

# 祁连山区一次非降水层状云的微物理结构探测分析

张逸轩<sup>1</sup>, 庞朝云<sup>1</sup>, 李照荣<sup>1</sup>, 张建辉<sup>1</sup>, 覃秋忠<sup>2</sup>

(1. 甘肃省人工影响天气办公室, 甘肃 兰州 730020; 2. 广西上林县气象局, 广西 上林 530050)

**摘要:**利用装载有粒子测量系统 (FMS) 的飞机对 2007 年 8 月 15 日甘肃省张掖市民乐县夏季非降水层状云进行了一次探测飞行, 通过获取的资料分析了云层结构、云滴的垂直分布、液态含水量、谱特征等。结果表明: (1) 此个例中云层结构明显, 云中存在逆温层; (2) 云中平均含水量为  $0.012 \text{ g/m}^3$ , 含水层主要集中在  $4\ 100 \sim 4\ 200 \text{ m}$  与  $4\ 700 \sim 5\ 000 \text{ m}$  层之间; (3) 此云系符合 Bergeron 提出的催化云—供水云相互作用导致降水的概念模型, 可以在催化云中进行人工引晶来达到增加降水的目的。

**关键词:**云微物理; 液水含量; FMS; 层状云; 云粒子谱  
**中图分类号:** P412.24 **文献标识码:** A

## 引言

云物理学是研究有关云的形成和产生降水的学科, 与大气科学中的很多分支都有密切联系, 是现代人工影响天气的科学基础。如何对具有降水潜力的云在适当的部位和时机用科学方法进行人工催化、激发或加速降水形成过程, 提高云的降水效率, 以期达到增雨的目的, 这方面国内目前已有许多研究<sup>[1-3]</sup>, 其科学基础已被大量的理论研究、室内实验和外场试验所证实<sup>[4-6]</sup>。云物理学的研究途径主要包括: 对自然界的云和降水的形成、演变进行外场观测研究, 对云物理过程进行室内模拟试验, 以及利用数学方法进行云物理过程的数值模拟研究等。外场观测研究是认识云物理过程的最重要的途径, 其主要的探测仪器有云粒子探测仪、热线含水量仪、雨滴谱仪等。机载 FMS 系统作为云粒子的重要观测仪器, 它可以获得用地面仪器很难得到的微观云物理资料数据<sup>[7]</sup>, 通过对这些资料的分析研究, 可以进行云中粒子模态的区分、粒子谱的演变特点、含水量的空间分布、降水转化率分析以及效果分析等<sup>[8]</sup>, 增加对云结构等方面的认识。

## 1 试验介绍

用中国气象科学研究院引进的 FMS 粒子探测

系统对 2007 年 8 月 15 日张掖地区民乐县上空的混合型层状云进行探测。采用改装后的运 - 12 飞机, 机上装有云物理观测仪器 FMS 系统和 GPS 全球卫星定位系统<sup>[9]</sup>。仪器安装在飞机机翼下部, 共有 4 个探头, 其探头名称及量程分别为: ASASP - 100 ( $0.12 \sim 3.12 \mu\text{m}$ ); FSSP - 100 ( $0.5 \sim 47 \mu\text{m}$ ); OAP 2D - C ( $25 \sim 800 \mu\text{m}$ ); OAP 2D - P ( $200 \sim 6\ 400 \mu\text{m}$ ), 其中 2D - C 和 2D - P 探头能够提供二维粒子图像。这套系统能够得到包括温度、气压、高度、风速等宏观资料, 也能够得到云粒子浓度、含水量、粒子的平均直径等数据资料。飞机 08:31 从张掖起飞, 08:39 开始入云, 入云后垂直探测 (图 1), 探测飞行时间

