

一次东北冷涡中对流云带的宏微物理结构探测研究

齐彦斌^{1, 2, 3} 郭学良¹ 金德镇³

1 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

2 中国科学院研究生院, 北京 100049

3 吉林省人工影响天气办公室, 长春 130062

摘要 利用2003年7月8日的东北冷涡中对流云带的飞机穿云观测资料, 结合雷达、卫星云图及天气图等资料, 详细分析了此次冷涡对流云带的宏观特征、微物理结构, 并对降水形成机制进行初步探讨。此次东北冷涡对流云系具有明显的带状水平回波结构, 中等强度, 垂直尺度小(小于6 km), 云过冷液态水含量丰富, 最大可达 3.3 g/m^3 , 云的上部过冷水含量也达到 2.0 g/m^3 。对流云带的上部存在冰粒子高浓度区, 最大值为 1062 L^{-1} , 出现在5242 m (-6.8°C)处, 这些冰粒子在高过冷水含量区的快速长大对降水产生起到重要作用。云滴直径与云滴浓度在 0°C 层附近呈现负相关性; 通过分析解释了上升气流强的区域有更小的云滴粒子和冰晶粒子的原因, 上升气流的作用造成了 0°C 层以下粒子浓度的积累。在弱上升气流区, 2-DC观测的粒子浓度, 高浓度区对应小粒子多, 低浓度区对应大粒子多。并初步探讨了冷涡对流云带可能存在冰晶增生过程。

关键词 东北冷涡 对流云带 微物理结构 飞机探测

文章编号 1006-9895 (2007) 04-0621-14

中图分类号 P426.5

文献标识码 A

An Observational Study of Macro/Microphysical Structures of Convective Rainbands of a Cold Vortex over Northeast China

QI Yan-Bin^{1, 2, 3}, GUO Xue-Liang¹, and JIN De-Zhen³

1 *Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

2 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*

3 *Jilin Weather Modification Office, Changchun 130062*

Abstract A detailed analysis of macro/microstructure for convective rainbands of a mesoscale cold vortex over Northeast China has been conducted based on data including airborne PMS (Particle Measuring System), radar, satellite and weather chart etc., obtained from field campaign on 8 July 2003 in Jilin Province, and the precipitation formation mechanism is preliminarily discussed. The results show that the northeastern cold vortex had apparent horizontal band echo structure with middle intensity and small vertical height (less than 6 km), but it had high supercooled water content with a maximum value of 3.3 g/m^3 , the supercooled water content even reaches 2.0 g/m^3 at upper levels of cloud. High number concentration of ice particles is observed, the maximum value reaches 1062 L^{-1} at 5242 m AGL (-6.8°C), the rapid growth of these particles in the region of high supercooled water content has an important contribution to precipitation formation. High concentration of ice crystals at the top of cloud plays a major role in maintaining precipitation. A negative correlation between the number concentration and the diameter of cloud particles is found near 0°C layer. The number concentration of droplets or ice particles in the region of strong

收稿日期 2006-01-19, 2006-07-18 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40333033、40537034, 吉林省气象局开放式基金课题, 中国气象局、吉林省人民政府人工影响天气联合开放实验室课题

作者简介 齐彦斌, 男, 1963年出生, 高级工程师, 主要从事人工影响天气外场观测和云降水物理研究。E-mail: qiyabin88@126.com

updraft is smaller than that in the region of weaker updraft. The accumulation region of particle concentration is found below 0°C layer due to the updraft effect. The 2-DC probe shows that high number concentration corresponds to small-size particles while low number concentration corresponds to large-size ones. The ice multiplication process possibly existing in cloud is also preliminarily discussed.

Key words Northeast China cold vortex, convective rainband, microphysical structure, exploration

1 引言

云和降水的形成、发展除了受动力、热力条件影响外,其内部的微物理过程也起着很重要的作用。一些研究^[1, 2]发现,云中微物理因素(如水质粒种类、冰相微物理等)的微小变化都能影响到云的结构、降水、动量、热量、辐射收支以及周围大尺度环境。数值模拟研究^[3]也表明,在中纬度深厚对流风暴中产生的雨水 70% 以上来自霰和雹的融化。对云微物理量的探测研究,一方面可以解释一些降水统计研究得到的结论^[4],这方面的著名实验计划有早期亚里桑那对流云试验计划,以色列试验和白顶计划等;另一方面用于改善中尺度模式微物理参数化方案,提高数值预报水平,如美国启动的 IMPROVE-1、IMPROVE-2 观测试验^[5~7],科罗拉多落基山脉 WISP 试验^[8],犹他州 IPEX 试验^[9]等。Tremblay 等^[10]在加拿大利用飞机观测资料,把模式模拟结果与飞机观测结果进行了对比分析,用于改善微物理参数化方案。Field 等^[11]利用机载探测器设备可以确定云内粒子相态。可见开展云的微物理观测研究具有非常重要的意义。

东北冷涡是东北地区地形与环流相互作用下的特殊产物。东北冷涡属于天气尺度系统,但其发展东移往往能诱发强对流天气,造成雷暴、冰雹、大风等气象灾害。如 1998 年嫩江和松花江流域特大洪水,2005 年黑龙江沙兰镇沙兰河上游山区暴雨都是受东北冷涡影响造成的巨大灾害。因此,提高东北冷涡的预报水平、减轻这些灾害无疑是很重要的。另外,东北冷涡产生的积层混合云具有持续时间长、范围大等特点,是人工增雨的主要作业目标云系。我国东北地区水资源相当匮乏,如何利用东北冷涡天气特点科学增加地面降水已显示出非常必要和紧迫,它对完成从蓄水抗旱到储备性抗旱的转移,缓解水资源危机,保护生态环境都有重要的意义。近二十多年来,在我国北方地区对层状降水云系开展过一系列观测研究^[12],游来光等^[13]发现

北方层状云中“播种云-供应云”,中间还常夹有干层特点。胡志晋^[14]探讨了层状云降水的机理和人工增雨的可能性。洪延超^[15]等对“催化-供给”云降水形成机理进行了较详细的数值模拟研究。对东北冷涡的研究基本侧重于大尺度环流、动力学方面^[16~20],针对冷涡云系的探测研究很少,特别是针对冷涡对流云系的穿云观测研究方面几乎没有。鉴于以上几个方面的原因,2003 年 7 月 8 日,我们在吉林省利用装载云粒子探测系统(PMS)的飞机对一次冷涡对流云雨带进行了垂直和水平探测,结合雷达、卫星、地面降水及天气图分析了冷涡的宏观特征和微观物理结构。

2 仪器

本文观测飞机是吉林省人工增雨“Y-12E 型”专用飞机,配备有 GPS 定位数传系统、机载宏观探测设备和 King 热线含水量仪等。机上装载中国科学院大气物理研究所 PMS 云粒子测量系统。外场试验使用了三个探头:FSSP-100(前向散射粒子谱探头)($0.5\sim 47\ \mu\text{m}$)、OAP-2D-C(二维光阵云粒子探头)($25\sim 800\ \mu\text{m}$)、OAP-2D-P(二维光阵降水粒子谱探头)($200\sim 6400\ \mu\text{m}$)。由于 PMS 粒子测量系统有采样速率大的优点,改善了对云微结构的分辨率,可以测量大气中气溶胶、云滴、雨滴、冰晶以及雪晶的尺度谱分布,所取资料基本上能反映云中实际情况。

3 东北冷涡中对流云带宏观特征

2003 年 7 月 7 日 20:00(北京时,下同)500 hPa 天气图,形成的东北冷涡位于(55°N , 125°E),冷涡中心温度 -19°C ;到 8 日 08:00(图 1a),冷涡中心高度值有所降低,温度也降低,冷涡处在发展阶段。在 700 hPa、850 hPa 上(图略)都有闭合的低压圈,高空正涡度区明显,850 hPa 图上,来自胶东半岛向北延伸的西南低空急流很强,水汽输送明显。在近地面层 1000 hPa 图(图 1b)

