

周黎明,牛生杰,王俊. 2014. 不同天气系统层状云微物理特征个例分析. 气象, 40(3):327-335.

不同天气系统层状云微物理特征个例分析^{* 1}

周黎明¹ 牛生杰² 王 俊¹

1 山东省人民政府人工影响天气办公室, 济南 250031

2 南京信息工程大学大气物理与大气环境重点实验室, 南京 210044

提 要: 利用 PMS 粒子测量系统和机载温湿仪观测获取的吉林省 2007 年 5 月 15 日高空槽和 5 月 28 日冷涡天气下降水云垂直探测资料, 对比分析了两次不同天气系统下形成降水过程中云系的宏观观结构特征。结果发现, 高空槽影响下的 As 云中云滴数浓度最大值比冷涡影响的 As-Sc 云系高一倍; 液态水含量方面, 高空槽系统下 As 云中在 0℃ 附近取得最大值, 冷涡系统下 As-Sc 云系中, 最大值出现在上层 As 云中 -4.8℃ 左右处。高空槽系统影响下的 As 云中, FSSP-100、2D-C 和 2D-P 探测到的粒子数浓度、含水量和平均直径随高度呈不均匀性分布; 而冷涡影响的 As-Sc 云中, FSSP-100 测得 As 云中粒子平均直径远大于 Sc、2D-C 和 2D-P 探测到的上层 As 云中粒子浓度和液态含水量分布相对均匀, 而下层 Sc 中粒子浓度、液态含水量值和平均直径都很小, 这是由于云层之间存在干层, 使 As 云中的部分大云滴和雨滴在下降过程中迅速蒸发, 不利于降水形成。不同高度层 FSSP-100 测得的粒子平均谱分布均差异较大。对云中可播性进行研究, 结果发现高空槽影响的 As 云中可播区均为强可播区, 冷涡系统影响的 As-Sc 云中可播区的 1/2 为强可播区。

关键词: 层状云, 微物理特征, 云滴谱, 可播性

中图分类号: P401

文献标志码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2014.03.008

Case Analysis on Microphysical Characteristics of Stratiform Cloud Under Synoptic Systems

ZHOU Liming¹ NIU Shengjie² WANG Jun¹

1 Shandong Weather Modification Office, Jinan 250031

2 Key Laboratory of Atmospheric Physics and Atmospheric Environment, NUIST, Nanjing 210044

Abstract: Two cases of stratiform cloud precipitation in Jilin Province under the upper-level trough process on 15 May and the cold vortex on 28 May 2007 are analysed. The microphysical data are sampled with the airborne PMS probes and a hygrothermoscope. It is found that the vertical distribution of particle number concentration, liquid water content, mean diameter of FSSP-100, 2D-C and 2D-P probes under upper-level trough on 15 May are not uniform and the maximum liquid water content is in 0℃ layer. In As-Sc under cold vortex on 28 May, the maximum particle number concentration of FSSP-100 in Sc and As are both 350 cm^{-3} ; the maximum LWC in As is one ordering more than in Sc and mean diameter in As is far more than in Sc. The particle number concentration and liquid water content of 2D-C and 2D-P in As are symmetrical, but teeny in Sc because of a dry layer between layers. The layer-averaged size distributions of small cloud particles in cloud of 2 cases are quite different. The seedability of cloud is studied. The result shows that the seedability of As clouds under upper-level trough is highly seedable clouds, the seedable clouds of As-Sc cloud system under cold vortex are 1/2 highly seedable clouds.

Key words: stratiform cloud, microphysical characteristics, could droplet-size distribution, seedability

* 国家自然科学基金重点项目(40537034)和山东省气象局课题(2012sdqxz07、2012sdqx12 和 2013sdqx19)共同资助
2013 年 1 月 22 日收稿; 2013 年 7 月 11 日收修定稿
第一作者: 周黎明, 主要从事云物理和人工影响天气工作. Email: zlmlove@163.com

引言

吉林省地处我国东北地区,4—5月降水量仅占全年的13%,因此春旱发生频率很高,尤其是西部地区有“十年九春旱”之说。多年来,该地区为缓解旱情开展了春季人工增雨催化作业。在此期间,层状云降水是主要降水类型,降水过程的云微物理结构的观测在云物理研究和人工影响天气中占有重要的地位。不同的天气系统和不同地形条件下,层状云系的宏、微观结构和降水物理过程存在着多变性和复杂性(胡志晋,2001;刘晴等,2013;石爱丽等,2013;罗俊颖等,2012)。游景炎等(1994)、陈文选等(1999)、李仑格等(2001)、赵仕雄等(2002)、王扬锋等(2007)及李铁林等(2010)分别利用PMS在新疆、山东、青海、陕西、河南等地的探测资料,分析了特定天气条件下云层的微物理特征,指出可能发生的云水转换生长机制和人工增雨的条件。

过冷水含量是人工增雨催化作业关心的云微观特征。樊曙先(2000)对宁夏地区一次降水云系PMS探测资料进行分析,发现液态含水量最大值出现在 -5°C 层附近。彭亮等(2007)对河南省一次云降水过程的微观物理特征进行分析发现,此次降水为锋上高积云(Ac)和其下部液水较为丰沛的层积云(Sc)结合而成,在Ac云中的 -4.8 和 0°C 处液态水含量出现高值,Sc云中的 0°C 附近液态水含量出现高值。

研究云中可播性对人工增雨来说具有重要指导意义。杨文霞等(2005)对1992年6月飞机探测河北省两次个例的云中可播性进行判别,发现潜力区占云区的1/2左右,有时存在大片可播区。刘健等(2005)分析2001、2002年5—7月降水性层状云的飞机探测资料发现,吉林省春季降水性层状云的可播度为86%,其中Ns云型潜力最大(41.3%),其次是As op-Sc op云型(28.4%),潜力最小的是As tra(26.6%)。孙鸿娉等(2011)利用DMT探测平台对山西一次云降水过程实施综合探测分析表明,只有当云粒子浓度不小于 $30\text{个}\cdot\text{cm}^{-3}$ 时,相应云区才具有一定的可播度。