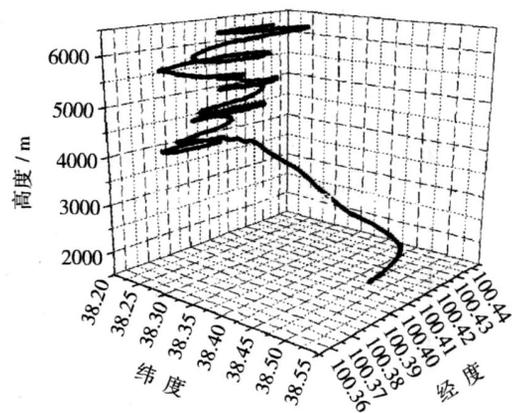


图 1 Y - 12 飞机飞行轨迹图

Fig 1 The flight track of Y - 12 aircraft

收稿日期: 2008 - 08 - 01; 改回日期: 2008 - 08 - 21

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (40533015) 资助

作者简介: 张逸轩 (1985 - ), 男, 重庆市合川人, 助理工程师, 主要从事人工影响天气应用与研究. E - mail: lzuemail@gmail.com

60 min,最高到达海拔 6 341 m 高度,整个飞行过程中观测无明显降水。垂直飞行中共取得 2 929 组 (1 s 1 组)记录,本文对 FSSP - 100, 2D - C, 2D - P 这些资料进行了系统的综合分析。

1.1 天气形势

2007 年 8 月 15 日,在中高纬度的西伯利亚存在一东北向的大槽,欧亚中高纬度高空为 2 脊 1 槽型,槽底有冷空气分裂东移,影响到甘肃河西地区和内蒙古西部地区,受此冷空气影响,我省大部分地区形成降水。从 8 月 15 日 07: 30 FY - 2C 红外云图 (图 2) 上看,甘肃省中部大部分地区上空覆盖云层,探测地点民乐地区正好处于锋面云系后端,受新疆槽的影响,此云系随着大槽的东移也不断东移。从风场图看,探测区域存在较强的风速风向切变。

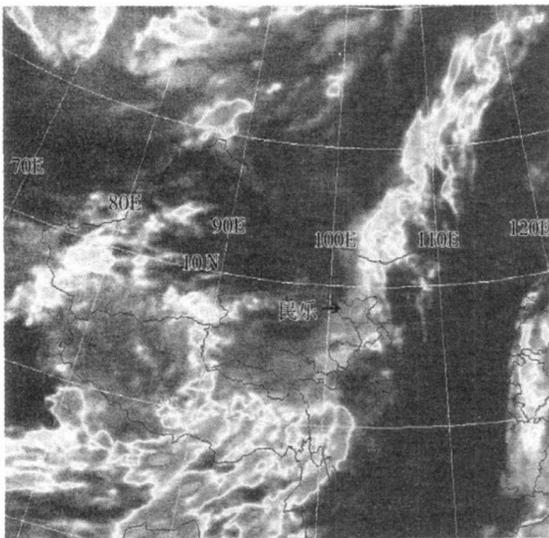


图 2 2007 年 8 月 15 日 07: 30 FY - 2C 红外云图

Fig 2 Infrared cloud image of FY - 2C at 7: 30 on August 15, 2007

1.2 云层结构

从大气的温度垂直分布图 (图 3) 中可以看出,在探测过程中,温度除了有小的波动外,随着高度的增加基本呈递减趋势,但是在 3 980 ~ 4 166 m 高度层和 5 677 ~ 5 794 m 高度层存在逆温层,梯度分别为 0.96 /100 m 和 0.94 /100 m。按照文献<sup>[8-9]</sup>中规定,粒子浓度超过 10 个 /cm<sup>3</sup> 时,可以看作是云滴。本文采用 > 2 μm 的粒子浓度超过 10 个 /cm<sup>3</sup> 并且液态含水量 > 10<sup>-4</sup> g/m<sup>3</sup> 的标准看作云水区,由图 4 可知,层状云分上、中、下 3 层,下层云厚约为 500 m,高度约为 3 700 ~ 4 200 m;中层云厚约为 700 m,高度约为 4 500 ~ 5 200 m,这 2 层中间是 300 m 厚