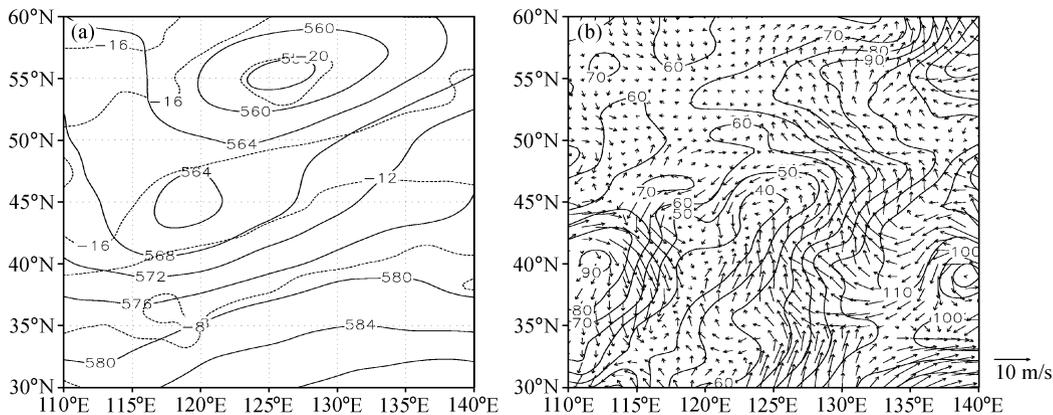


图 1 2003 年 7 月 8 日 08:00 天气图: (a) 500 hPa 温度 (虚线, 单位: °C) 和位势高度 (实线, 单位: dagpm); (b) 1000 hPa 风场和位势高度 (单位: dagpm)

Fig. 1 Weather chart at 0800 LST 8 Jul 2003: (a) Geopotential height (solid line, dagpm) and temperature (dotted line, °C) at 500 hPa; (b) geopotential height (dagpm) and wind at 1000 hPa

上, 吉林省中西部地区有明显的低值区, 南部有明显的辐合中心。低压北部风场 WSW - ENE 辐合, 云主体主要分布在辐合区, 在低压东南侧盛行西南气流, 东北冷涡中对流云带活动正处在这个区域。

从地面测站云观测和卫星云图 (图略) 可以看出, 东北冷涡产生的云系有两个区域: 一个区域主要位于黑龙江和吉林省的西北部, 主要以中、高云系为主; 另一个区域位于吉林省的中部地区。桦甸、松江一带地面观测为鬃积雨云 (Cb cap), 云底高 600 m, 在鬃积雨云的前部, 延吉附近观测有透光高积云 (Ac tra), 而后部为层状云系。7 月 8 日 08:00~14:00 吉林省平均降雨量为 35 mm, 大的降水产生在低压东南侧附近, 最大雨量达 46 mm。为研究该对流云带云微物理结构特点, 飞机在云带北侧的磐石县 (42.95°N, 126.05°E) 周围进行了穿云探测。

图 2 给出了 2003 年 7 月 8 日不同时刻雷达 PPI 图, 从回波演变过程可以看出, 对流云带由两块带状云系组成, 两块云距离比较近, 靠近测站的云的强度弱于另一块云的强度。图 2a 地面测站磐石 06:57 正好处在对流云带移动路径上, 地面雨量记录显示, 磐石站 06:00~07:00 位于云带的前部, 地面降雨量为 5.3 mm; 07:00~08:00 处在云带的中部, 降水量 14.7 mm; 08:00~09:00 在云带的后部降水量 8.3 mm, 可见主要降水时段在 07:00~08:00。06:58, 飞机从长春起飞, 长春地面观测到碎雨云 (Fn) 和闭光高层云 (As op), 云底 600 m,

07:26 飞机上升到约 3000 m。从图 2b 中 A 点进入对流云带进行水平探测; 图 2c、d、中的 B、C 点分别对应着云中约 3800 m 和 3660 m, 可见探测飞行是针对两块带状云带之间和北测的云带进行的。

图 3 为雷达 RHI 回波图, 图 3a 方位角 150.2°, 为对流云带前部剖面, 图 3b 方位角 154.6°, 为对流云带中部的剖面。可以看出, 云带在垂直方向有两个强回波中心, 北面 (靠近测站) 的云强度弱于 (南面) 的云强度, 最强的回波中心出现在地面附近, 分别达到 35 dBZ 和 40 dBZ, 30 dBZ 的回波区分别在约 1 km 和 3.5 km 左右, 两张剖面图的一个很显著的特点是对流云带的回波高度只有 5~6 km 左右, 云的顶部起伏较大, 图中黑实线是飞机在云带中水平穿云探测的高度, 对流云带从生成到消亡持续时间近 6 小时。

图 4 是利用 2003 年 7 月 8 日 08 时 NCEP 资料沿着 126°E 经度作纬度-高度垂直速度剖面和沿着 43°N 纬度作经度-高度垂直速度剖面, (43°N, 126°E) 正好在对流云带的中部。图 4a 显示, 在 42°N~43°N 之间, 高度 900~600 hPa 有明显的垂直切变, 对对流云带的发展起到动力抬生作用; 在图 4b 中, 在 124°E~126°E, 850~650 hPa 之间, 在垂直方向上升速度变化不大, 经过 650 hPa 时上升速度减小, 在 550 hPa 达到最小值, 与飞机观测的云顶高度比较接近, 而在 126°E~127°E 之间低层是下沉运动, 正好处在对流云带的前部, 可见冷涡中对流云带的形成、发展与大尺度环境场密切相