本文利用机载PMS粒子探测系统,根据2007年5月15日和28日获取的吉林省两次不同天气系统层状云降水过程的飞机观测资料,同时结合天气图和卫星云图分析了降水时云系的微观特征量,包

括数浓度、平均直径、液态含水量、云滴尺度分布等,讨论了冷云中人工降水的可播度,对深入认识吉林省春季不同天气系统(高空槽和冷涡)影响下形成的层状云降水和开展人工增雨作业等方面具有一定的参考价值。

1 观测设备和资料情况

本文选取2007年5月15日的高空槽天气过程和5月28日的冷涡天气过程的飞行个例进行分析。2007年5月15日飞行探测时间为15:08—16:45,探测区域为长春、公主岭、四平 and 伊通;5月28日飞行探测时间为05:52—08:27,探测区域为长春、乾安、白城、开通和长岭(图1)。

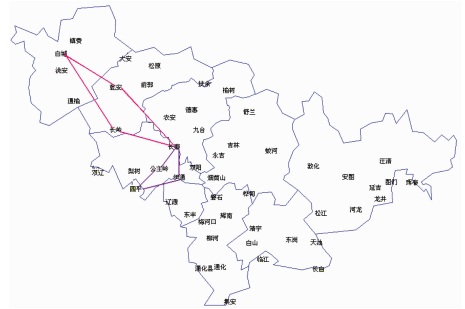


图1 2007年5月15日和28日飞行作业区域

Fig.1 Aircraft's flying areas on 15 May and 28 May 2007

观测过程中使用的人工增雨飞机装有美国生产的机载PMS粒子测量系统,该设备有3个探头,即FSSP-100、OAP-2D-C和OAP-2D-P。其中FSSP用于测量云滴谱,仅有粒子尺度和数浓度资料,称为一维资料;OAP-2D-C和OAP-2D-P分别用于测量大的云滴、雨滴和冰雪晶粒子,它们不仅能记录粒子个数,还能记录粒子尺度和二维图像,并可对其相态、降水粒子形态进行区分,称为二维资料。探测过程中同时使用了机载温湿仪和全球卫星定位系统(GPS)。本文分析的两次天气过程都取得了较为完整的FSSP、2D-C和2D-P资料。表1为本文所用

表1 所用PMS探头的测量范围和分辨率

Table 1 The range and resolution of PMS used in cases

探头	测量范围/ μm	分辨率/ μm
FSSP-100	2~47	3
OAP-2D-C	25~800	50
OAP-2D-P	200~6400	400

PMS三个探头的测量范围和分辨率。

2 天气形势特征

2.1 高空槽天气形势

2007年5月15日08时(北京时,下同),500 hPa高度从贝加尔湖至中蒙边界为一东北—西南走向低槽,吉林地区则为一弱高压脊控制。而在850 hPa低槽已移至 120°E 附近,槽后为一暖脊。地面冷锋走向与低槽基本一致,位于850与500 hPa之间,在东移过程中低槽逐渐加深,并于16日夜间移出吉林。15日08时,地面锋面附近部分站点已出现微量降水,14时吉林省部分地区出现阵雨,18时前后,开始出现大面积降水,截止16日20时降水基本停止,过程降水量大部达到中雨。从16日08时地面雨量图(图略)可以看到,长春、公主岭、四平 and 伊通4个测站分别出现16.1、16.4、18.4和15.6 mm的降水。

从卫星资料来看,5月14日16时冷空气主力位于贝加尔湖附近,同时从孟加拉湾至河套地区为西南—东北走向的水汽输送带,冷空气与水汽输送带在东移发展的过程中逐渐汇合,15日06时开始在蒙古东部地区产生大片云团,17时前后云团在吉林地区强烈发展,并长时间控制该地区,16日凌晨开始消散并逐渐移出吉林。

2.2 冷涡天气形势

2007年5月27日08时,500 hPa中蒙边界 110°E 附近为一低槽,在东移的过程中逐渐加深发展为冷涡,28日08时冷涡中心位于吉林省与内蒙古交界,吉林位于冷涡第四象限,850 hPa的辐合中心略偏东,吉林省东南部出现大面积降水;29日20时冷涡中心移至 42°N 、 130°E 附近,吉林转为涡后西北气流控制,降水也基本停止。28日20时地面雨量图(图略)显示长春站出现微量降水,长岭站有7.0 mm的降水。

从卫星云图来看(图略),5月27日06时,配合500 hPa低槽有一云带,已初步形成逗点云结构,涡旋中心位于 48°N 、 110°E ,在东移发展过程中逗点云结构逐渐明朗,28日早晨涡旋中心移至内蒙古东部,随后在东移的过程中逐渐减弱,29日凌晨移出吉林。

3 云系结构及物理特征

3.1 云的垂直宏观物理特征

晴天大气中气溶胶粒子的尺度大多 $<8\mu\text{m}$ 且谱很窄,在机载云粒子探测系统的FSSP-100探头上,只有前两档上存在粒子,峰值在一档上。一旦飞机入云观测,滴谱立即展宽,粒子数显著增多,峰值由一档右移,这一点所处的高度就可确定为云底。云顶和云底的判断方法正好相反(王扬锋等,2007)。

图2和图3分别给出了2007年5月15日和28日探测作业时PMS探测到的云微物理资料的垂直变化情况。可以看出,在高度2750 m处(图2)和高度2450 m处(图3)粒子浓度明显增多,液态水含量显著增加,因此可以确定两次降水过程中云底高度分别为2750和2450 m。从温度随高度的变化可以看到,5月15日 0°C 层高度在3392 m处,5月28日 0°C 层高度位于2780 m处。由FY-2C静止气象卫星反演云顶亮温资料(图略),可以估算出5月15和28日两次探测过程中云顶温度分别约为 -23°C 和 -17°C ,云顶高度分别约为7000和5500 m。由于吉林省所取飞机探测资料一般是与抗旱相结合,故获取的资料主要在作业层,无云顶资料。

