

李义宇, 杨俊梅, 李培仁, 等. 2012. 物理结构探测分析 [J]. 气候与环境研究, 17 (6): 693–703, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2012.06.06. Li Yiyu, Yang Junmei, Li Peiren, et al. 2012. Detection analysis of microphysical structure of stratiform cloud in Shanxi Province [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17 (6): 693–703.

山西省层状云微物理结构探测分析

李义宇^{1,2} 杨俊梅² 李培仁² 申东东² 孙鸿娉² 封秋娟² 金莲姬¹

1 南京信息工程大学中国气象局大气物理与大气环境重点开放实验室, 南京 210044

2 山西省人工降雨防雹办公室, 太原 030032

摘 要 针对山西省 2009 年 6 月 18~19 日的一次降水过程, 利用机载 DMT 探测资料、Micaps 常规天气资料和卫星云图等资料分析了这次降水的宏观特征。结果表明: 这次降水是锋面云系产生的, 18 日山西省处于冷锋锋前, 19 日为冷锋锋后; 锋前云底较低, 云层较厚, 有夹层存在, 云中上升气流很强, 云滴数浓度最大为 280 cm^{-3} 、平均直径最大为 $15\text{ }\mu\text{m}$ 、含水量最大值为 0.35 g/m^3 , 云滴谱呈双峰或多峰型; 锋后云底较高, 云层较薄, 云滴数浓度最大值为 170 cm^{-3} 、平均直径最大为 $10\text{ }\mu\text{m}$ 、含水量最大值为 0.05 g/m^3 , 云滴谱呈双峰或多峰型; 层状云在垂直方向和水平方向均存在不均匀性; 垂直方向含水量变化与云滴尺度变化较为一致, 水平方向含水量增加主要因为大云滴数密度的增加; Γ 分布拟合云滴谱结果接近实际分布。

关键词 层状云 数浓度 含水量 云滴谱

文章编号 1006-9585 (2012) 06-0693-11

中图分类号 P426.51

文献标识码 A

doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2012.06.06

Detection Analysis of Microphysical Structure of Stratiform Cloud in Shanxi Province

LI Yiyu^{1,2}, YANG Junmei², LI Peiren², SHEN Dongdong², SUN Hongping²,
FENG Qiujuan², and JIN Lianji¹

1 CMA Key Laboratory for Atmospheric Physics and Environment, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

2 Weather Modification Office of Shanxi Province, Taiyuan 030032

Abstract A precipitation process in Shanxi Province during 18–19 June 2009 is analyzed using data from airborne Droplet Measurement Technologies observations, synoptic charts, and satellite cloud photographs. The results show that the precipitation process can be described as typical cold-front cloud precipitation. In the prefrontal zone on 18 June, the cloud base was low, and thick clouds with a strong updraft existing cloud-free area. The maximum number concentration and maximum mean diameter of the cloud droplets were 280 cm^{-3} and $15\text{ }\mu\text{m}$, respectively. The maximum cloud liquid water content (LWC) was 0.35 g/m^3 , and the cloud droplet spectra are mostly bimodal and multimodal. In the post-frontal zone on 19 June, the cloud base was high, and the clouds were thin. The maximum number concentration and maximum mean diameter of cloud droplets were 170 cm^{-3} and $10\text{ }\mu\text{m}$, respectively. The maximum cloud LWC was 0.05 g/m^3 , and the cloud droplet spectra are mostly bimodal and multimodal. The stratiform clouds in the vertical and horizontal directions were inhomogeneous. The diameter of the cloud droplets changed when the LWC changed in the vertical direction,

收稿日期 2012-08-05 收到, 2012-09-29 收到修定稿

资助项目 中国气象局云雾物理环境重点开放实验室开放科研课题 2009002, 中国气象局云雾物理重点开放实验室重点开放科研项目 2009Z0033, 公益性行业 (气象) 科研专项 GYHY201206025, 中国气象局业务项目云水资源评估 1220200108

作者简介 李义宇, 男, 1986 年出生, 硕士, 助理工程师, 主要从事云物理降水与人工影响天气方面研究。E-mail: lyy4077929@126.com

通讯作者 金莲姬, E-mail: jlj@nuist.edu.cn

and the LWC in the horizontal direction increased mainly because of the increase in the number density of large cloud droplets. The results of Γ distribution fitting of the cloud droplet spectra were close to the actual distribution.

Keywords Stratiform cloud, Number concentration, Liquid water content, Cloud droplet spectra

1 引言

云物理学的研究途径包括:对自然界的云和降水的形成、演变进行外场观测研究,对云物理过程的某些环节进行室内模拟试验,以及利用数学方法进行云物理过程的数值模拟研究等。其中,外场观测研究是认识云物理过程的最重要途径(游来光, 1994)。

层状云微物理结构的探测研究不仅是云和降水物理研究的重要内容,而且对科学实施人工影响天气作业也很重要。长期以来,对于不同类型云系云的微物理结构及其自然降水形成物理过程的观测研究,始终是人工影响天气领域研究的核心科学问题。从 20 世纪 70 年代以来,国内外许多科学家对层状云进行了大量的外场探测和数值模拟研究,主要有前苏联对冬季层状云的探测和人工影响试验、美国对温带气旋云系和地形云的探测和数值模拟以及我国北方层状云人工降水试验研究(李大山, 2002)。Korolev (1994) 从机载粒子测量系统 (Particle Measuring System, PMS) 的 FSSP-100 探头获取的资料分析得出,在层状云中粒子谱普遍呈双峰分布,这种现象与云中扰动密切相关。Liu and Lo (1989) 用 PMS 资料对中尺度对流系统中的层状云降水区的融化层及暖雨区的微物理过程进行了分析。廖菲等(2007)利用探空资料对河南一次冷锋降水过程的水汽分布特征进行分析。黄美元和洪延超(1984)对梅雨锋云系内层状云回波结构分析发现梅雨云系中层状云的结构具有明显不均匀性。苏正军等(2000)对华北冷涡降水的云物理飞机探测资料分析表明云粒子直径、浓度空间分布等存在不均匀特性。牛生杰等(1992)和陈文选等(1995)对宁夏、山东地区云微物理量进行分析也说明层状云的不均匀性。李宏宇等(2011)利用自动气象站雨量监测、雷达以及卫星反演资料,对 2008 年北京奥运会开幕式活动期间云、降水主要特征及人工消减雨作业的物理响应分析。

本文利用 2009 年 6 月 18~19 日山西省一次低涡冷锋云系的观测资料,分析了山西省层状云的微物理结构。

2 天气形势

2009 年 6 月 18 日 08:00 (北京时间,下同), 500 hPa 天气图(图略)上,贝加尔湖西北部经蒙古西部至新疆地区有一大槽,温度槽与气压槽叠加,蒙古至河西走廊有一弱副槽。山西省处于弱副槽之前。700 hPa 图(图略)上,环流形势为两脊一槽型,中心位于贝加尔湖西北部的东亚大槽经蒙古中部、河西走廊至四川省中部,山西省处于槽前较强西南气流之中,湿度较大。850 hPa 图(图略)上与 700 hPa 图类似,东亚大槽中心位于贝加尔湖东部其槽线经蒙古东部地区至河西走廊,一暖中心叠加于大槽之上,山西省处于较强的东南气流之中。08:00 地面图(图 1a)上,气旋中心位于蒙古东部,向西南经河西走廊至四川省中部有一冷锋,山西省处于冷锋锋前。14:00 地面图(图略)上,气旋中心略向西移,锋线略向东移经河套顶部、宁夏伸至甘肃南部。山西西部、北部和南部局部出现降水。