的干层;上层云高度为 6 200 ~ 6 300 m。

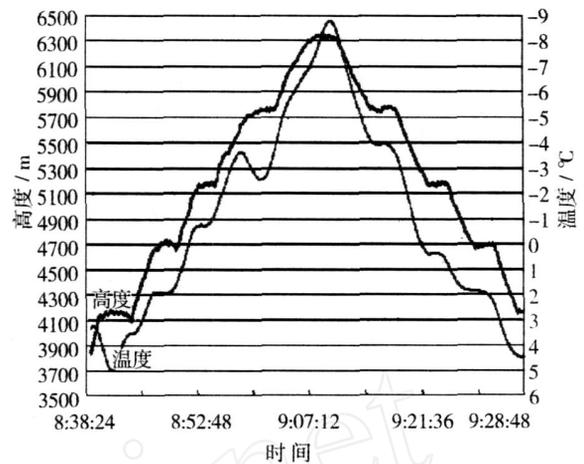


图 3 高度及温度随时间变化

Fig. 3 The temporal change of altitude and temperature

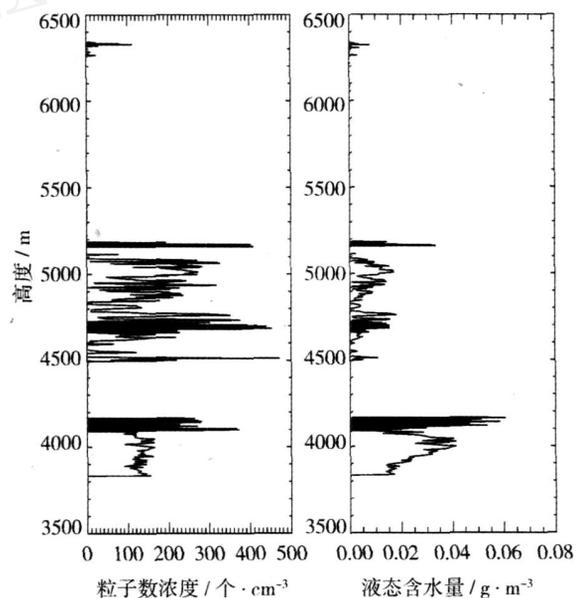


图 4 粒子数浓度与液态含水量随高度变化

Fig. 4 The concentration of particles and liquid water content change with height

2 垂直分布特征

2.1 云水含量和粒子浓度的垂直分布特征

飞机在爬升和下降过程中进行的测量可以得到云微物理量的垂直结构。因此选取不同时段的观测资料可以分析云微物理特性的垂直分布,通过对云粒子探测资料分析发现:在此次垂直探测期间一共取得了 2 929 个记录,按照文献 [10 - 11],以粒子浓度 > 10 个 / cm<sup>3</sup> 并且液态含水量 > 10<sup>-4</sup> g/m<sup>3</sup> 的标准

看作云水, 按此划分, 一维探头 FSSP 取得 745 份云水资料, 其中云滴数浓度  $> 100$  个  $/\text{cm}^3$  的比率为 55.17%, 云水出现频率为 25.44%, 其中 67.38% 是过冷水。云中平均含水量为  $0.012 \text{ g}/\text{m}^3$ , 云中  $> 0.036 \text{ g}/\text{m}^3$  的含水量占 47.75%,  $> 0.1 \text{ g}/\text{m}^3$  的含水量占 8.99%, 由于此次探测的云系无降水, 和我国北方几省的情况 (降水性云) 相比较<sup>[2]</sup> (表 1) 稍微偏小。探测到的最大过冷水含量为  $0.1064 \text{ g}/\text{m}^3$ , 出现在 6199 m, 温度  $-6.36$ 。在本次观测资料中, 共有 1771 个记录探测到粒子浓度, 浓度出现频率达 60.46%, 平均粒子浓度为 25.4 个  $/\text{cm}^3$ , 最大粒子浓度为 471 个  $/\text{cm}^3$ 。对有记录的粒子浓度进行统计分析, 其中 70.8% 的粒子浓度  $< 10$  个  $/\text{cm}^3$ 。由图 4 可以看出, 云中含水量的大小和粒子的数浓度有很好的对应关系, 数浓度大的地方对应着含水量的大值区。图 5 给出了 08:41~08:59 (对应于 4166~5748 m 高度层) 粒子数浓度与粒子大小关系, 可以看出, 数浓度大的区域以  $< 5 \mu\text{m}$  的云粒子为主, 在 4100 m 上下和 5000 m 上下云粒子谱明显拓宽。

表 1 我国北方几省云中过冷水含量飞机观测结果

Tab 1 The supercooled water content in northern China

观测地点	过冷水含量 $/(\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$
新疆层状云系	0.04~0.3
山东层状云系	0.001~0.36
河北层状云系	0.01~0.45
吉林层状云系	0.11 (As - Ns) 0.23 (Sc)
青海层状云系 (1995, 1997)	0.05 (平均)
西北地区层状云系 (2001)	0.036