通过飞机探测表明,2007年5月15日高空槽影响下形成的降水云为As云型;5月28日冷涡天气过程中形成的降水云为As-Sc云型,下部的一层较薄Sc云为暖云,上部的As云为冷云,两层云之间夹有干层。本次分析的两次降水性层状云型结构与刘健等(2005)发现的吉林省5—7月降水性层状云类型相符合。表2给出了两次不同天气系统降水云宏观物理参量值。

3.2 云系微物理特征分析

3.2.1 高空槽影响下As云系微物理结构

图2给出了2007年5月15日高空槽天气过程中FSSP-100探头各观测随高度的分布情况。由于探测期间选用的是FSSP-100探头的0量程,所以在 0°C 层以下探测到的是云滴粒子,而 0°C 层以上是冰晶和液滴共存体的分布情况(张佃国等,2007)。可以看到,云滴数浓度在云底2750 m附近取得最

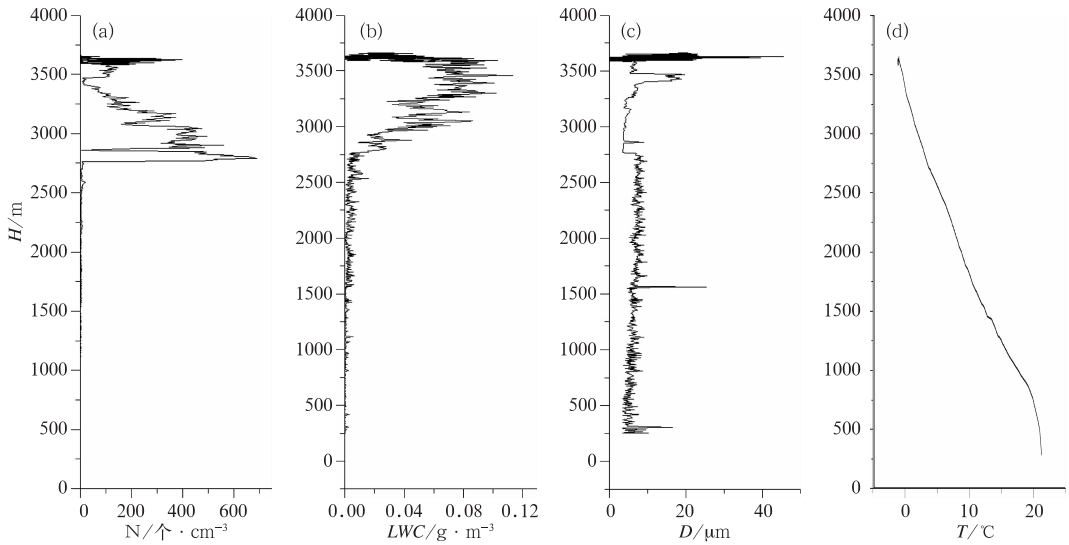


图2 2007年5月15日 FSSP-100 探测到的云滴数浓度(N)、云滴含水量(LWC)、云滴直径(D)和云中温度(T)垂直分布

Fig. 2 The vertical distribution of cloud droplet number concentration (N), liquid water content (LWC), diameter (D) and temperature (T) of FSSP-100 on 15 May 2007

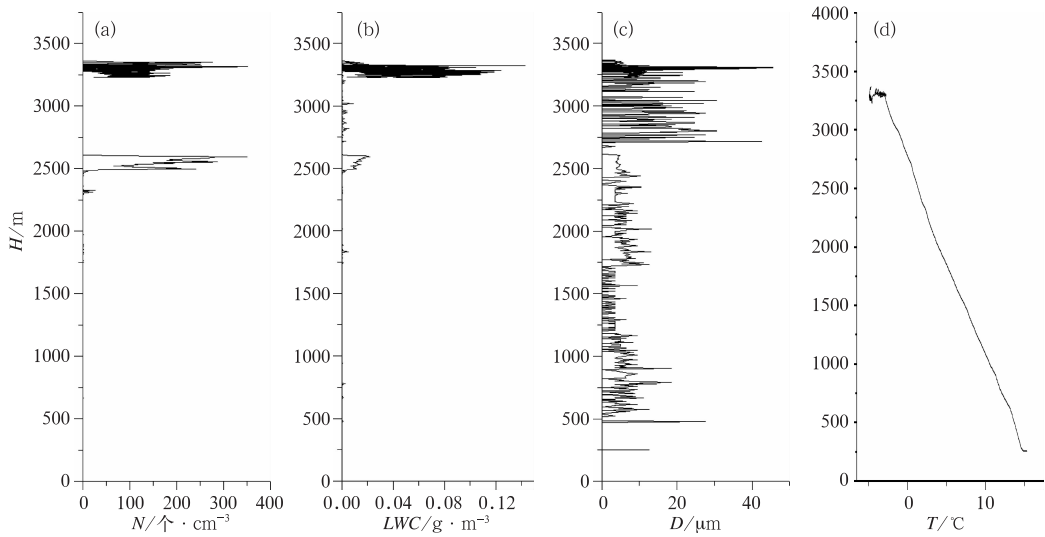


图3 同图2,但为2007年5月28日

Fig. 3 Same as Fig. 2, but on 28 May 2007

表2 两次不同天气系统降水云宏观参量

Table 2 The parameters of stratiform cloud under different synoptic systems

天气类型	云型	云底高度/m	云底温度/°C	0°C高度/m	云顶高度/m	云顶温度/°C	探测最高高度/m
高空槽	As	2750	3.46	3392	7000	-23	3663
冷涡	As-Sc	2450	1.58	2780	5500	-17	3366