2009 年 6 月 19 日 08:00, 在 500 hPa 天气图(图略)上,18 日 08:00 的低压中心东移至贝加尔湖附近,冷中心略滞后于低压中心,其向南伸出的大槽移至河套东部经陕西伸至甘肃中部,山西省处于槽前西南气流控制之中;同时有一湿区位于本区上空。700 hPa 图(图略)上,东亚大槽东移至内蒙古东部,经河北伸至河南、湖北一带。山西省处于槽后西北气流之中,湿度较大。850 hPa 图与 700 hPa 图类似,本区上空湿度较大。08:00 地面图(图 1b),地面气旋中心移至蒙古东部地区,其冷锋经内蒙古东部、河北伸至河南,山西省处于冷锋锋后。

飞行探测区域为图 2 中的矩形区域。可以看出,18 日(图 2a)云系处于发展阶段,作业区云层较厚,云体较为密实;19 日(图 2b)作业区云层处于锋面云带的后部,云层较薄,结构松散。

3 仪器简介

本文利用运-12 飞机作为此次飞行探测平台。探测所用仪器有 GPS 定位系统,美国 DMT (Droplet

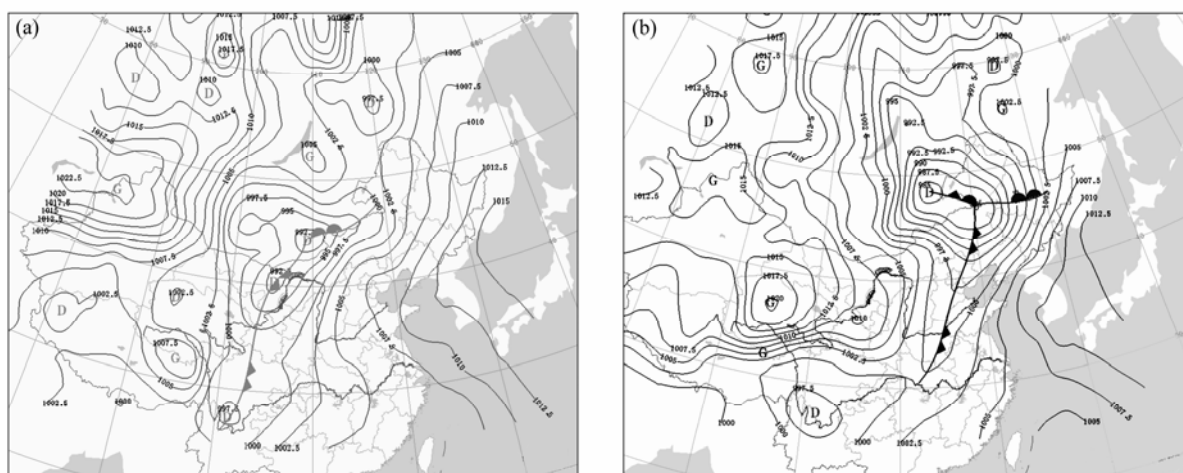


图 1 2009 年 6 月 (a) 18 日 08:00 和 (b) 19 日 08:00 地面天气形势

Fig. 1 Prebaratic charts at (a) 0800 LST 18 Jun and (b) 0800 LST 19 Jun 2009

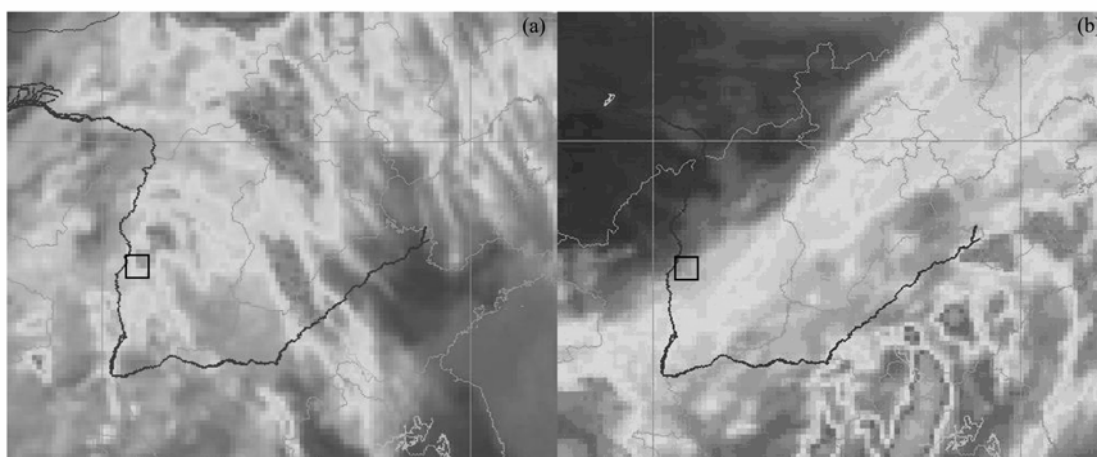


图 2 2009 年 6 月 (a) 18 日 14:30 和 (b) 19 日 14:30 FY-2C 红外云图 (矩形为飞行探测区域)

Fig. 2 FY-2C infrared satellite cloud image at (a) 1430 LST on 18 Jun and (b) 1430 LST on 19 Jun 2009 (rectangular area denotes flight detection area)

Measurement Technologies) 机载云物理探测系统, 本次观测中使用的探头是云粒子探头 CDP (Cloud Droplet Probe), 量程为 $3\sim 50\ \mu\text{m}$, 分为 30 个通道; 空气状况探头 ADP (AIMMS-20 Air-Data Probe), 用于测量温度、湿度、相对湿度、空气的静态气压和动态气压、风速、风向、GPS 轨迹 (包括飞行经度、纬度、高度的三维坐标显示) 等。

4 飞行探测简介

本次飞行探测时间为 2009 年 6 月 18 日 13:30 至 14:48 和 19 日 13:50 至 15:10, 18 日飞行轨迹如图 3a 和 3b 所示, 航线为太原—孝义—灵石—文水—太原。13:30 从太原武宿机场起飞, 起飞后一直爬升, 13:35 入云。根据宏观记录, 云底高度为 1900

m, 13:41 (3272 m) 至 13:43 (3542 m), 13:52 到达 3700 m, 沿 3700 m 做平飞探测, 14:02 到达孝义, 14:09 到达灵石, 14:22 到文水, 到达文水后感到轻微的颠簸, 下降过程中在 1875m 处飞机颠簸严重, 之后出云, 14:48 降落。19 日的探测航线如图 3c 和 3d 所示, 航线为太原—介休—中阳—太原。飞机 13:50 起飞, 14:00 入云, 云底高度为 3165 m, 在爬升过程中观察到有碎积云存在, 14:05 到达 3700 m, 此后沿 3700 m 做平飞, 14:20 到达介休, 13:35 到达中阳, 15:10 降落。

