 59:3–29.
- 330 黄敏松, 雷恒池, 焦瑞莉, 等. 2021. 机载云降水粒子成像仪的数据处理软件研发及其在云微物理研究的应用[J]. *大气科学学报*,
331 44(3):345-354. Huang M S, Lei H C, Jiao R L, et al., 2021. Development the data processing software for the airborne
332 cloud and precipitation imaging probe and its application on cloud microphysics research[J]. *Trans Atmos Sci*, 44(3):345-
333 354. doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20191008002. (in Chinese).
- 334 Isaac G A. 1991. Microphysical characteristics of Canadian Atlantic storms[J]. *Atmos. Res.*, 26:339–360.
- 335 靳铮, 游庆龙, 吴芳营, 等, 2020. 青藏高原三江源地区近 60 a 气候与极端气候变化特征分析 [J]. *大气科学学报*, 43 (6) :
336 1042-1055. Jin Z, You Q L, Wu F Y, et al., 2020. Changes of climate and climate extremes in the Three-Rivers Headwaters
337 Region over the Tibetan Plateau during the past 60 years [J]. *Trans Atmos Sci*, 43 (6) : 1042-1055. doi: 10.13878
338 /j.cnki.dqkxxb.20201008001. (in Chinese).
- 339 Korolev A V, Isaac G A, Cober S G, et al. 2003. Microphysical characterization of mixed-phase clouds[J]. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*,
340 129:39–65.
- 341 Korolev A V, Strapp J W, Isaac G A. 1998. Evaluation of the accuracy of PMS optical array probes[J]. *J. Atmos. Oceanic Technol.*,
342 15:708–720.
- 343 Lawson R P, Zuidema P. 2009. Aircraft microphysical and surface-based radar observations of summertime Arctic clouds[J]. *J. Atmos.*
344 *Sci.*, 66:3505–3529.
- 345 雷恒池, 洪延超, 赵震, 等. 2008. 近年来云降水物理和人工影响天气研究进展[J]. *大气科学*, 32(4):967–974. Lei Hengchi, Hong
346 Yanchao, Zhao Zhen, et al. 2008. Advances in cloud and precipitation physics and weather modification in recent years[J]. *Chinese*
347 *Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 32(4):967–974.
- 348 李照荣, 李荣庆, 李宝梓. 2003. 兰州地区秋季层状云垂直微物理特征分析[J]. *高原气象*, 22(6):583–589. Li Zhaorong, Li Rongqing,