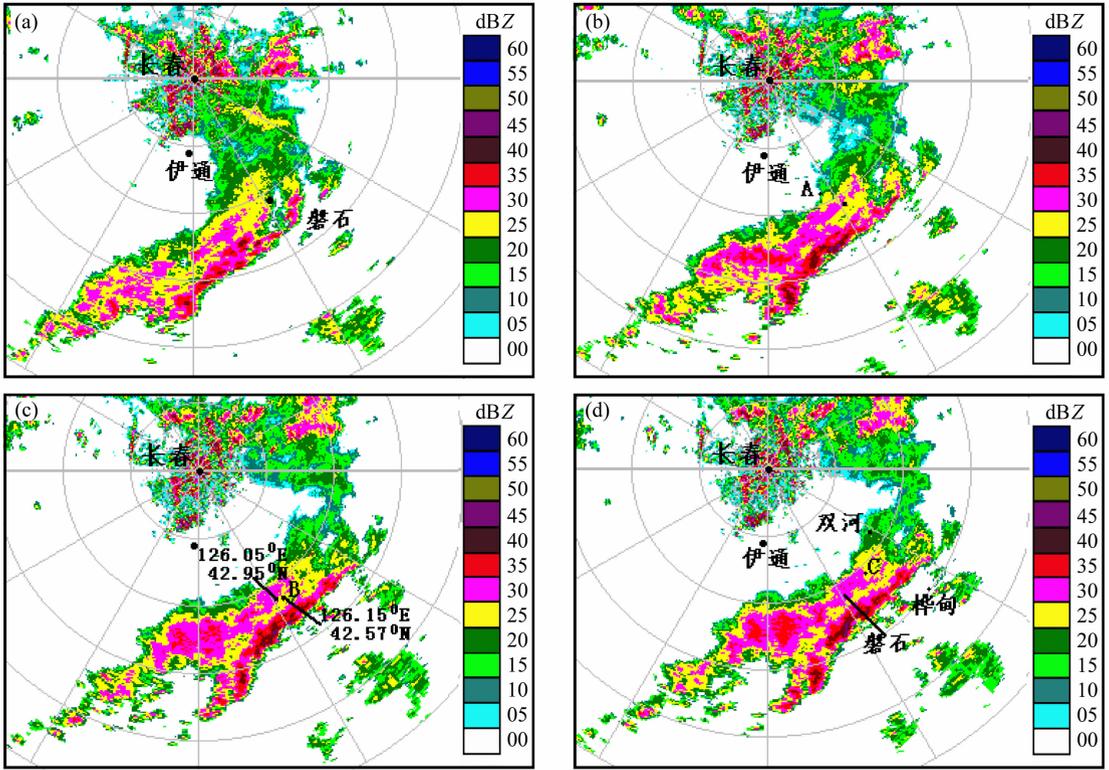


图2 2003年7月8日雷达PPI回波图(仰角:0°): (a) 06:57; (b) 07:26; (c) 07:47; (d) 07:52。A、B、C点为雷达探测时刻飞机的位置
Fig.2 PPI radar scans along 0° elevation at 8 Jul 2003; (a) 0657 LST; (b) 0726 LST; (c) 0747 LST; (d) 0752 LST. Points A, B and C indicate the locations of aircraft when radar was scanning clouds

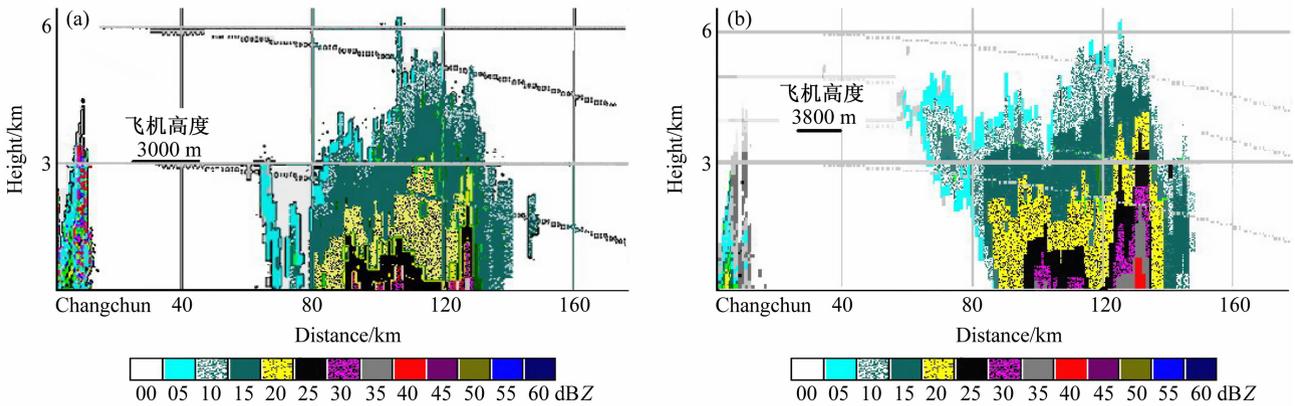


图3 2003年7月8日雷达RHI回波强度: (a) 07:29:18, 方位角 150.2°; (b) 07:49:00, 方位角 154.6°
Fig.3 RHI radar scans on 8 Jul 2003; (a) 0729:18 LST, 150.2° azimuth; (b) 0749 LST, 154.6° azimuth

关, 大尺度动力场抬升起到重要作用。

图5是对流云带结构示意图。图5a为对流云带水平结构, 沿AB方向云带宽约60 km, 最强的回波中心达40 dBZ, 沿CD方向, 云带长约240 km 有3个35 dBZ的回波中心, 主要与高空存在对流泡有关。图5b给出了沿AB方向的剖面, 0点是图

5a中AB和CD的交点, 根据飞机观测和地面云的观测, 在对流云带的A侧低层存在一层层积云(Sc), 云底600 m, 而在3000 m之上存在As op云, 云底高度3000 m。在B侧也存在Sc云, 云底高度1000 m; 在云带中对应图5a中40 dBZ的强回波区高度在1 km左右。图5c是根据综合观测资料

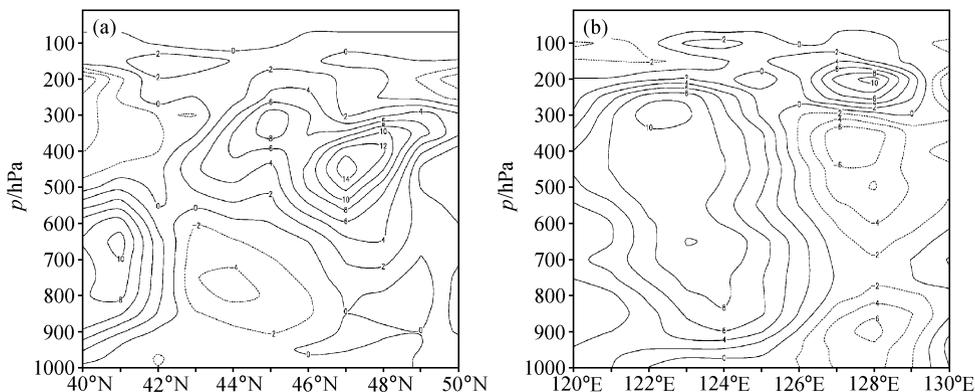


图4 2003年7月8日08时NCEP垂直速度剖面图(单位:m/s): (a)沿126°E的纬度-高度剖面; (b)沿43°N的经度-高度剖面

Fig. 4 Vertical cross-section of vertical velocity (m/s) from NCEP data at 0800 LST 8 Jul 2003; (a) Along 126°E; (b) along 43°N

分析得出的CD方向的剖面图,可以看出,在云的前部,由于垂直切变的作用为对流云带的发展提供了动力条件,从磐石、桦甸和松江等地的地面观测,发现对流云带此时是Cb cap云,说明积雨云处在成熟阶段;在对流云带的中部存在几个高空对流泡,造成地面有强回波区存在;而云带后部的出流,导致云顶变得平直。

4 东北冷涡中对流云带微观结构

4.1 粒子谱垂直分布特征

为了研究对流云带的微观特征,飞机首先爬升到3000 m,从As op云底飞入对流云带中(见图5b),飞机在云带中追随云团对3000 m、3800 m、4400 m和5300 m高度进行了水平飞行探测和盘旋式的下降探测。图6给出了粒子谱垂子分布特征,资料按100 m高度分别对上升和下降过程进行平均。图6a显示,小云滴浓度随高度变化呈多峰分布,在0°C层(3481 m)附近出现小值区,大值分别出现在0°C层以下约300 m(即3100 m附近)、0°C层以上400 m(即3800 m附近)和4800 m附近,在3100 m附近云粒子平均浓度约 100 cm^{-3} ,最大值 600 cm^{-3} ,对应的云粒子平均直径是 $8 \mu\text{m}$ (图6b),云粒子直径随高度变化也表现出多峰分布,云滴直径与云滴浓度在0°C层上、下300~400 m范围内呈现负相关性,即大的云滴直径对应小的云滴浓度,小的云滴直径对应大的云滴浓度;随着高度的进一步升高云滴直径有递增的趋势。在3000 m以下,主要是对流云带外围的探测资料,可见在低层有几个浓度大值区对应着下面Sc云,浓度大于