5 探测数据分析

5.1 垂直方向结构分析

由图 4 可以看出, 云底高度大约为 1850 m, 云

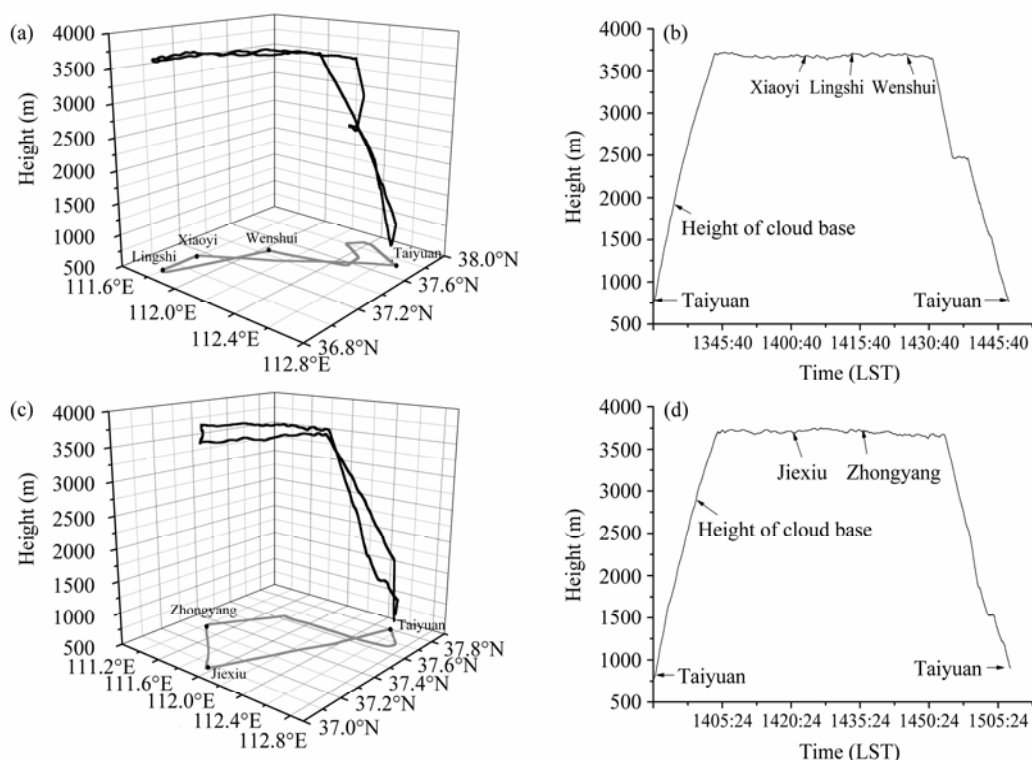


图3 2009年6月 (a、b) 18日和 (c、d) 19日垂直探测轨迹 (左列) 和探测高度轨迹 (右列)

Fig. 3 Vertical trajectory (left panel) and height trajectory (right panel) on (a, b) 18 Jun and (c, d) 19 Jun 2009

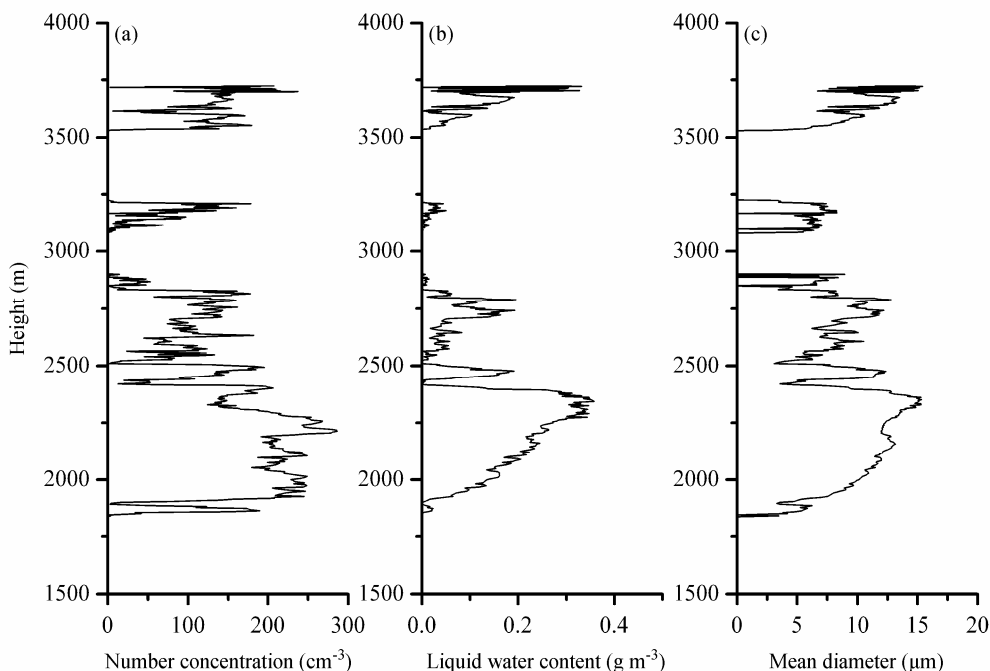


图4 2009年6月18日飞机上升过程 (a) 数浓度、(b) 含水量、(c) 平均直径的变化

Fig. 4 The vertical distributions of (a) number concentration, (b) liquid water content, and (c) mean diameter in ascending stages of flight on 18 Jun 2009

底较低, 云层比较厚, 云层分为两层, 中间夹有无云区, 与宏观记录观察结果相符。1850~3220 m 为一层, 约 1370 m 厚, 云滴数浓度最大达 280 cm^{-3} ; 1850~2200 m 之间数浓度有起伏变化, 但幅度不

大; 到 2200 m 出现数浓度的最大值, 之后迅速减小; 从 2500~2800 m 数浓度随高度递增; 2800~3220 m 数浓度随高度先减后增。云滴平均直径最大达 $15 \mu\text{m}$, 从 1850~2340 m, 云滴平均直径随高度

升高而增大；之后到 3200 m 这一段高度，平均直径出现起伏变化。从图 4 中可以看出，含水量与平均直径的起伏变化比较一致，与云滴数浓度变化相关性较差，含水量最大值达 0.35 g/m^3 。从表 1 可看到，大粒子对含水量的贡献较大；3500 m 以上为一层，云滴最大浓度达到 200 cm^{-3} ，云滴平均直径达 $13 \text{ }\mu\text{m}$ ，含水量最大值为 0.2 g/m^3 。

表1 平均直径 $>13 \text{ }\mu\text{m}$ 云滴的数浓度和含水量统计
Table 1 The number concentration and liquid water content of the average cloud droplet with diameter larger than $13 \text{ }\mu\text{m}$

	数浓度* (cm^{-3})	含水量* (g/m^3)	总数浓度 (cm^{-3})	总含水量 (g/m^3)	数浓度 百分比*	含水量 百分比*
上升过程	1.78×10^4	2.97×10^1	7.33×10^4	7.0×10^1	24.20%	42.40%
平飞过程	1.68×10^4	2.69×10^1	5.44×10^4	5.96×10^1	30.80%	45.20%