大值 $690 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$, 与探测到的吉林地区层状云中云滴数浓度最大值 $670 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$ 相接近(崔莲等, 2007); 粒子数浓度随高度上升而逐渐减少, 直到 0°C 层附近开始增加; 平均数浓度为 $26 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$, 这与取得的兰州地区层状云云滴均值浓度相接近(李照荣等, 2003)。从液态含水量分布看, LWC 随

高度的变化趋势与粒子数浓度的垂直分布情况呈反相位, 在 0°C 层左右取得含水量最大值 $0.113 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。含水量较大处粒子直径也较大, 而粒子数浓度小, 可见含水量主要由大滴供应(封秋娟等, 2007)。由云滴直径垂直分布可知, 从云底到接近 0°C 层处直径在 $6 \mu\text{m}$ 左右变化幅度不大, 0°C 层处

云滴平均直径增大到 $20\ \mu\text{m}$; $3600\ \text{m}$ 处平均直径达到最大值 $45.5\ \mu\text{m}$ 。

图 4 是 2D-C 和 2D-P 探测得到的 2007 年 5 月 15 日粒子特征量垂直分布情况。可以看到, 2D-C 探测到的粒子数浓度和液态水含量变化趋势对应较好, 高浓度对应着高的液态水含量。从云底到 $2900\ \text{m}$ 处粒子数浓度和含水量变化不大, 随后开始增加, 在 $3000\ \text{m}$ 左右粒子数浓度和含水量达到一极大值, 从 $3000\text{--}3200\ \text{m}$ 间呈递减趋势, $3200\ \text{m}$ 向上两者均出现振荡变化, 在 0°C 层附近出现粒子数浓度最大值 $49.3\ \text{个}\cdot\text{L}^{-1}$, 同时对应液态水含量最大值 $0.43\ \text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。2D-C 所测粒子平均直径在云中变化范围不大, 基本保持在 $240\ \mu\text{m}$ 左右。2D-P 探测到的降水粒子, 0°C 层 ($3392\ \text{m}$) 以上, 粒子为固态冰雪晶; 0°C 层以下, 主要为液滴。从图 4 中可以

看出, 0°C 层以下粒子数浓度随高度下降而递减, 这是由于暖层中存在雨滴的碰并、蒸发和聚合。在含水量方面, 先是随高度下降呈增加趋势, 并在 0°C 层以下 (约 $3000\ \text{m}$ 处) 出现液态水含量最大值 $0.165\ \text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 而后随高度下降呈减少趋势。粒子平均直径出现两个极大值, 分别在 0°C 层以上 $3450\ \text{m}$ 和 0°C 层以下 $3200\ \text{m}$ 附近处, 其中 $3200\ \text{m}$ 左右处直径极大值达 $1400\ \mu\text{m}$, 这是由于粒子在下落到 0°C 层以下固态粒子开始融化为液态水, 并有较大粒子在下降过程中碰并小粒子所造成的。

3.2.2 冷涡影响下 As-Sc 云系探测

图 3 给出了 2007 年 5 月 28 日冷涡天气过程中 FSSP-100 探头观测到的云滴数浓度、液态含水量和平均直径随高度分布情况。可以看出, 下层 Sc 云和上层 As 云中云滴数浓度最大均达 $350\ \text{个}\cdot\text{cm}^{-3}$,

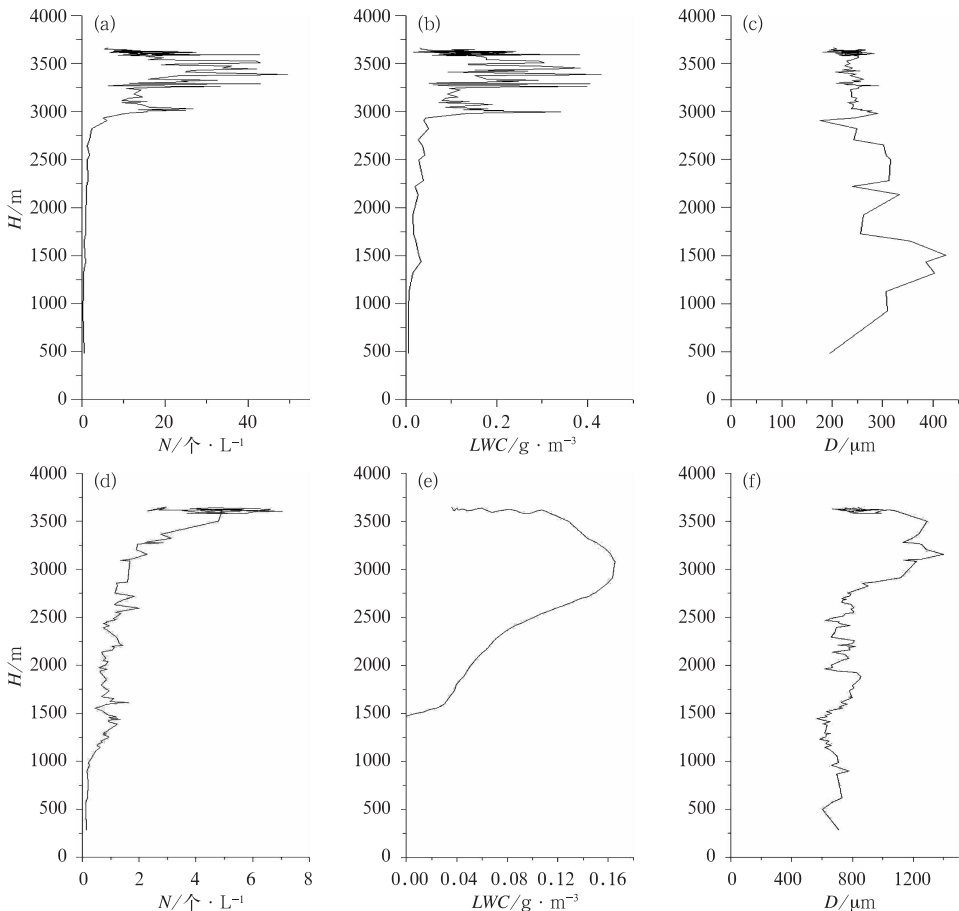


图 4 2007 年 5 月 15 日 2D-C、2D-P 探测粒子特征量垂直分布
 (a) 2D-C 粒子数浓度, (b) 2D-C 液态含水量, (c) 2D-C 粒子直径,
 (d) 2D-P 粒子数浓度, (e) 2D-P 液态含水量, (f) 2D-P 粒子直径