400 cm^{-3} 的粒子主要以小于 $1 \mu\text{m}$ 的粒子为主,平均直径没有大的起伏。从2-DC资料(图6c、d)可以看出,在0°C层上400 m和下300 m范围内,粒子浓度小,平均直径比较相近(约 $210 \mu\text{m}$),随着高度的升高,粒子平均直径有逐渐减小趋势,约 $140 \mu\text{m}$ 左右,上升和下降的资料对比显示粒子直径有增大趋势,说明大云粒子在下落过程中有增长趋势,在云顶探测的冰相粒子以针状粒子为主,浓度出现很大的跃增。

4.2 暖云区特征

为了研究对流云带中暖云区特征($T > 0^\circ\text{C}$),从07:30~07:40在0°C层以下(即3000~3200 m附近)进行了水平探测飞行。图7(见文后彩图)给出了在07:47飞行轨迹在雷达PPI图上的水平面投影,图7a、b对比显示,在07:30~07:40飞机从北侧穿越北面对流云带对流区,之后在两云带之间转向,再次穿越北面对流云带。在这飞行时段(图8a),粒子浓度和液水含量(LWC)随时间有很大的跃变,粒子浓度分布不均匀。在07:30:40,2-DC观测具有较低的浓度,粒子浓度为 7.1 L^{-1} 。图8b显示在这时刻存在许多大的粒子,有些粒子直径大于 $500 \mu\text{m}$,粒子平均直径在 $240 \sim 370 \mu\text{m}$ 之间(图8d),而液水含量和小云滴浓度分别为 0.5 g/m^3 和 22.8 cm^{-3} (FSSP-100浓度);07:32:24,2-DC观测到有较高的浓度,最大浓度达到 93.6 L^{-1} ,粒子直径以小于 $400 \mu\text{m}$ 粒子为主(图8c),大于 $500 \mu\text{m}$ 的粒子很少,平均直径在 $110 \sim 180 \mu\text{m}$ 之间(图8d),也就是说,在这个区域小粒子比较多,粒子浓度高,而液水含量和云滴浓度分别为 0.7 g/m^3 和

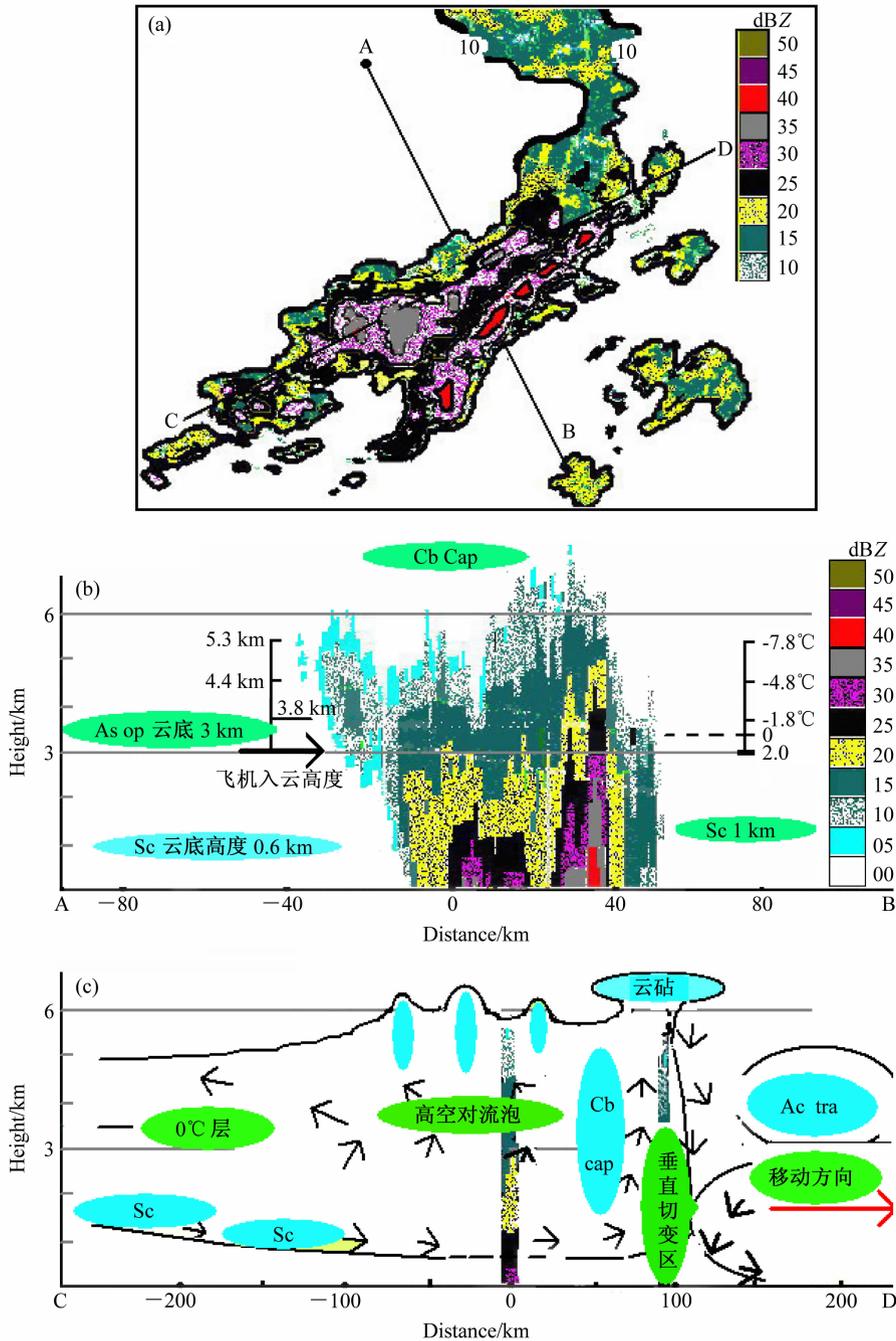


图5 2003年7月8日对流云带结构示意图: (a) 水平面; (b) 沿AB方向的剖面; (c) 沿CD方向的剖面

Fig. 5 Sketch of convective cloud bands on 8 Jul 2003 for (a) horizontal plane, (b) cross-section along AB, and (c) cross-section along CD

210 cm⁻³ (FSSP-100 浓度); 由以上分析可以看出, 2-DC 高浓度区对应小粒子多, 低浓度区对应大粒子多, 粒子浓度与直径呈负相关, 大粒子以水滴为主, 没有大的冰粒子, 2-DC 高浓度区液水含量和小粒子浓度高于 2-DC 低浓度区。07:33:12, 2-DC 探测的浓度为 11.8 L⁻¹, 与 07:30:40 观测的浓度值比较接近, 但液水含量和云滴浓度发生了跃变, 液

态水含量达 2.5 g/m³ 和云粒子浓度达 460 cm⁻³ (FSSP-100 浓度), 粒子的平均直径减小 (图 8d)。图 8e 给出了飞行立体轨迹图, 可见在这时刻, 飞机由东向北转向, 由雷达 RHI 显示 (图 3a), 在 110~120 km 之间, 约 3000 m 高度处, 回波强度高于附近同高度处的回波, 说明这个区域上升运动比周围强, 飞机宏观观测记录在这个区域颠簸严重, 也说