注：*表示云滴平均直径 $>13 \text{ }\mu\text{m}$ 。

云中含水量与垂直气流的强度有关，上升气流区基本与高含水量区相配合（王鹏飞和李子华，1989）。含水量从云底开始迅速增加，并且云中含有多个丰水区，说明云中上升气流很强，低层对高层的水汽输送较大，造成云层厚，云中含水量大；含水量的起伏变化很大，说明云中乱流比较明显，这一点从云滴谱图上也可以看出来（云滴谱呈多峰分布），3100~3220 m，粒子平均直径较大，含水量较小，是因为这一层与较干空气混合，由于蒸发，使

含水量减小；上下两层之间夹有干层，在干层中会使部分降水粒子蒸发，不利于降水。综合分析图 4 可以看出，18 日云系处于发展阶段。

由图 5 可以看出，云底高度较高，位于 3300 m，较锋前明显抬高，入云后云粒子浓度迅速增大，最大值出现在 3500 m 高度上，达到 170 cm^{-3} ，平均直径最大为 $10 \text{ }\mu\text{m}$ ，含水量最大值为 0.05 g/m^3 ，各微物理量与 18 日相比，都明显较小，含水量变化也没有 18 日明显，说明云中气流较稳定，属于冷锋后云系，宏观记录中，在云层下面有碎积云，从图 5 云滴数浓度及平均直径的变化也可看出这一现象。综合分析图 5 可以看出，19 日云系处于消散阶段。

5.2 垂直方向云滴谱分布特征

分别选取 1852 m (13:34)、2000 m (13:35)、2308 m (13:36)、2459 m (13:37)、2741 m (13:38)、3542 m (13:43)、3616 m (13:44)、3725 m (13:46) 各高度上每 5 秒的平均值，对比云滴微物理量变化。图 6 中云滴谱型多呈双峰型和多峰型。1850~3220 m 云层中，云底谱宽最窄，云底向上谱宽逐渐变宽，谱宽最大处是 2308 m，之后逐渐变窄；对比云滴数浓度可以看出，云中下部数浓度最大，云底次之，云顶最小；云层下部和上部的小云滴较多，云中的大云滴较多，随着高度的增加，较大云滴呈先增后

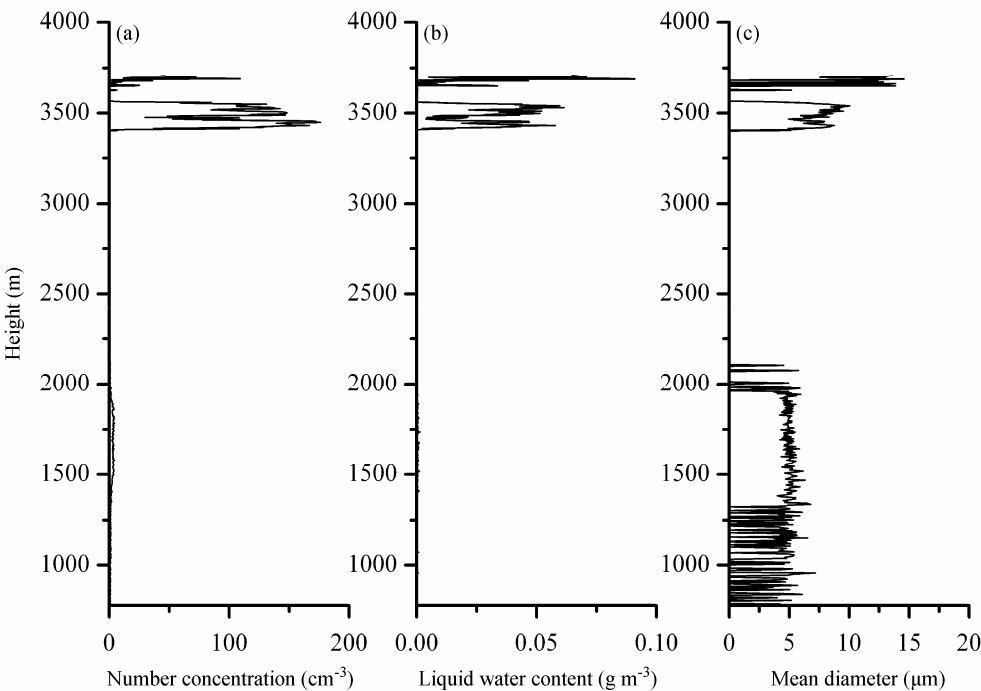


图5 同图4，但为6月19日
Fig. 5 Same as Fig. 4, but for 19 Jun

减的趋势, 整个谱型为比较典型的冷锋前层积云的谱型(王鹏飞和李子华, 1989)。在对 3500 m 以上云层探测中, 从云底向上, 谱宽逐渐变宽, 小云滴数浓度减小, 大云滴数浓度增加。

分别选取 3405 m (14:01)、3432 m (14:02)、3465 m (14:03)、3500 m (14:03)、3550 m (14:04) 各高度上每 5 秒的平均值, 对比云滴微物理量变化。2009

年 6 月 19 日飞机上升过程中(如图 7 所示), 云滴数浓度最大值与谱宽最大值与 18 日相比, 都有明显的减小; 图中云滴谱型多呈单峰型和双峰型, 谱型属于高层云的典型谱型(王鹏飞和李子华, 1989), 可以说明冷锋后云系消散成了相对稳定的层状云。

5.3 垂直方向云滴谱拟合

云粒子尺度谱形态是多变的、多样的, 但有统

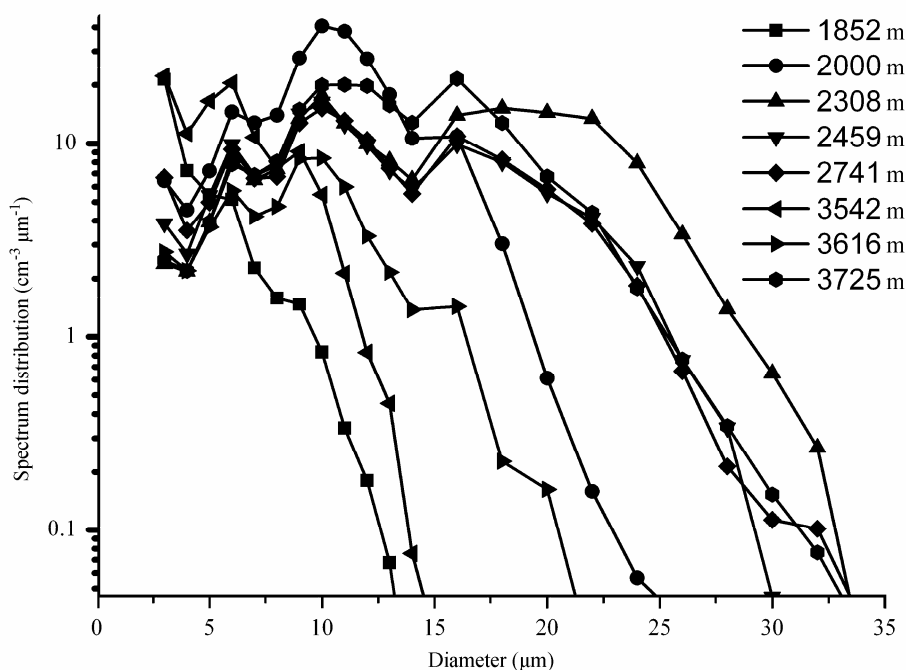


图6 2009年6月18日飞机上升过程不同高度的云滴谱图

Fig. 6 The cloud droplet spectral distribution in ascending stages of flight on 18 Jun 2009