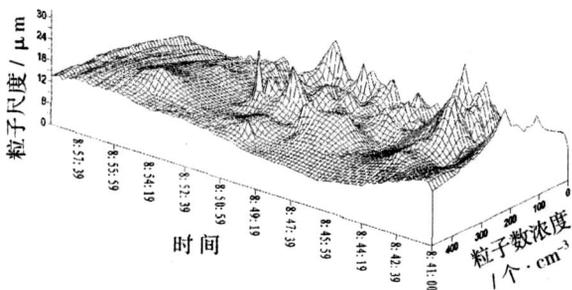


图 5 粒子数浓度与直径随时间变化图  
Fig 5 Evolution of the cloud droplet - size and concentration distribution

## 2.2 粒子大小的垂直分布

由资料分析得知, 探测到的粒子的直径与云滴含水量有很好的相关性, 粒子的直径  $8 \sim 20 \mu\text{m}$  区域主要集中在  $3800 \sim 4200 \text{ m}$  和  $4600 \sim 5100 \text{ m}$  高度层 (图 6)。在  $6000 \sim 6400 \text{ m}$  高度层上, 粒子的直径也达到了  $8 \sim 20 \mu\text{m}$ , 结合粒子在此高度层的数浓度和含水量分析, 推测此层粒子主要为冰晶和过冷水滴组成。把粒子的大小与数浓度及高度结合起来分析不同粒子的分布情况,  $< 8 \mu\text{m}$  的粒子在上下 2 个云层都有很好的分布, 并且有很高的数浓度, FSSP 探测数据中的粒子数浓度  $> 20$  个  $/\text{cm}^3$  在 90% 以上, 说明这部分有云滴存在。 $> 8 \mu\text{m}$  的粒子主要分布在  $3800 \sim 4200 \text{ m}$  层, 在  $5000 \text{ m}$  层上有少量分布, 其中大部分的粒子平均直径在  $8 \sim 12 \mu\text{m}$  之间, 数浓度较小, 在  $6 \sim 20$  个  $/\text{cm}^3$  之间。只有很少量的粒子直径超过了  $20 \mu\text{m}$ , 且数浓度非常小,  $< 2$  个  $/\text{cm}^3$ 。

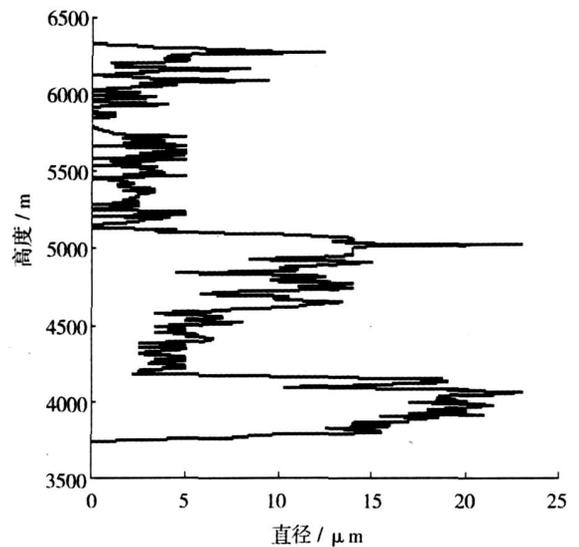


图 6 云滴直径随高度分布

Fig 6 The vertical distribution of cloudparticle 's diameter

## 2.3 云滴谱分布与云粒子尺度谱拟合

由于云中的粒子尺度谱的不同特征与认识云微物理机制有着密切联系, 即使在同一块云体内, 云滴谱特征也差异很大, 不同气团的空气所生成的云, 在云滴谱型和浓度上也有很大不同, 但是存在统计规律。例如直径为  $D$  大小的粒子浓度与直径的关系有:

$$N_D = aD^b \quad \text{幂函数分布 (a, b 2 参数定谱)} \quad (1)$$

$$N_D = aD \exp(-D) \quad \text{指数分布}$$

( $a, \gamma, \beta$  3参数定谱) (2)