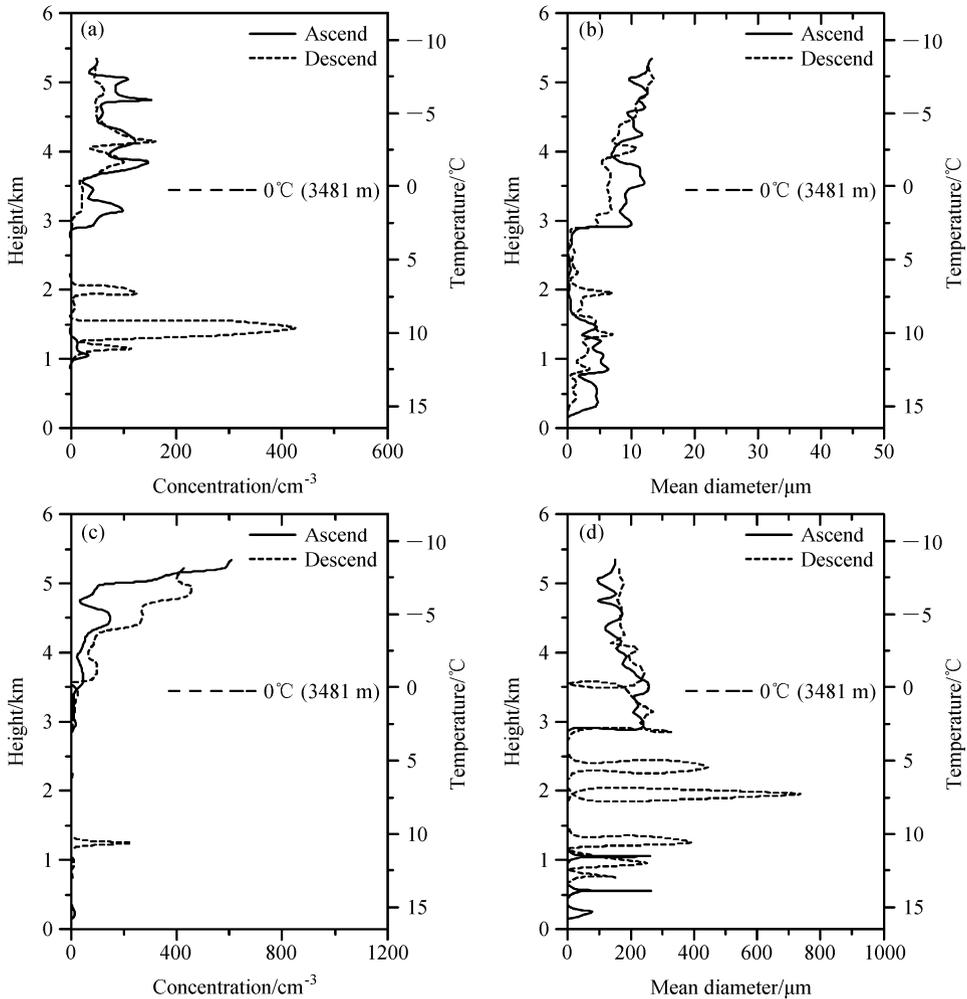


图6 2003年7月8日对流云系内部粒子浓度(a、c)和平均直径(b、d)垂直分布:(a、b)取自FSSP-100资料;(c、d)取自2-DC资料
 Fig.6 The vertical distributions of number concentration (a, c) and mean diameter (b, d) of particles in the convective cloud on 8 Jul 2003; (a, b) from FSSP-100; (c, d) from 2-DC

明这个区域有较强的上升运动,使一些小于 $400\ \mu\text{m}$ 的粒子和云粒子被卷入到液水丰富的上升气流区,导致了液水含量和云滴浓度的增加,粒子的平均直径减小。Stith等^[21]通过穿云探测云中上升气流和粒子浓度,也认为是上升气流作用导致了液水含量和云滴浓度增加以及粒子平均直径的减小。

4.3 冷云区特征

关于中尺度对流云带冷云区特征($T < 0^\circ\text{C}$),图9a(见文后彩图)给出了飞行轨迹在08:26雷达PPI回波图上水平投影,图9b(见文后彩图)把研究时段分成4段,路径1、2、3、4分别对应07:41~07:43、08:07~08:09、08:21~08:23、08:24~08:26时刻。通过图9a、b对比可以看出,各研究时段在雷达PPI回波图上的水平投影位置。路径1

(07:41~07:43,图10a),在 0°C 层附近飞机爬升,2-DC观测的粒子图像发生了明显的变化;在07:41:39,探测的温度为 0.6°C ,高度3333 m,粒子浓度 $5.5\ \text{L}^{-1}$,粒子形状为球形,说明为雨滴;爬升经过 0°C 层(3481 m)后,2-DC观测到的粒子图像发生了变化,07:42:49探测的温度为 -0.1°C ,高度3512 m,粒子浓度 $21.3\ \text{L}^{-1}$,粒子形状为不规则型,在这个高度出现了冰晶聚合物,过冷水含量 $0.15\ \text{g/m}^3$,说明在 0°C 层以上约40 m左右存在冰雪晶粒子攀联、碰冻过程。路径2(08:07~08:09,图10b),飞机在高度3977 m水平飞行穿云,过冷水含量在 $0.25\ \text{g/m}^3$ 左右,温度为 -2.8°C 。由图9a、b对比可知,这段飞行探测的位置位于两对流云带强回波区中间,2-DC、FSSP-100探测的粒子