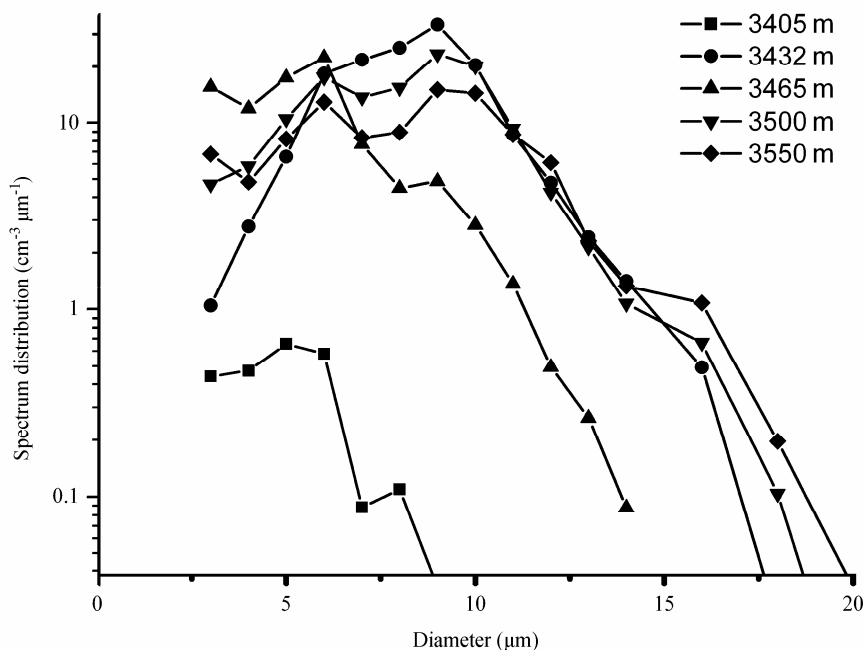


图7 同图6, 但为6月19日

Fig. 7 Same as Fig. 6, but for 19 Jun

计规律，各类粒子的数浓度谱可以用数学表达式表示其特征，根据观测数据拟合数学式可对粒子谱特征进行定量的描述，即粒子谱资料的参数化处理。因为云滴与雨滴同样为大气中的水凝物，具有一定的相似性，故本文采用在雨滴谱拟合中常用的两种形式（即 M-P 分布和多阶 Γ 分布）分别对各高度层次的云滴粒子实谱进行拟合，M-P 分布形式为

$$N(D) = N_0 \exp(-\lambda D),$$

其中， N_0 为浓度因子， λ 为大小因子， D 为直径。 Γ 分布是在 M-P 分布中引入了形状因子 μ ，其形式为

$$N(D) = N_0 D^\mu \exp(-\lambda D).$$

使用 Matlab 软件拟合后的结果如图 8 所示，分别为各高度层次的云滴实谱及 M-P 拟合谱和多阶 Γ 拟合谱。Matlab 中拟合所得谱分布参数如表 2 所示。

表 2 各高度 M-P 和 Γ 谱分布参数

Table 2 The parameters of M-P and Γ spectra distribution at different heights

	M-P 分布		Γ 分布		
	N_0	Λ	N_0	Λ	μ
	($\text{cm}^{-3} \mu\text{m}^{-1}$)	(μm^{-1})	($\text{cm}^{-3} \mu\text{m}^{-1}$)	(μm^{-1})	
6 月 18 日 1852 m	140.3445	0.5836	13.2743	0.8802	2.4073
6 月 18 日 2000 m	96.2838	0.2406	0.0105	0.8488	7.0972
6 月 18 日 2308 m	33.8318	0.1411	0.0075	0.4937	5.5345
6 月 18 日 2459 m	29.8505	0.1463	0.0361	0.4921	4.7469
6 月 18 日 2741 m	51.1570	0.1880	0.1425	0.4102	3.7341
6 月 18 日 3542 m	382.9483	0.5551	0.7710	1.2279	5.9152
6 月 18 日 3616 m	22.2068	0.2258	0.0283	0.7784	5.6561
6 月 18 日 3725 m	56.8036	0.1870	0.0129	0.5121	5.3728
6 月 19 日 3405 m	4.446	0.5070	0.0914	1.2981	5.0447
6 月 19 日 3432 m	105.7206	0.3581	0.001	1.3259	9.9077
6 月 19 日 3465 m	157.559	0.4656	1.0498	1.1913	5.4768
6 月 19 日 3500 m	130.4252	0.3613	0.0072	1.2844	8.7777
6 月 19 日 3550 m	58.9978	0.2765	0.0564	0.9312	6.2260

由图 8 可见，本次降水 6 月 18 日云滴谱分布曲线起伏较大，19 日云滴谱分布曲线较为平滑，无较大起伏。两种拟合曲线中，M-P 分布与实际云滴谱有较大偏差，尤其在大滴和小滴两端；而多阶 Γ 分布与实际谱型相当接近，从表 3 中可以看出多阶 Γ 分布与实际谱型的相关系数很高。总体而言，在拟合层状云云滴谱时，用多阶 Γ 分布比 M-P 分布拟合的谱型更接近实谱，拟合效果更好。

表 3 各高度多阶 Γ 分布与实际谱型的相关系数

Table 3 The correlation coefficients of the Γ distribution and the actual distribution at different heights

高度 (m)	相关系数	高度 (m)	相关系数
1852	0.9169	3725	0.9126
2000	0.8452	3405	0.9410
2308	0.7669	3432	0.9502
2459	0.9132	3465	0.9433
2741	0.8900	3500	0.9007
3542	0.9076	3550	0.8867
3616	0.9005		

5.4 水平方向结构分析

由图 9 可以看出，云滴数浓度、云滴平均直径、含水量均有较大起伏变化，各微物理量的平均值及最大值如表 4 所示，含水量出现 2 次大幅度跃增，由此可见，层状云微物理量的水平分布是不均匀的。

含水量（如图 10a 所示）第一次跃增时间为 13:45:49 至 13:46:11，由 0.019 g/m^3 连续增大到 0.328 g/m^3 ，之后缓慢下降；与此相对应，云滴数浓度由 53 cm^{-3} 增大到 237 cm^{-3} ；云滴平均直径由 $6.69 \mu\text{m}$ 增大到 $15.04 \mu\text{m}$ ；含水量第二次跃增时间为 13:47:14 至 13:47:48，由 0.1468 g/m^3 增大到 0.3325 g/m^3 ，增幅较第一次小；与此相对应，云滴数浓度由 93 cm^{-3} 增大到 207 cm^{-3} ；云滴平均直径由 $11.54 \mu\text{m}$ 增大到 $15.43 \mu\text{m}$ ；由此可见，含水量的两次跃增，是由云滴数浓度及平均直径的增大共同引起的；此时飞机位于交城县和文水县之间，飞行宏观记录中，飞机感到颠簸。