Fig. 4 The vertical distribution of cloud microphysical values with 2D-C and 2D-P probes on 15 May 2007
 (a) N with 2D-C probe, (b) LWC with 2D-C probe, (c) D with 2D-C probe,
 (d) N with 2D-P probe, (e) LWC with 2D-P probe, (f) D with 2D-P probe

粒子数浓度量级为 $100 \sim 102$ 个 $\cdot \text{cm}^{-3}$, 这与对河南省降水性层状云系的观测结果有相同的量级(李淑日等, 2001)。在液态含水量方面, 下层 Sc 云中平均值为 $0.01 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$, 最大值为 $0.022 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$, 远小于对 2004 年吉林省降水性层状云中液水含量的观测值(封秋娟等, 2007); 上层 As 云中在 3320 m (-4.8°C) 处取得最大值 $0.142 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$, 含水量上层高于下层, 两者相差一个量级, 同一层中分布也不均匀。Sc 云中云滴平均直径在 $5 \mu\text{m}$ 左右振荡, 云中主要是直径较小的云滴; As 云中云滴直径最大为 $45 \mu\text{m}$, 此层中云滴直径较 Sc 云层中明显增大; 干层中的平均直径也较大, 这是由于上层的小滴下落到干层中蒸发掉, 只剩下直径较大的粒子。

从 2D-C、2D-P 探测到的 2007 年 5 月 28 日粒子特征量垂直分布来看(图 5), 上层 As 冷云中粒子数浓度和液态含水量分布相对均匀。二维云粒子探头 2D-C 在 0°C 层以上探测到的粒子以冰晶为主, 本次探测中 0°C 层以上冰晶平均浓度为 16.2 个 $\cdot \text{L}^{-1}$, 与河北 15.6 个 $\cdot \text{L}^{-1}$ 的观测结果相

近; 3323 m (-4.83°C) 左右存在极大值, 最大浓度为 195 个 $\cdot \text{L}^{-1}$, 这与过去多年对吉林降水性层状云观测的冰晶浓度平均值 26.2 个 $\cdot \text{L}^{-1}$ 和最大浓度值 222 个 $\cdot \text{L}^{-1}$ (汪学林等, 1998) 相比, 此次观测值均偏小。在 2D-C 探测到最大冰晶浓度处 (-4.83°C), 过冷水含量也取得最大值 $2.12 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。2D-P 在 3320 m (-4.8°C) 附近探测到的粒子最大数浓度为 5.9 个 $\cdot \text{L}^{-1}$, 对应过冷水含量的最大值 $0.099 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。2D-C 测的平均直径为 $50 \sim 365 \mu\text{m}$, 2D-P 测得粒子平均直径为 $410 \sim 1430 \mu\text{m}$ 。在下层 Sc 中粒子数浓度、液态含水量值和平均直径都极小, 这表明云层之间干层的存在使得 As 云中的部分大云滴和雨滴在下降过程中迅速蒸发, 很大程度上阻碍了上层冷云中冰雪晶粒子下落到低层暖云, 不利于降水的形成, 这也是导致本次降水较小的主要原因(党娟等, 2009)。