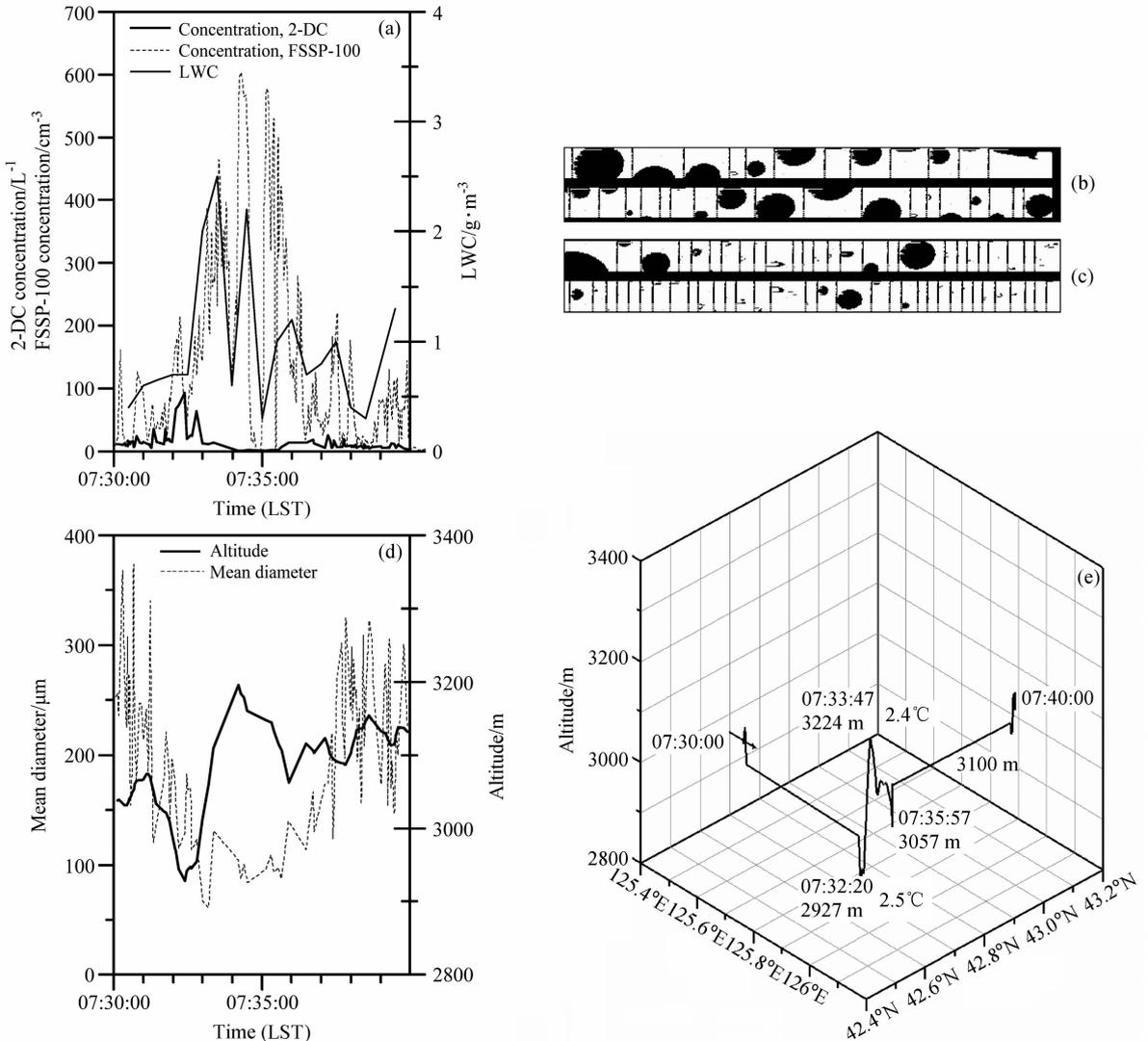


图8 2003年7月8日07:30~07:40飞行探测:(a) 2-DC浓度、FSSP-100浓度和LWC随时间的变化;(b) 07:30:40 2-DC粒子图像;(c) 07:32:24 2-DC粒子图像;(d) 平均直径和高度随时间的变化;(e) 飞行立体轨迹图

Fig. 8 The flight exploration for 0730-0740 LST 8 Jul 2003: (a) Time series of 2-DC concentration, FSSP-100 concentration and LWC (liquid water content); (b) 2-DC particle image at 073040 LST; (c) 2-DC particle image at 073224 LST; (d) time series of mean diameter and altitude; (e) stereograph trajectory during the flight

浓度很低,而在08:05~08:06和08:10~08:11同高度的对流区飞行探测的温度为 -1.8°C ,说明对流区内温度要高于外部温度近 1°C ,冰晶形状为不规则型和针状类型,未出现冰晶聚合物,也就是说,在对流区外部,冰粒子浓度较低,液水含量不高。路径3(08:21~08:23,图10c),在4214~4239 m高度飞行,探测到的温度为 -1.8°C ,处在云中的对流区,粒子浓度起伏很大,2-DC探测的粒子浓度最大达 177.7 L^{-1} ,过冷水含量达到了 $2\text{ g}/\text{m}^3$,探测到的冰晶形状为不规则型和针状类型,有冰雪

晶的聚合物存在,可见在对流区内,在 $0\sim-1.8^{\circ}\text{C}$ 层之间,存在冰雪晶粒子的攀联、碰冻过程,在云内垂直方向存在300 m左右的等温层。路径4(08:24~08:26,图10d),在4520~4601 m高度探测,2-DC探测的浓度随高度的升高而减少,08:24:17高度为4520 m,温度 -2.8°C ,测得的粒子浓度为 231.6 L^{-1} ,出现大冰晶粒子浓度第二峰值区;08:24:35,高度4601 m,温度 -3.3°C ,测得的浓度为 63.3 L^{-1} ,冰晶的形状以针状类型为主。图11给出了对流云带内部各高度处粒子形状(来自

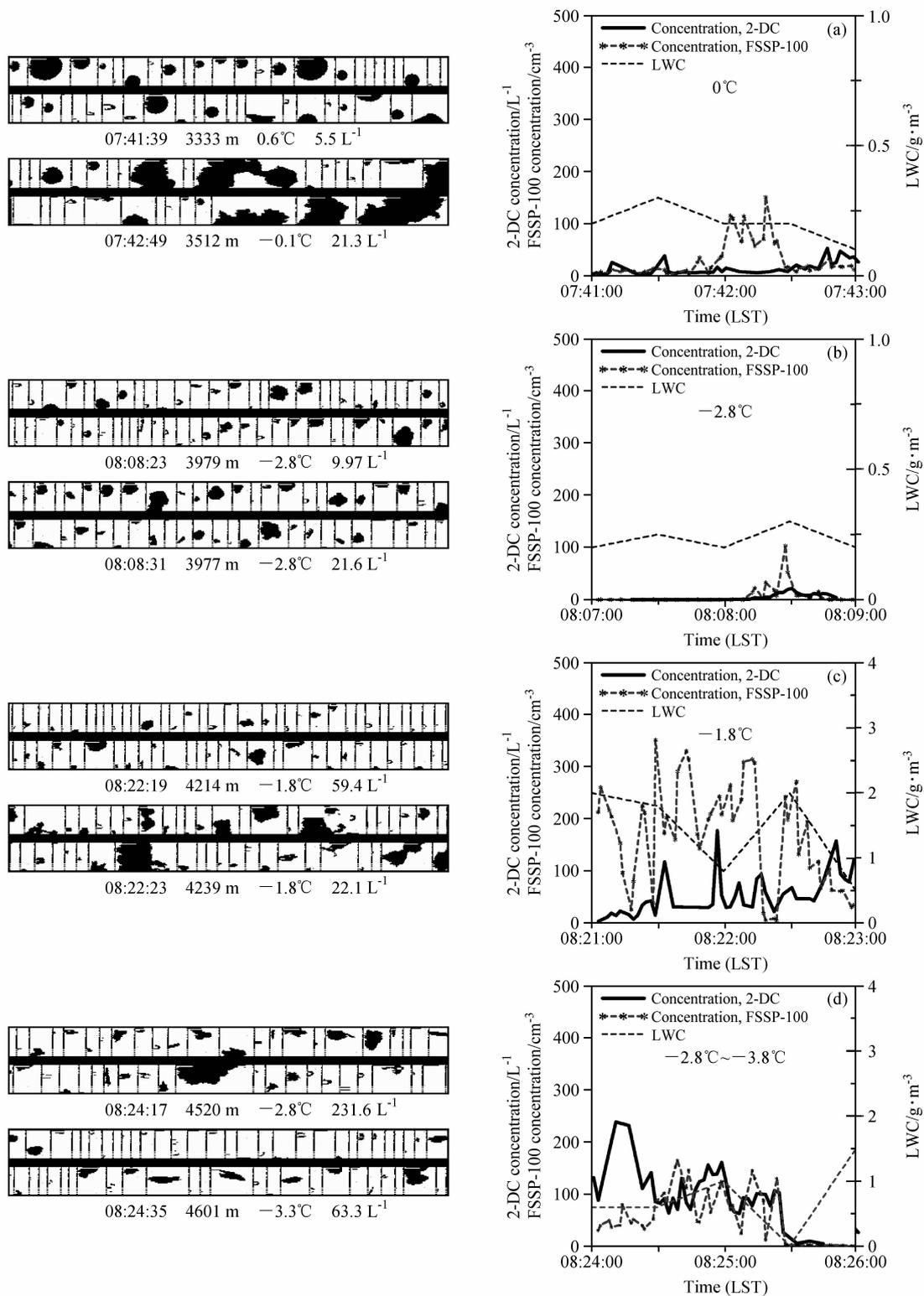


图 10 2003 年 7 月 8 日 07:41~08:26 飞行探测 2-DC 粒子图像 (左侧) 和粒子浓度、液水含量 (LWC) 随时间的变化 (右侧): (a) 路径 1; (b) 路径 2; (c) 路径 3; (d) 路径 4

Fig. 10 The flight exploration from 0741 to 0826 LST on 8 Jul 2003: 2-DC particle images (left) and time series of 2-DC, FSSP-100 number concentration and LWC (right) for stage 1 (a), stage 2 (b), stage 3 (c), stage 4 (d)