表 4 飞机平飞段的数据探测统计

Table 4 The detection data statistics obtained along horizontal flying route

	含水量 (g/m^3)	数浓度 (cm^{-3})	平均直径 (μm)
平均值	0.1306	119	11.06
最大值	0.3530	237	15.42

5.5 水平方向液态含水量跃增时刻云滴谱分析

图 11a 为含水量第一次跃增前后云滴谱图，取 13:45:30 至 13:45:46、13:46:08 至 13:46:40 的样本平均值做跃增前、跃增后云滴谱图，含水量平均值为 0.12 g/m^3 和 0.25 g/m^3 。由图可见，跃增前后云滴谱均呈双峰型；跃增后峰值直径由 $10 \mu\text{m}$ 增大到 $13 \mu\text{m}$ ；云滴谱变宽；大于 $13 \mu\text{m}$ 云滴数密度增加，小于 $13 \mu\text{m}$ 云滴数密度减小；图 11b 为含水量第二

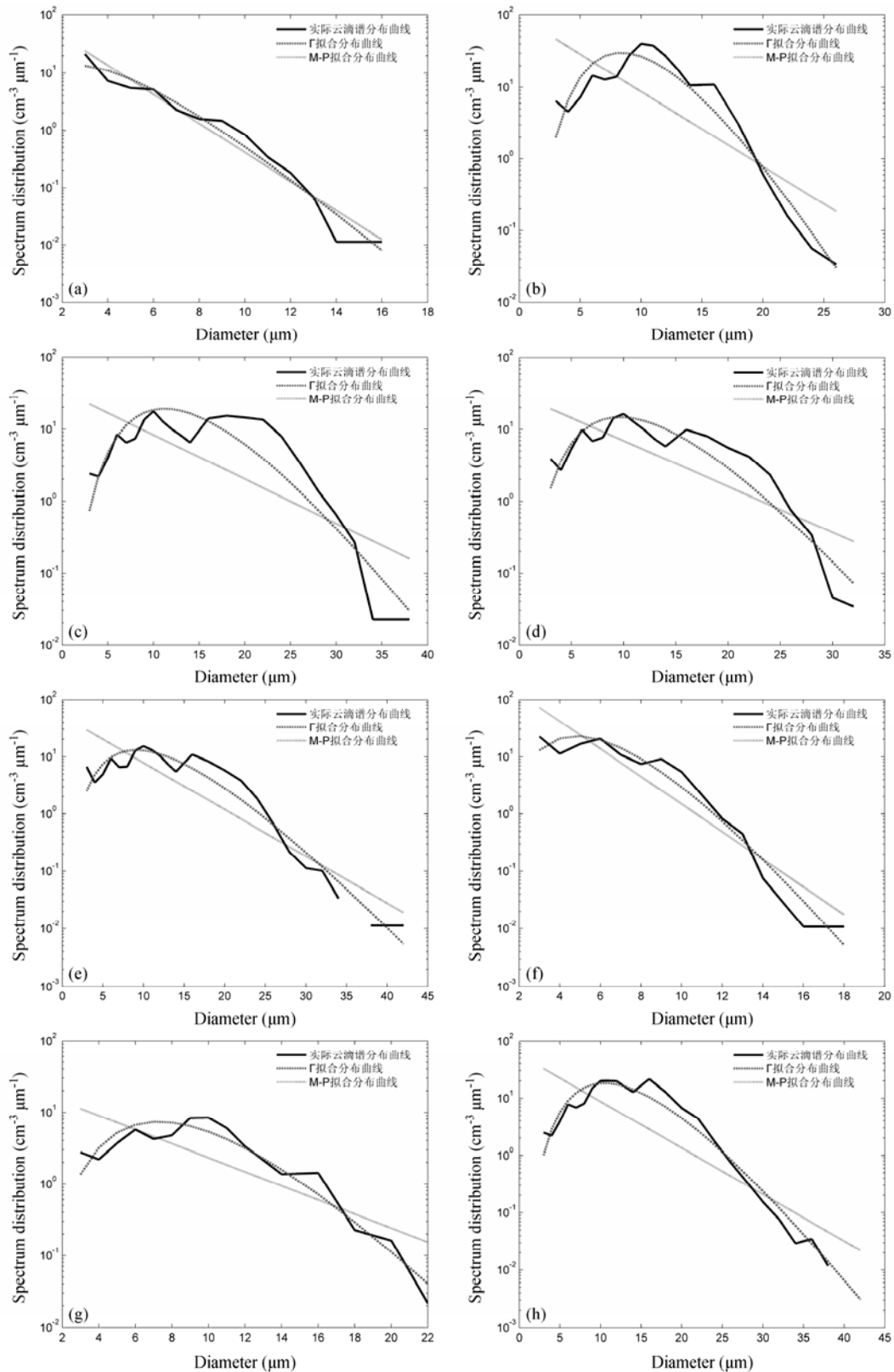


图 8 各高度云滴谱及拟合谱分布: (a) 6 月 18 日 1852 m; (b) 6 月 18 日 2000 m; (c) 6 月 18 日 2308 m; (d) 6 月 18 日 2459 m; (e) 6 月 18 日 2741 m; (f) 6 月 18 日 3542 m; (g) 6 月 18 日 3616 m; (h) 6 月 18 日 3725 m; (i) 6 月 19 日 3405 m; (j) 6 月 19 日 3432 m; (k) 6 月 19 日 3465 m; (l) 6 月 19 日 3500 m; (m) 6 月 19 日 3550 m

Fig. 8 The distribution of cloud droplet spectra and fitting spectra at different heights: (a) 1852 m on 18 Jun; (b) 2000 m on 18 Jun; (c) 2308 m on 18 Jun; (d) 2459 m on 18 Jun; (e) 2741 m on 18 Jun; (f) 3542 m on 18 Jun; (g) 3616 m on 18 Jun; (h) 3725 m on 18 Jun; (i) 3405 m on 19 Jun; (j) 3432 m on 19 Jun; (k) 3465 m on 19 Jun; (l) 3500 m on 19 Jun; (m) 3550 m on 19 Jun