$N_D = aD^{-\gamma} \exp(-\beta D)$  修正的 Gamma分布谱

( $a, \gamma, \beta, \delta$  4参数定谱) (3)

一般常用的是方程(2),  $a$ 为分布截距,  $\gamma$ 为分布斜率,  $\beta$ 为谱的形状参数,对于特定的粒子群(如云滴、雨滴、雪、冰晶)等,可以分别取特定的值,这样谱就由  $a$ 和  $\beta$ 决定,这就是双参演变<sup>[12-17]</sup>。图7为8月15日8时的不同高度粒子谱,其中数据为不同高度随机抽取。并且对抽取的实谱(实线)进行了拟合,虚线为拟合曲线。可以看出,用指数分布对实谱具有相当好的拟合能力。将观测到的云粒子实谱按照指数型、单峰型和多峰型等形状进行分类,发现指数型谱和单峰型谱这2种类型出现的几率最大,2种之和超过了80%。其中指数型的粒子谱宽较窄,粒子的数浓度随着粒子直径的增加单调下降;单峰型的粒子在5~8  $\mu\text{m}$ 处出现峰值,数浓度达到了120~150个/ $\text{cm}^3$ ;多峰型的粒子数浓度随着粒子直径的增大出现2次峰值或者多次峰值,第1极大峰值集中在6~8  $\mu\text{m}$ 处,第2极大峰值集中在16~18  $\mu\text{m}$ 处,在此次探测中,这种谱型主要出现在6000 m高度层以上。以2D-C探测的资料分析,冰晶的粒子谱的主要形态为指数型。总的来说,指数形状的谱型在整个云层都有分布,但在云底占多,单峰型主要出现在云中,而云上部多出现多峰型,因此说明云上部存在着蒸发与凝结的相变过程。

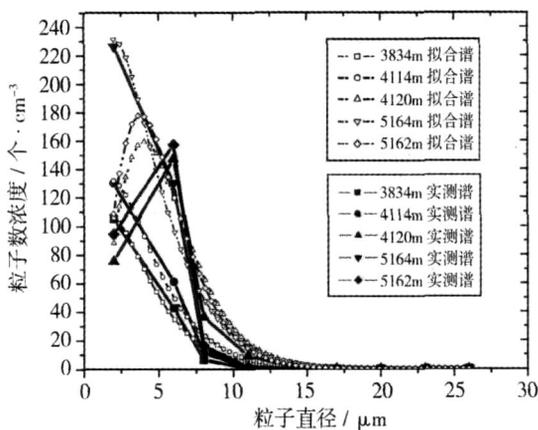


图7 粒子实谱与拟合谱垂直分布图

Fig 7 The vertical distributions of the measured and simulated spectra of cloud drops

## 2.4 云中的二维粒子图像

RMS探测系统有2个二维粒子探头,2D-P和

2D-P,分别测量25~800  $\mu\text{m}$ (主要是冰晶)和200~6400  $\mu\text{m}$ (主要是雨滴)的形状和谱分布。在自然界中,天然的固态凝结物主要有冰晶、雪花等几种形式,而冰晶的形状与生长的温度和水汽条件有很大关系。刘文保<sup>[18]</sup>研究发现,冰晶浓度分布具有如下特征:对于非降水云,一般只出现一个冰晶高浓度区,它位于-3~-7  $\mu\text{m}$ 范围内,有的也可能不存在这样一个冰晶高浓度区。此次非降水云探测资料分析知,冰晶出现的区域集中在-3~-6  $\mu\text{m}$ 之间,冰晶的形态主要为小冰针(柱状冰晶),但是平均浓度较小。同时,在这个温度区域也存在大量的水滴和软雹。

## 3 小结

这次探测的云系为非降水层云,且云体整体已经过山,但是仍然得到了一些有意义的观测结果。

(1)探测的云体结构分为上、中、下3层,结构清楚,并且云中有逆温层存在。云中平均含水量为0.012  $\text{g}/\text{m}^3$ ,粒子含水量主要集中在4100~4200 m与4700~5000 m层之间,并且这2层的粒子数浓度亦比较大。