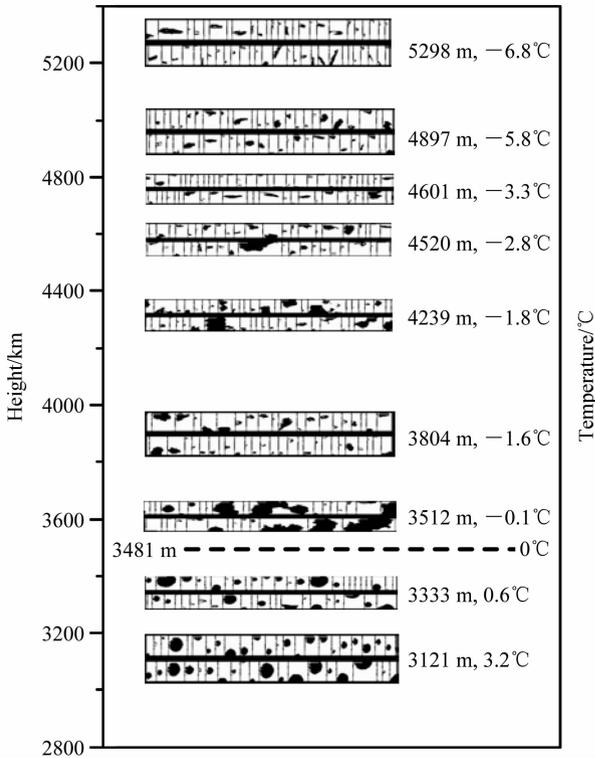


图 11 对流云带内部粒子形状垂直分布 (来自 2-DC 图像)
Fig. 11 Vertical distribution of particle images sampled by 2-DC in the convective clouds on 8 Jul 2003

2-DC 图像)。综合上述分析,中尺度对流云带冷云区在 $0\sim-1.8^{\circ}\text{C}$ 层之间,存在冰晶与冰晶攀联过程,冰晶粒子与过冷水滴碰冻过程并释放潜热;对流区内部垂直方向存在 300 m 左右的等温层,在 -2.8°C 层附近出现冰晶浓度第二峰值区。

5 冷涡云系中的大冰晶淞附增长和冰晶的增生过程

Hallett 和 Mossop^[22]在实验室观测发现,冰质粒在较暖的环境中($-3\sim-8^{\circ}\text{C}$)淞附直径大于 $24\ \mu\text{m}$ 的过冷液滴时会产生碎冰屑,发生冰晶增生现象。在对流云带的观测(图 12a)中发现,在 $5020\ \text{m}$ (-5.8°C)和云顶约 $5300\ \text{m}$ (-7.8°C)之间,FSSP-100 小粒子平均浓度在 $107\sim 34\ \text{cm}^{-3}$ (按高度 100 m 进行平均),经验和理论研究都表明:自然云中的冰晶浓度不可能达到 $10\ \text{cm}^{-3}$,因而,在美国一些研究工作中中介定,当利用 FSSP-100 等

光散射探头观测时,云中(直径大于 $2\ \mu\text{m}$)的粒子浓度超过 $10\ \text{cm}^{-3}$ 是云水区^①。国内新疆冬季层状云降水(1989~1993 年)观测表明^②:云中负温层 $\bar{d}=3.5\sim 45.5\ \mu\text{m}$ [\bar{d} 表示 FSSP-100 探测的直径 $2\sim 47\ \mu\text{m}$ 之间粒子(每 $3\ \mu\text{m}$ 为一间隔)的平均直径]粒子是液态云滴和固态云晶 [$D<100\ \mu\text{m}$, D 表示 2-DC 探测的直径 $25\sim 800\ \mu\text{m}$ 之间粒子(每 $50\ \mu\text{m}$ 为一间隔)的平均直径]组成。其中 $\bar{d}=3.5\sim 18.5\ \mu\text{m}$ 多为液态云滴,而 $\bar{d}=21.5\sim 45.5\ \mu\text{m}$ 则是液固粒子共存。仅当 $\bar{d}=3.5\sim 18.5\ \mu\text{m}$ 云滴浓度很低甚至不存在时, $\bar{d}=21.5\sim 45.5\ \mu\text{m}$ 粒子则是云晶为主,浓度量级为 $10^0\sim 10^{-3}\ \text{cm}^{-3}$ 。内地对流云带水汽条件、热力条件明显优于新疆冬季层状云,由此推测,FSSP-100 探测的云中这部分粒子 $\bar{d}\leq 18.5\ \mu\text{m}$ 为液态云滴, $\bar{d}>18.5\ \mu\text{m}$ 的粒子则是液固粒子共存,由图 13a 可见,在对流云带内部存在直径大于 $24\ \mu\text{m}$ 的过冷液滴。2-DC 探测的粒子浓度的大值区在 $5020\ \text{m}$ 和 $5287\ \text{m}$ 之间,最大值出现在 $5242\ \text{m}$ (-6.8°C)处。在飞机上升阶段探测,大于 $50\ \mu\text{m}$ 小于 $300\ \mu\text{m}$ 的粒子浓度随高度的升高迅速增加,平均浓度(100 m 高度平均)达到 $476\ \text{L}^{-1}$ (图 12c),大于 $300\ \mu\text{m}$ 的粒子平均浓度也很大,达到 $35\ \text{L}^{-1}$ (图 12d),冰晶浓度的高值区对应的过冷水含量达到 $2\ \text{g}/\text{m}^3$ 。图 14 显示了 King 热线含水量仪和 FSSP-100 的液水含量垂直分布,可以看出,两个测量结果有较好的对应关系。

图 15 给出了飞机探测的对流云带沿 C-D 剖面上的宏微观参数结构图,可以看出,对流云带的顶部以针状冰晶为主,2-DC 探测的粒子浓度每百米平均约为 $600\ \text{L}^{-1}$,FSSP-100 探测的粒子浓度每百米平均约为 $50\ \text{cm}^{-3}$,液水含量在 $4300\ \text{m}$ 达到最大值为 $2\ \text{g}/\text{m}^3$ 。研究表明^[23]:可以用 $300\ \mu\text{m}$ 区分冰晶、雪晶界限,直径大于 $300\ \mu\text{m}$ 的片状晶体具有较大的下落速度,可启动碰冻过冷云滴(淞附)并产生次生冰晶的增生过程。因此,由以上分析可以看出,在云的顶部存在大量的冰晶和雪晶,也有直径大于 $24\ \mu\text{m}$ 的过冷液滴。根据过去吉林多年观测表明:降水性层状云中,冰晶浓度平均为 $26.2\ \text{L}^{-1}$,最大达 $222\ \text{L}^{-1}$ ^[12],对流云带上部存在如此高的冰