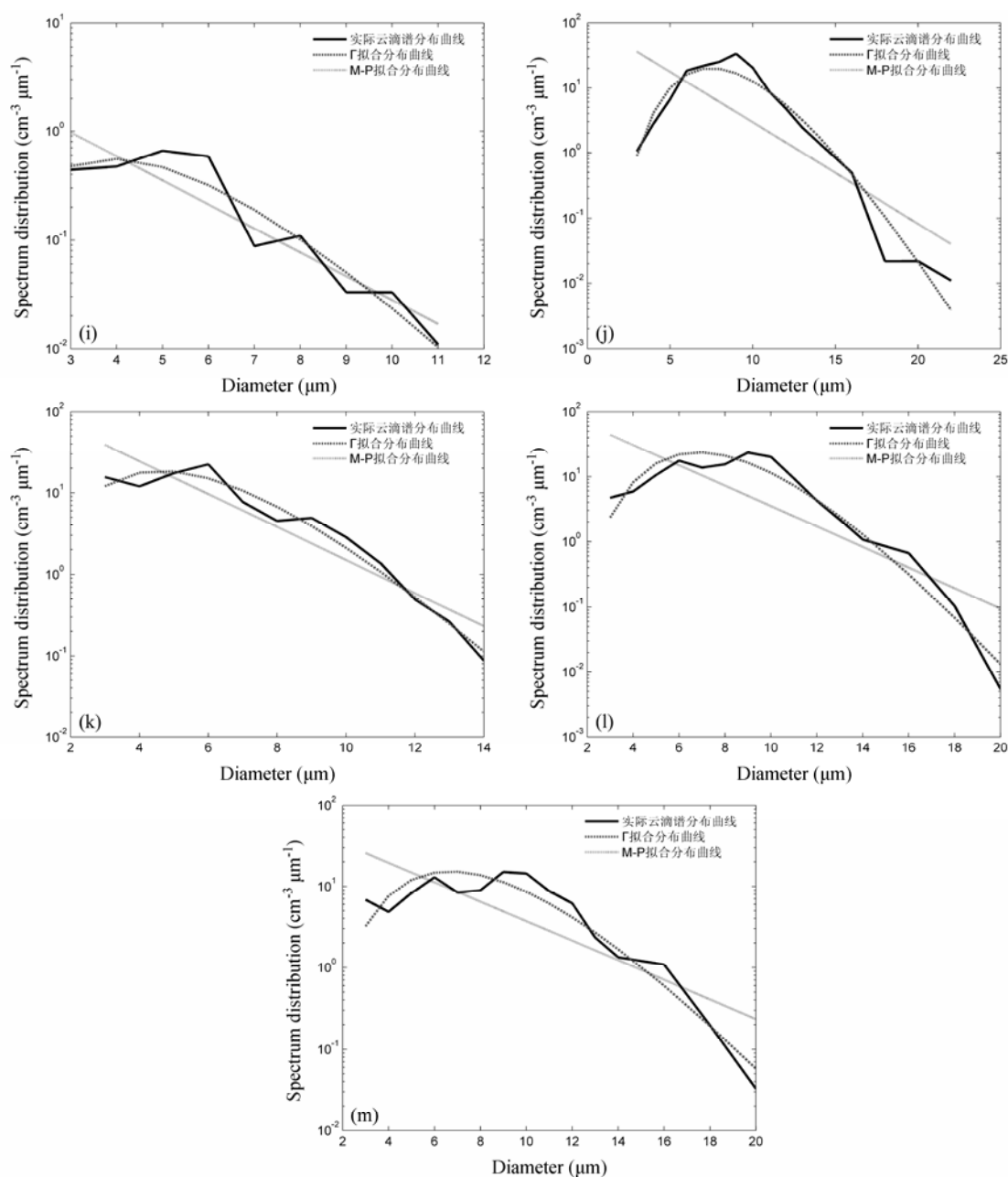


图8 (续)

Fig. 8 (Continued)

次跃增前后云滴谱图, 取 13:47:08 至 13:47:20、13:47:21 至 13:47:50 的样本平均值做跃增前、跃增后云滴谱图, 含水量平均值为 0.17 g/m^3 和 0.26 g/m^3 。由图可见, 云滴谱型仍为双峰型; 跃增后峰值直径由 $11 \mu\text{m}$ 增大到 $12 \mu\text{m}$; 云滴谱变宽; 云滴数密度增加, 大于 $13 \mu\text{m}$ 云滴数密度增加显著; 综上可得, 大云滴数密度的增加是造成含水量增加的主要原因。

6 结论

(1) 这次降水是锋面云系产生的, 6月18日山西省处冷锋锋前, 19日为冷锋锋后。

(2) 锋前云底较低, 云层较厚, 有夹层存在, 云中上升气流很强, 云滴数浓度最大为 280 cm^{-3} 、平均直径最大为 $15 \mu\text{m}$ 、含水量最大值为 0.35

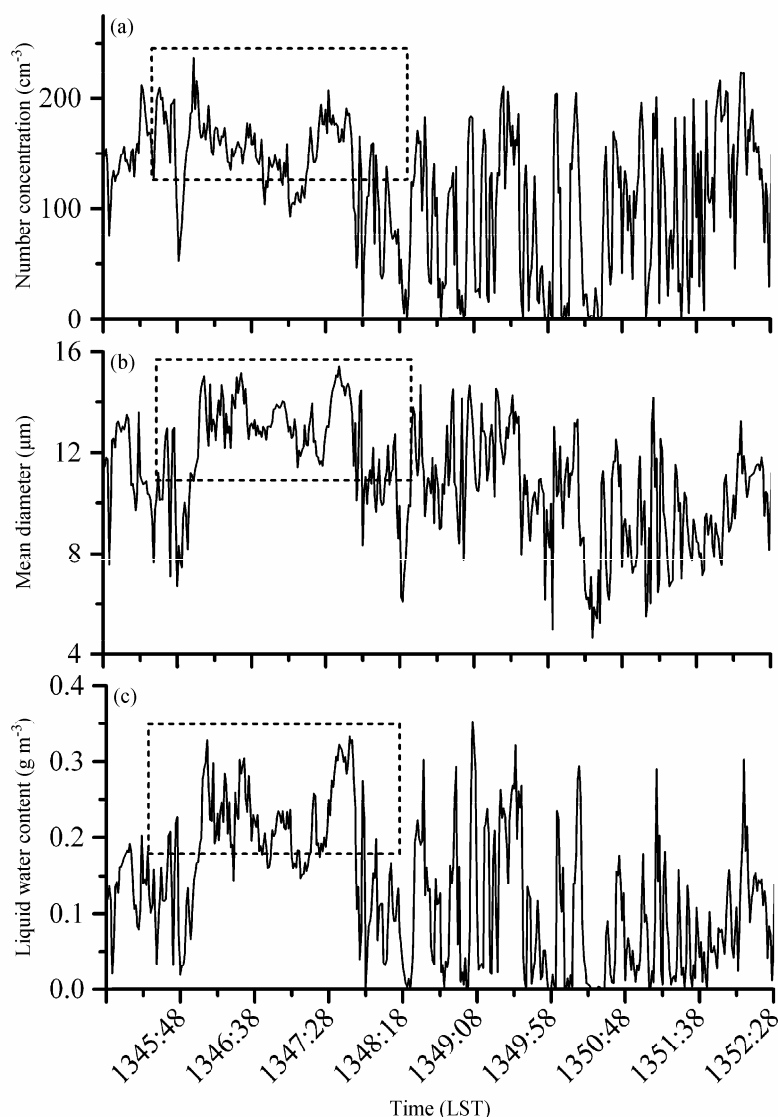


图9 2009年6月18日飞机平飞过程中 (a) 数浓度、(b) 平均直径、(c) 含水量的时间序列图

Fig. 9 The time series of (a) number concentration, (b) mean diameter, and (c) liquid water content during the horizontal flying route on 18 Jun 2009