(2)云的实测粒子谱分析表明,在此云系中,指数型谱主要出现在云层底部,而多峰型主要出现在云体上部。冰晶的主要形态为小冰针(柱状冰晶),其粒子谱以指数型居多。

(3)这次探测的云系基本符合Bergeron提出的催化云-供水云相互作用导致降水的概念模型。上层催化云提供降水胚,下层提供水汽。由于在层状云的顶层有冰晶,下层有丰水区存在,可以采用在顶层进行人工引晶的方法,破坏层状云本身的稳定状态,从而达到降水的目的。

## 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 李淑日.西北地区云和降水微物理特征个例分析[J].气象,2006,32(08):59-63.
- [3] 李淑日,王广河,刘卫国.降水性层状云微物理结构个例分析[J].气象,2001,27(11):17-21.
- [4] 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(增刊):10-13.
- [5] 游来光,马培民,胡志晋.北方层状云人工降水实验研究[J].气象科技,2002,30(增刊):19-63.
- [6] 北京大学地球物理系大气物理教研室云物理教学组编.云物理学基础[M].北京:农业出版社,1981.

- [7] 魏强, 高建春, 钱越英. 机载粒子测量系统及资料处理 [J]. 气象, 1997, 23 (5): 38 - 41.
- [8] 李照荣, 陈添宇, 杨珍贵, 等. 秋季冷云结构及人工增雨可播区的评估 [J]. 干旱气象, 2003, 21 (1): 34 - 37.
- [9] 庞朝云, 李照荣, 杨增梓. GPS在飞机增雨中的应用 [J]. 干旱气象; 2003, 21 (1): 38 - 39.
- [10] 游来光. 利用粒子测量系统研究云物理过程和人工增雨条件——云降水物理和人工增雨技术研究 [M]. 气象出版社, 1994. 236 - 249.
- [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] 许焕斌, 王思微, 杨亚萱. 从暴雨的云物理数值模拟看暴雨形成中的某些问题——强对流文集 [M]. 北京: 气象出版社, 1983. 180 - 188.
- [13] 许焕斌, 王思微. 一维时变冰雹云模式研究 (一): 反映雨和冰雹谱的双参数演变 [J]. 气象学报, 1985, 43 (1): 13 - 15.
- [14] 许焕斌, 王思微. 一维时变冰雹云模式研究 (二): 反映融化对冰雹谱双参数演变的影响 [J]. 气象学报, 1985, 43 (2): 163 - 171.
- [15] 胡志晋, 严采繁. 层状云微物理过程的数值模拟 (一): 微物理模式 [J]. 气象科学研究院刊, 1986, 1 (1): 37 - 52.
- [16] 胡志晋, 何观芳. 积雨云微物理过程的数值模拟 (一): 微物理模式 [J]. 气象学报, 1987, 45 (4): 467 - 484.
- [17] 李照荣, 李荣庆, 陈添宇, 等. 春季冷锋天气过程层状云微物理结构个例分析 [J]. 干旱气象, 2004, 22 (4): 40 - 45.
- [18] 刘文保. 冷云中冰晶浓度的分布特征 [J]. 高原气象, 1986, 5 (1): 55 - 63.

## Analysis on Microphysical Structure of a Summer Stratus over Qilian Mountain

ZHANG Yixuan<sup>1</sup>, PANG Zhaoyun<sup>1</sup>, LI Zhaorong<sup>1</sup>, ZHANG Jianhu<sup>1</sup>, TAN Qiuzhong<sup>2</sup>

(1. Weather Modification Office of Gansu Province, Lanzhou 730020, China;  
2. Shanglin Meteorological Station of Guangxi, Shanglin 530050, China)

**Abstract:** The FMS probes were used to measure microphysical parameters of a summer stratus on August 15, 2007 in Minle of Gansu Province. The cloud structure including particle's vertical distribution, liquid water content and particle spectrum type was analyzed. Results show that: (1) the cloud structure of the stratus is clear, and there is an inversion layer in this cloud; (2) the average of liquid water content is  $0.012 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$  in the cloud, and mainly concentrated in the layers of 4 100 - 4 200 m and 4 700 - 5 000 m; (3) this cloud accords with the Bergeron's catalytic cloud and water cloud interaction model, so we can seed crystals to achieve the objective of increasing precipitation.

**Key words:** microphysical structure; liquid water content; FMS; stratus; cloud particle spectrum