- 349 Li Baozi. 2003. Analyses on vertical microphysical characteristics of autumn stratiform cloud in Lanzhou region[J]. Plateau Me-
350 teorology(in Chinese), 22(6):583-589.
- 351 陆春松, 薛宇琦, 朱磊, 等, 2021. 基于层积云飞机观测资料评估气溶胶间接效应[J]. 大气科学学报, 44(2):279-289. Lu C
352 S, Xue Y Q, Zhu L, et al., 2021. Evaluation of aerosol indirect effect based on aircraft observations of stratocumulus[J]. Trans
353 Atmos Sci, 44(2):279-289. doi:10. 13878/j. cnki. dqkxxb. 20200613001. (in Chinese).
- 354 McFarquhar G M, Heymsfield A J. 1996. Microphysical characteristics of three cirrus anvils sampled during the Central Equatorial
355 Pacific Experiment (CEPEX) [J]. J. Atmos. Sci., 53:2401-2423.
- 356 McFarquhar G M, Zhang G, Poellot M R, et al. 2007. Ice properties of single-layer stratocumulus during the Mixed-Phase Arctic Cloud
357 Experiment: 1. Observations[J]. J. Geophys. Res., 112:D24201.
- 358 Miles N L, Verlinde J, Clothiaux E E. 2000. Cloud droplet size distributions in low-level stratiform clouds[J]. J. Atmos. Sci., 57:295-
359 311.
- 360 Mitchell D L. 1996. Use of mass- and area-dimensional power laws for determining precipitation particle terminal velocities[J]. J. Atmos.
361 Sci., 53:1710-1723.
- 362 彭冲, 周毓荃, 蔡兆鑫, 等, 2016. 一次基于飞机观测的低槽冷锋云系微物理结构的综合分析[J]. 大气科学学报, 39(5):620-
363 632. Peng C, Zhou Y Q, Cai Z X, et al., 2016. A comprehensive analysis of the physical structure of a low trough cold
364 front cloud system based on aerial observation[J]. Trans Atmos Sci, 39(5):620-
365 632. doi:10. 13878/j. cnki. dqkxxb. 20141231001. (in Chinese).
- 366 秦彦硕, 蔡淼, 刘世玺, 等. 2017. 华北秋季一次低槽冷锋层混合云宏微物理特征与催化响应分析 [J]. 气象学报, 75(5): 835-
367 849. Qin Y S, Cai M, Liu S X, et al. 2017. A study on macro and microphysical structures of convective-stratiform mixed clouds
368 associated with a cold front in autumn and their catalytic responses in North China [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 75(5):
369 835-849. doi:10.11676/qxxb2017.049. (in Chinese).
- 370 Strapp J W, Oldenburg J, Ide R, et al. 2003. Wind tunnel measurements of the response of hot-wire liquid water content instruments to
371 large droplets[J]. J. Atmos. Oceanic Technol., 20:791-806.
- 372 王黎俊, 银燕, 李仑格, 等, 2013a. 三江源地区秋季典型多层次层状云系的飞机观测分析[J]. 大气科学, 37(5): 1038-1058. Wang L
373 J, Yin Y, Li L G, et al., 2013. Analyses on typical autumn multi-layer stratiform clouds over the Sanjiangyuan national na-
374 ture reserve with airborne observations[J]. Chin J Atmos Sci, 37(5) : 1038-1058. doi: 10. 3878/j. issn. 1006-9895. 2013. 12172. (in
375 Chinese).
- 376 王黎俊, 银燕, 姚展予, 等. 2013b. 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-
377 939. [Wang Lijun, Yin Yan, Yao Zhanyu, et al. 2013. Microphysical re-sponses as seen in a stratocumulus aircraft seeding experi-
378 ment in autumn over the Sanjiangyuan National Nature Reserve] Acta Me-teorologica Sinica, 71(5): 925-939.
- 379 王扬锋, 雷恒池, 樊鹏, 等. 2007. 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, 26(2):388-395. Wang Yangfeng, Lei
380 Hengchi, Fan Peng, et al. 2007. Analyses on microphysical characteristic and precipitation mechanism on stratiform cloud in
381 Yanan [J]. Plateau Meteorology(in Chinese), 26(2):388-395.
- 382 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
383 Y, Niu S J, Lei H C, 2017. An examination of the microphysical responses to aircraft seeding of stratiform clouds with
384 embedded convection using the joint observational data of three aircrafts[J]. Trans Atmos Sci, 40(5):686-
385 696. doi:10. 13878/j. cnki. dqkxxb. 20161012002. (in Chinese).
- 386 杨洁帆, 胡向峰, 雷恒池, 等. 2021. 太行山东麓层状云微物理特征的飞机观测研究 [J]. 大气科学, 45(1): 88-106. YANG Jiefan,
387 HU Xiangfeng, LEI Hengchi, et al. 2021. Airborne Observations of Microphysical Characteristics of Stratiform Cloud Over Eastern
388 Side of Taihang Mountains [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 45(1): 88-106. doi:10.3878/j.issn.1006-
389 9895.2004.19202. (in Chinese)
- 390 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 Wenxia, Niu
391 Shengjie, Wei Junguo, et al. 2005. Airborne observation for microphysical structure of precipitation system of stratiform cloud
392 in Hebei Province [J]. Plateau Meteorology(in Chinese), 24(1):84-90.
- 393 杨文霞, 胡朝霞, 董晓波, 等, 2018. 降水性层状云结构及微物理量相关性分析[J]. 大气科学学报, 41(4):525-532. Yang W
394 X, Hu Z X, Dong X B, et al., 2018. A study on the microphysical structure and the correlation of microphysical parameters
395 of the precipitation stratiform cloud[J]. Trans Atmos Sci, 41(4):525-532. doi:10. 13878/j. cnki. dqkxxb. 20170216001. (in
396 Chinese).
- 397 姚秀萍, 谢启玉, 黄逸飞, 2022. 中国三江源地区降水研究的进展与展望 [J]. 大气科学学报, 45(5): 688-699. Yao X P, Xie
398 Q Y, Huang Y F, 2022. Advances and prospects on the study of precipitation in the Three-River-Source Region in China

399
400
401
402
403
404
405
406
407
408
409
410
411
412
413
414
415
416
417
418
419
420
421
422
423
424
425
426
427
428
429
430
431
432
433
434
435
436
437
438
439
440
441
442
443
444
445
446
447
448
449
450
451
452
453
454
455
456
457

[J]. *Trans Atmos Sci*, 45(5) : 688-699. doi: 10. 13878 /j. cnki. dqkxxb. 20211220001. (in Chinese) .