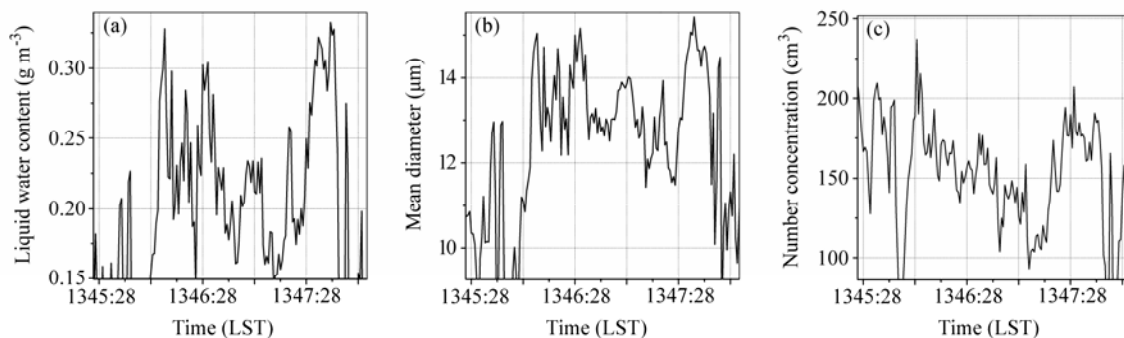


图10 跃增时段 (a) 含水量、(b) 平均直径、(c) 云滴数浓度的变化

Fig. 10 The variations of (a) liquid water content, (b) mean diameter, and (c) number concentration during the leap process

g/m^3 , 云滴谱呈双峰或多峰型; 锋后云底较高, 云层较薄, 云滴数浓度最大值为 170 cm^{-3} 、平均直径最大为 $10 \mu\text{m}$ 、含水量最大值为 0.05 g/m^3 , 云滴谱

呈双峰或多峰型。

(3) 层状云在垂直方向和水平方向均存在不均匀性, 垂直方向含水量变化与云滴尺度变化较为一

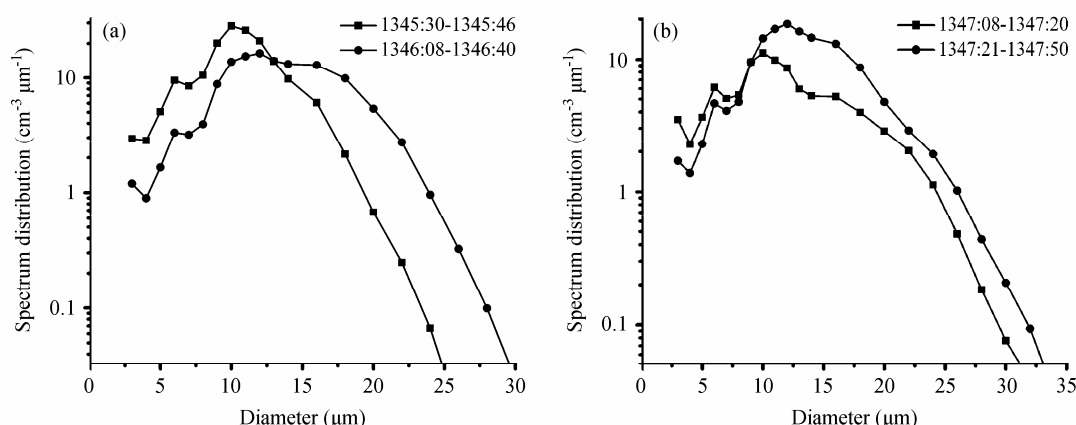


图11 (a) 第一次跃增和 (b) 第二次跃增前后含水量云滴谱对比

Fig. 11 The variations of cloud droplet spectrum of liquid water content before and after (a) the first leap and (b) the second leap

致, 水平方向含水量增加主要因为大云滴数密度的增加。

(4) Γ 分布拟合云滴谱结果接近实际分布。

参考文献 (References)

- 陈文选, 王俊, 刘文. 1995. 一次冷涡过程降水的微物理机制分析 [J]. 应用气象学报, 10 (2): 190–198. Chen Wenxuan, Wang Jun, Liu Wen. 1995. Analysis of the microphysical precipitation mechanism for a cold vortex process [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 10 (2): 190–198.
- 黄美元, 洪延超. 1984. 在梅雨锋云系内层状云回波结构及其降水的不均匀性 [J]. 气象学报, 42 (1): 80–87. Huang Meiyuan, Hong Yanchao. 1984. The inhomogeneous features of the precipitation and the echo structure of stratiform cloud in Mei-yu frontal cloud system [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 42 (1): 80–87.
- Korolev A V. 1994. A study of bimodal droplet size distribution in stratiform clouds [J]. Atmospheric Research, 32 (1–4): 143–170.
- 李大山. 2002. 人工影响天气现状与展望 [M]. 北京: 气象出版社, 46–49. Li Dashan. 2002. The Situation and Expectation in Weather Modification [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 46–49.
- 李宏宇, 马建立, 马永林, 等. 2011. 北京 2008 年奥运会开幕日云、降水特征及人工影响天气作业分析 [J]. 气候与环境研究, 16 (2): 175–187. Li Hongyu, Ma Jianli, Ma Yonglin, et al. 2011. Characteristics of cloud-precipitation and the impact of weather modification activities on the opening day of the Beijing 2008 Olympics [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 16 (2): 175–187.
- 廖菲, 洪延超, 郑国光. 2007. 河南省一次冷锋降水过程的水汽分布特征及其增雨潜力 [J]. 气候与环境研究, 12 (4): 553–565. Liao Fei, Hong Yanchao, Zheng Guoguang. 2007. Vapour distribution feature and precipitation enhancement potential of a cold front precipitation in Henan Province [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 12 (4): 553–565.
- Liu C M, Lo K K. 1989. The microphysics of a Mei-yu case: Data analysis [C]// Sham P, Chang C P. International Conference on East Asia and Western Pacific Meteorology and Climate. Teaneck, NJ: World Scientific Publishing Co., 304–312.
- 牛生杰, 马铁汉, 管月娥, 等. 1992. 宁夏夏季降水性层状云微结构的观测分析 [J]. 高原气象, 11 (3): 241–247. Niu Shengjie, Ma Tiehan, Guan Yue, et al. 1992. Observation analysis of the microstructures of precipitation sheet clouds in summer over Ningxia [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 11 (3): 241–247.
- 苏正军, 黄世鸿, 刘卫国. 2000. 一次华北冷涡降水的云物理飞机探测特征 [J]. 气象, 26 (6): 16–20, 25. Su Zhengjun, Huang Shihong, Liu Weiguo. 2000. The microphysical characteristics of a Huabei cold vortex precipitation [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 26 (6): 16–20, 25.
- 王鹏飞, 李子华. 1989. 微观云物理学 [M]. 北京: 气象出版社, 180–186. Wang Pengfei, Li Zihua. 1989. Microscopic Cloud Physics [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 180–186.
- 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 [C]// 游景炎, 段英, 游来光. 云降水物理和人工增雨技术研究. 北京: 气象出版社, 236–249. You Laiguang. 1994. The research of cloud physical process and precipitation enhancement conditions using particle measurement system [C]// You Jingyan, Duan Ying, You Laiguang. The Research of Cloud and Precipitation Physics and Weather Modification (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 236–249.