3.3 云粒子尺度谱的垂直分布

同一块云体内云滴谱特征各处差异很大, 不同

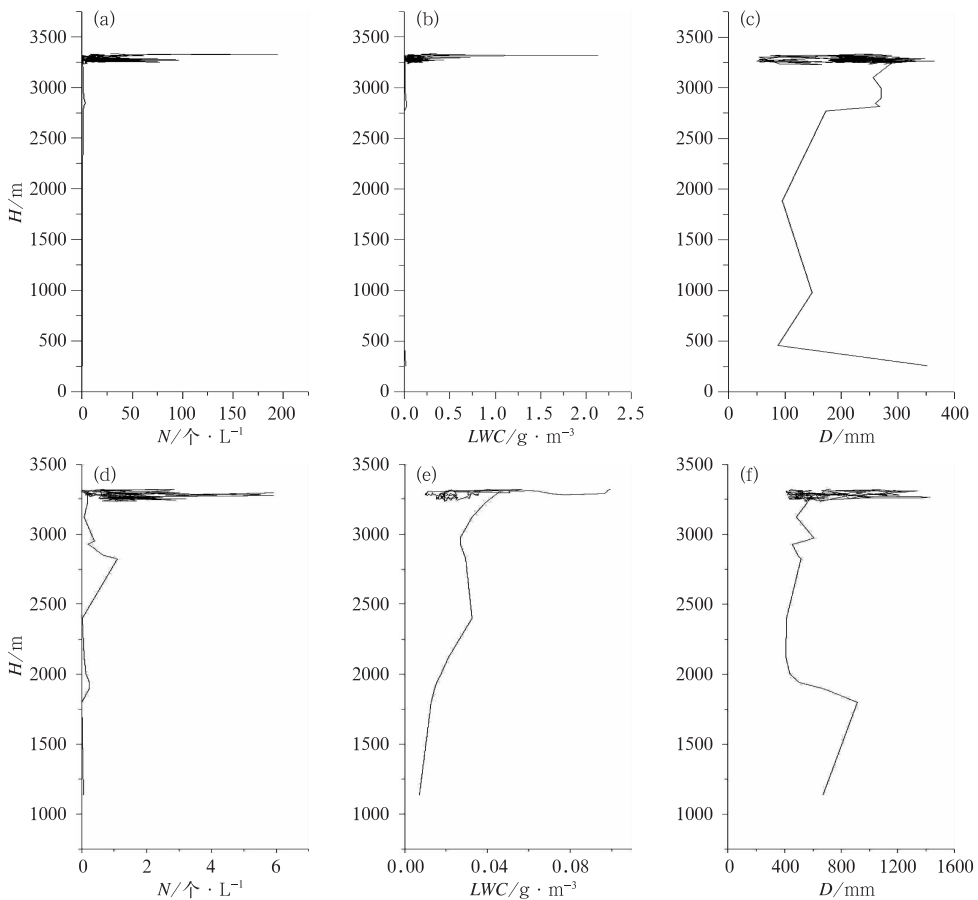


图 5 同图 4, 但为 2007 年 5 月 28 日

Fig. 5 Same as Fig. 4, but on 28 May 2007

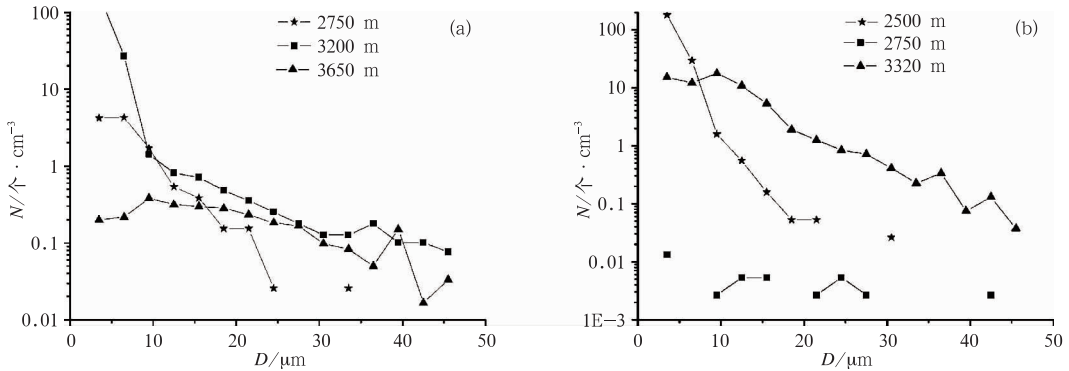


图6 2007年5月15日(a)和28日(b)FSSP-100所测量的不同高度云粒子谱
 Fig. 6 Particle spectra getting by FSSP-100 in layers on (a) 15 May 2007, (b) 28 May 2007

类型的云在滴谱特征上也有明显的差异。属于不同气团的空气生成的云,由于凝结核谱和上升气流不同,在云滴浓度和谱型上有很大的不同。层状云云粒子谱型主要有单峰型、负指数型和双峰型,有时也会出现多峰型。云系结构的不同使云滴在各高度层上表现出不同谱型,同高度上的谱型十分相似(樊鹏等,2003)。

图6给出了FSSP-100所测量不同高度层的云粒子谱。FSSP-100的采样频率是1s,图中谱型数据均为所取高度附近每5s数据的平均值。图6a为2007年5月15日粒子谱分布,选取上升阶段2750m(暖区)、3200m(0°C层附近)及3650m(冷区)高度上的滴谱作对比。从图中可以看出,云底2750m层滴谱呈双峰分布,峰值分别出现在6.5和21.5 μm 处,谱宽较窄,数浓度量级为 $10^{-2} \sim 10^0$ 个 $\cdot\text{cm}^{-3}$;同时在较大的粒子区域出现了谱型不连续现象,这种不连续变化是与高层大粒子沉降有关。3200m层谱型为负指数型,粒子谱加宽,数浓度量级为 $10^{-2} \sim 10^2$ 个 $\cdot\text{cm}^{-3}$ 。3650m层谱型呈多峰结构,粒子的数浓度量级为 $10^{-2} \sim 10^{-1}$ 个 $\cdot\text{cm}^{-3}$ 。云中不同高度处云粒子谱型各异,这主要是受温度、垂直速度、湍流和水汽的影响,云层的垂直方向特别不均匀,粒子谱型正好显示了这种特征(李照荣等,2003)。对比云中数浓度可见,3200m层粒子数浓度最大;粒径小于15 μm 段,暖区2750m层数浓度大于冷区3650m层,而对于粒径大于15 μm 的粒子,暖区2750m层数浓度低于冷区3650m层浓度,说明在暖区存在小云滴浓度的高值区,而在冷区则存在大滴浓度的高值区。暖云2750m层粒子谱宽明显窄于冷云3650m层,且在3650m层高度层出现粒子谱第二峰值直径39 μm ,这是表明存在冰晶粒子的特征之一(游景炎等,1994)。

图6b是2007年5月28日FSSP-100所测量的不同高度粒子谱分布情况,选取上升阶段中2500m(暖区)、2750m(0°C层附近)和3320m(冷区)高度上的滴谱作比较。可以看到,不同高度上的云中粒子谱和干层区中的粒子谱型存在明显差异(王广河等,1989),干层区粒子数浓度远远低于云中粒子数浓度。2500m层粒子谱型为负指数型;小粒子段浓度高,数浓度为 10^2 个 $\cdot\text{cm}^{-3}$ 量级。2750m层为多峰结构;粒子浓度低,在 $10^{-3} \sim 10^{-2}$ 个 $\cdot\text{cm}^{-3}$ 量级范围内。3320m层云粒子谱也呈多峰分布,峰值直径分别为9.5、36.5和42.5 μm ;数浓度量级为 $10^{-2} \sim 10^1$ 个 $\cdot\text{cm}^{-3}$ 。粒径小于7 μm 段,下层暖区Sc云(2500m)粒子数浓度大于上层冷区As云(3320m)粒子浓度;粒径大于7 μm 时,As云中粒子数浓度大。小粒子段云中粒子数浓度高于干层3~4个量级,30 μm 以上的较大粒子段中云粒子数浓度高于干层1~2个量级;这与李淑日等(2001)的结果一致。干层粒子主要由上层As云中落下,因此在干层中探测到下落粒子的低浓度区,抑制了上层冷云粒子下落至低层暖云,对降水的形成造成不利影响。