游来光,王守荣,王鼎丰,等. 1989. 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*, 47(1)73–81. You Laiguang, Wang Shourong, Wang Danfeng et al. 1989. The Microphysical structure of snow cloud and the growth process of snow in winter in Xinjiang[J]. *ACTA Meteorologica Sinica*(in Chinese), 47(1) 73–81.

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 Dianguo, Guo Xueliang, Fu Danhong, et al. 2007. Aircraft observation on cloud microphysics in Beijing and its Surrounding regions during August–September 2003 [J].*Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 31(4):596–610.

张佃国,郭学良,龚佃利,等. 2011a. 山东省 1989–2008 年 23 架次飞机云微物理结构观测试验结果[J]. *气象学报*, 69(1):195–207. Zhang Dianguo, Guo Xueliang, Gong Dianli, et al. 2011. The observational results of the clouds microphysical structure based on the data obtained by 23 sorties between 1989 and 2008 in Shandong Province[J]. *ACTA Meteorologica Sinica*(in Chinese), 69(1):195–207.

张佃国, 姚展予, 龚佃利, 等, 2011b. 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).

赵仕雄,德力格尔,涂多彬. 2003. 黄河上游降水云层对流特性及降水微结构机制研究[J]. *高原气象*, 22(4):385–392. Zhao Shixiong, Deligeer, Tu Duobin. 2003. A study on convective characteristics and formation mechanism of precipitation over upper reaches of Yellow River[J]. *Plateau Meteorology*(in Chinese), 22(4):385–392.

大气科学学报 优先出版稿

458
459 **Exploring on Microphysical Structural Characteristics of Stratiform Clouds**
460 **over the Sanjiangyuan National Nature Reserve with Airborne Observation**

461
462 WANG L J¹, KANG X Y^{1,2}, WANG Q H^{1,2}, GUO S Y², HAN H B^{1,2}

463 ¹ Weather Modification Office of Qinghai Province, Qinghai 810001, China;

464 ² Meteorological Disaster Prevention Technology Center in Qinghai Province, Qinghai 810001, China

465
466 **Abstract:** In the field of artificial precipitation enhancement, aircraft observation is still the only effective ways to
467 directly obtain the phase state of cloud particles. Because the liquid supercooled water content in the cloud is an
468 important parameter to judge the microphysical structure characteristics of the cloud system, based on the layered
469 vertical detection data of Particle Measurement System (PMS) in the Sanjiangyuan National Nature Reserve, we
470 analyzed the microphysical characteristics of a typical layered cloud system in this area in spring. The results show
471 that: (1) the typical stratiform cloud system in spring cloud system is mainly composed of three layers, the uppermost
472 Cs (cirrostratus) is ice-phase cloud, and the AS (altostratus) in upper layer (high-level cloud) and the lower layer are
473 mixed clouds. Moreover, the high supercooled water area is mainly distributed in the middle, upper and lower parts
474 of the low-level As, where the cloud particle concentration and supercooled water content are the highest, with obvi-
475 ous regional characteristics. (2) The liquid cloud particles in the As layer are concentrated in the median diameter
476 range of 3.5 ~ 27.5 μm , and the cloud particles larger than 30.5 μm are ice-phase. In the middle and upper part of the
477 low As layer, there is an obvious growth phenomenon in the high supercooled water area, and there is obvious ice
478 crystals effect in the middle and lower part. (3) In the low supercooled water area, the average content ratio of super-
479 cooled water is $90.8\pm 10.9\%$, and the middle to lower parts ($95.6\pm 5.6\%$) is significantly higher than the middle and
480 upper parts ($79.8\pm 12.1\%$). The accurate understanding and judgment of the microphysical structure of the layered
481 cloud system in Sanjiangyuan will provide a reliable observation basis for the catalysis of artificial precipitation
482 enhancement in this area.

483
484 **Key words:** the Sanjiangyuan National Nature Reserve; stratiform clouds; airborne observations; tropical; PMS (Particle Meas-
485 uring System)

大气科学学报
优先出版稿