4 冷云人工增雨可播性分析

人工降水的可播度是指对即将作业的云系进行是否作业的可能性大小的判断,从微物理角度考虑就是由云系中云滴和冰晶的数密度来确定是否对该云层进行作业(刘健等,2005)。表3给出了北方层状冷云人工增雨可播度判别指标(中国气象局科技发展司,2003),若FSSP-100探测的粒子数密度不小于20个 $\cdot\text{cm}^{-3}$ 的云区才具有一定的可播性,其中2D-C探测的大粒子数密度 <20 个 $\cdot\text{L}^{-1}$ 时,确定为强可播区,否则为可播区。根据上述判别指标,分

析 2007 年 5 月 15 和 28 日层状冷云中人工增雨可播性。

表 3 层状冷云人工增雨可播度判别指标
Table 3 Cooled stratus seeding criterion in artificial precipitation

$N_1/\text{个} \cdot \text{cm}^{-3}$	<20	≥ 20
$N_2/\text{个} \cdot \text{L}^{-1} < 20$	不可播	强可播
$N_2/\text{个} \cdot \text{L}^{-1} \geq 20$	不可播	可播

N_1 : FSSP-100(2~47 μm) 所测云滴数密度, N_2 : OAP-2D-C(25~800 μm) 所测粒子数密度

4.1 高空槽天气过程中冷云可播性分析

根据人工增雨可播性判别指标, 2007 年 5 月 15 日 15:20:13—16:07:27 飞过的冷云中 共有 3 个可播区, 分别为 15:20:27—15:23:15、15:23:23—15:23:27 和 15:29:36—15:29:58 飞过的冷云区, 并对应地依次记为 1—3 可播区; 其他云区为不可播区 (见图 7)。

表 4 给出了 3 个可播区中 OAP-2D-C 和 FSSP-100 所测粒子数密度 (N_2 和 N_1), 其中 N_1 平均值分别为 137、59.5 和 149 $\text{个} \cdot \text{cm}^{-3}$, 对应的 N_2 平均值为 19.8、13.9 和 6.78 $\text{个} \cdot \text{L}^{-1}$ 。根据层状冷云人工增雨可播度判别指标可知, 3 个可播区均为强可播区。

表 4 2007 年 5 月 15 日可播区中 OAP-2D-C、FSSP-100 所测粒子数密度

Table 4 The particle density of OAP-2D-C and FSSP-100 in seedable cloud area on 15 May 2007

时间	$N_1/\text{个} \cdot \text{cm}^{-3}$	$N_2/\text{个} \cdot \text{L}^{-1}$	可播区
15:20:27—15:23:15	137	19.8	1
15:23:23—15:23:27	59.5	13.9	2
15:29:36—15:29:58	149	6.78	3

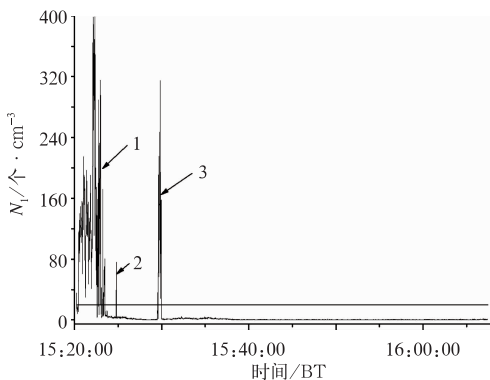


图 7 2007 年 5 月 15 日冷云中可播性分析
Fig. 7 The analysis of seedability in cold cloud on 15 May 2007

4.2 冷涡天气过程中冷云可播性分析

2007 年 5 月 28 日 06:25:11—07:52:36 飞过的冷云中有 4 个可播区, 其他云区为不可播区。4 个可播区分别是 06:34:15—06:37:17, 06:39:45—06:52:44, 07:41:13—07:43:03 和 07:44:46—07:48:48 飞过的冷云区, 并记为 1—4 可播区 (见图 8)。

表 5 给出了 4 个可播区中 OAP-2D-C 和 FSSP-100 所测粒子数密度 (N_2 和 N_1), 其中 N_1 平均分别为 119、94.4、43 和 47.2 $\text{个} \cdot \text{cm}^{-3}$, 对应的 N_2 平均为 1.73、42.1、25.5 和 10.2 $\text{个} \cdot \text{L}^{-1}$ 。根据表 3 中的可播度判别指标可知, 1 区和 4 区为强可播区; 2 区和 3 区冰晶含量丰富, 均为可播区。

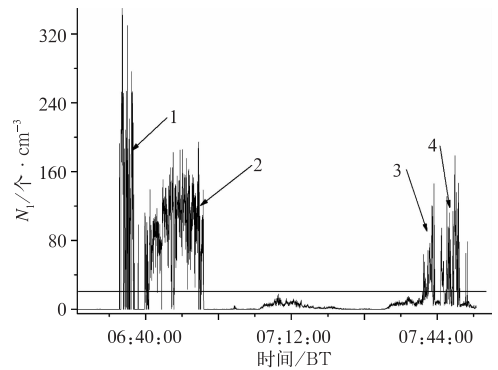


图 8 2007 年 5 月 28 日部分冷云中可播性分析
Fig. 8 The analysis of seedability of part cold cloud on 28 May 2007

表 5 2007 年 5 月 15 日可播区中 OAP-2D-C、FSSP-100 所测粒子数密度

Table 5 The particle density of OAP-2D-C and FSSP-100 in seedable cloud area on 15 May 2007

时间	$N_1/\text{个} \cdot \text{cm}^{-3}$	$N_2/\text{个} \cdot \text{L}^{-1}$	可播区
06:34:15—06:37:17	119	1.73	1
06:39:45—06:52:44	94.4	42.1	2
07:41:13—07:43:03	43	25.5	3
07:44:46—07:48:48	47.2	10.2	4

5 结 论

针对吉林省 2007 年 5 月 15 和 28 日两次不同天气系统中层状云飞行个例的 PMS 资料进行分析研究, 可以得到以下初步结论:

(1) FSSP-100 探测到高空槽影响下的 As 云中

云滴数浓度最大值为 $690 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$;冷涡影响的 As-Sc 云系中,上层 As 和下层 Sc 中云滴数浓度最大均为 $350 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$,两者相差一倍。As 中最大液态水含量是 $0.113 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$;As-Sc 中,Sc 云最大液水含量为 $0.022 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$,As 中最大值为 $0.142 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$,两个不同天气系统下 As 中液态水含量基本一致,均比 Sc 大一个量级。两次天气过程中 As 云的最大平均直径均为 $45 \mu\text{m}$ 左右,远大于 Sc 云中的 $5 \mu\text{m}$ 。

(2) 2D-C 探测到高空槽系统下 As 云中粒子最大浓度和最大液水含量值分别为 $49.3 \text{ 个} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.43 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$;冷涡系统下 As-Sc 云型中,上层 As 云中粒子浓度和 LWC 最大值为 $195 \text{ 个} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $2.12 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$,均比高空槽影响下 As 云中各值高一个量级。

(3) 不同天气系统中云粒子谱型因大气温度的不同,各高度层上谱型各异,均表现出云层的垂直方向分布不均匀性。高空槽影响的 As 云中,暖区 (2750 m)、 0°C 层附近 (3200 mm) 和冷区 (3650 mm) 滴谱谱型分别呈双峰、负指数型和多峰分布。冷涡系统影响的 As-Sc 云,暖区 Sc 云中 2500 m 层粒子谱型呈单峰分布,小粒子段浓度高;干层中 2750 m 层谱型为多峰结构,粒子浓度低,在 $10^{-3} \sim 10^{-2} \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$ 量级范围内;冷区 As 云中 3320 m 层云粒子谱也呈多峰分布,但浓度量级为 $10^{-2} \sim 10^1 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。小粒子段云中粒子浓度高于干层 $3 \sim 4$ 个量级, $30 \mu\text{m}$ 以上的较大粒子段云中粒子浓度高于干层 $1 \sim 2$ 个量级。

(4) 根据层状冷云人工增雨可播度判别指标,分析发现 5 月 15 日高空槽影响下 As 云中的可播区均为强可播区;而冷涡系统影响的 As-Sc 云系,可播区中 $1/2$ 为强可播区。

参考文献

陈文选,王俊,刘文. 1999. 一次冷涡过程降水的微物理机制分析. 应用气象学报,10(2):190-198.
 崔莲,郭学良,杨军. 2007. 吉林地区一次积层混合云宏微观结构特征观测分析. 吉林气象,1:31-34.
 党娟,王广河,刘卫国. 2009. 甘肃省夏季层状云微物理特征个例分

析. 气象,35(1):24-36.
 樊鹏,余兴. 2003. 陕甘宁人工增雨技术开发研究. 北京:气象出版社,101-108.
 樊曙先. 2000. 层状云微物理结构演变特征的个例研究. 宁夏大学学报(自然科学版),21(2):179-182.
 封秋娟,牛生杰,雷恒池,等. 2007. 吉林省一次层状云降水宏微观特征的观测研究. 南京气象学院学报,30(6):770-778.
 胡志晋. 2001. 层状云人工增雨机制、条件和方法的探讨. 应用气象学报,12(增刊):10-13.
 李仑格,德力格尔. 2001. 高原东部春季降水云层的微物理特征分析. 高原气象,20(2):191-196.
 李淑日,王广河,刘卫国. 2001. 降水性层状云微物理结构个例分析. 气象,27(11):17-21.
 李铁林,雷恒池,刘艳华,等. 2010. 河南春季一次层状冷云的微物理结构特征分析. 气象,36(9):74-80.
 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. 高原气象,22(6):583-589.
 刘健,李茂仑,蒋彤,等. 2005. 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. 气象科学,25(6):609-616.
 刘晴,姚展予. 2013. 飞机增雨作业物理检验方法探究及个例分析. 气象,39(10):1359-1368.
 罗俊颖,贺文彬,李金辉,等. 2012. 2003 年春季陕西省层状云降水的雨滴谱特征. 气象,38(10):1359-1134.
 彭亮,姚展予,戴进,等. 2007. 河南春季一次云降水过程的宏微观物理特征分析. 气象,33(5):3-11.
 石爱丽,郑国光,孙晶,等. 2013. 河南省一次秋季层状云降水增雨潜力的观测和数据值模拟分析. 气象,39(1):67-73.
 孙鸿娉,李培仁,闫世明,等. 2011. 华北层状冷云降水微物理特征及人工增雨可播性研究. 气象,37(10):1252-1261.
 王广河,游来光. 1989. 乌鲁木齐冬季冷锋锋上云带和锋下层积云的微物理结构及其降雪特征. 气象,15(3):15-19.
 汪学林,金德镇. 1998. 吉林春季降水性层状云降水机制的综合分析. 长春,国际第十届云物理会议文集.
 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. 高原气象,26(2):388-395.
 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. 高原气象,24(1):84-90.
 游景炎,段英,游来光. 1994. 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. 北京:气象出版社,236-249.
 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. 大气科学,31(4):596-610.
 赵仕雄,陈文辉,杭洪宗. 2002. 青海东北部春季系统性降水高层云系微物理结构分析. 高原气象,21(3):281-287.
 中国气象局科技发展司. 2003. 人工影响天气岗位培训教材. 北京:气象出版社,62-64.