① 游来光. 利用粒子测量系统(PMS)研究云物理过程和人工增雨条件. 中国气象局人工影响天气办公室, 1993, 37pp

② 陈万奎, 严采蒙. 人工增雨(雪)效果的物理检验. 中国气象局“八五”期间气象科学基金研究论文汇编

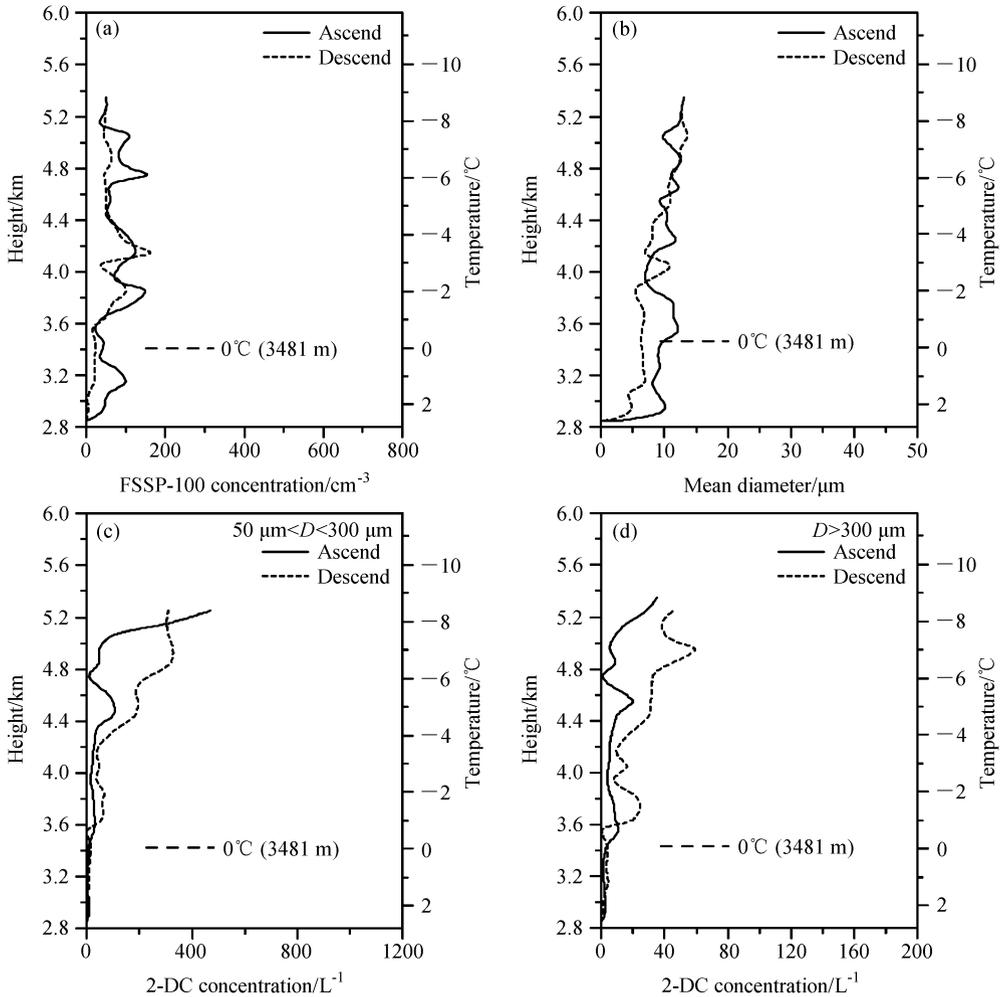


图 12 2003 年 7 月 8 日对流云系内部 2800~5800 m 层粒子浓度 (a、c、d) 和平均直径 (b) 垂直分布。(a、b) 取自 FSSP-100 资料, (c、d) 取自 2-DC 资料

Fig. 12 The vertical distributions of particle number concentration (a, c, d) and mean diameter (b) in the convective clouds on 8 Jul 2003; (a, b) From FSSP-100 ; (c, d) from 2-DC

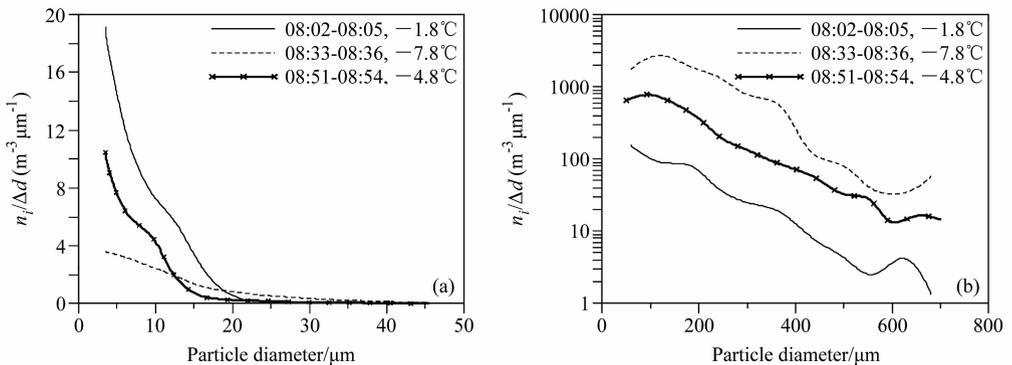


图 13 2003 年 7 月 8 日对流云内部三个温度层 3 分钟平均粒子谱分布: (a) FSSP-100; (b) 2-DC。ni/Δd 表示每单位粒子直径间隔的粒子的数浓度

Fig. 13 The particle spectra averaged for 3 min at -1.8°C , -4.8°C and -7.8°C layers in the convective clouds on 8 Jul 2003; (a) FSSP-100; (b) 2-DC. $n_i/\Delta d$ denotes the particle number concentration per unit particle diameter interval

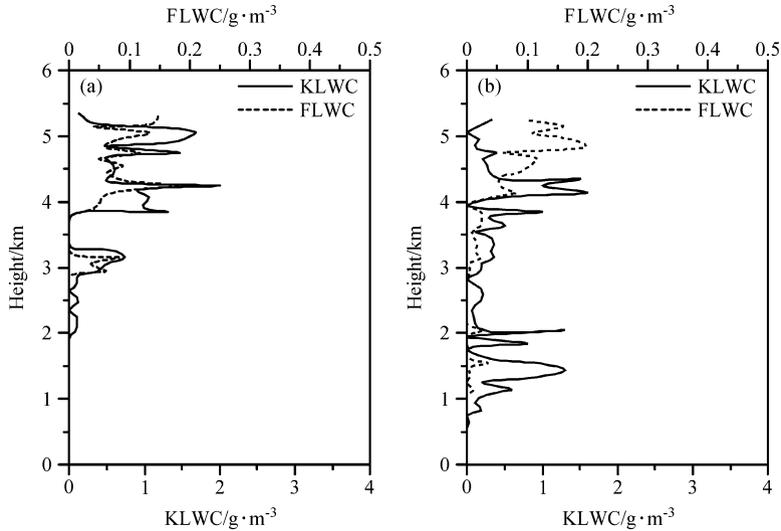


图 14 2003 年 7 月 8 日 King 热线含水量仪测量 (KLWC) 和 FSSP-100 计算 (FLWC) 的液水含量垂直分布: (a) 上升; (b) 下降
Fig. 14 Vertical distributions of liquid water content from King hotwire instrument (KLWC) and FSSP-100 (FLWC) on 8 Jul 2003: (a) Ascending; (b) descending

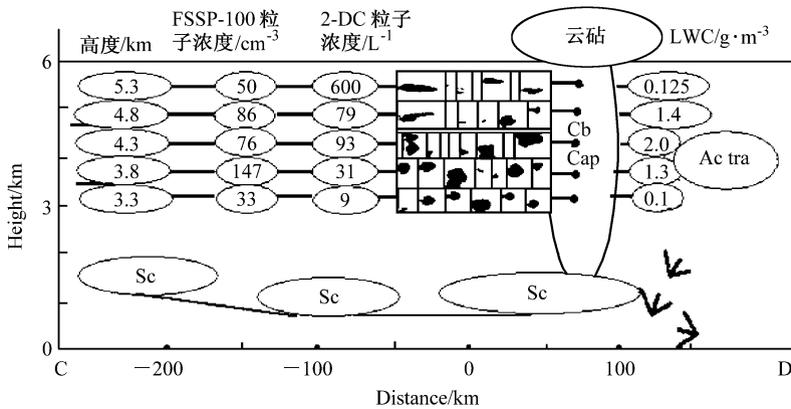


图 15 2003 年 7 月 8 日对流云带沿 CD 剖面上的宏微观参数结构图

Fig. 15 Sketch of macro/microphysics parameters for the convective cloud bands along cross-section CD on 8 Jul 2003

晶浓度,可能是冰晶繁生过程的结果,同时,淞附过程又促使冰晶快速长大下落,经过融化层融化,在 0°C 层以下通过碰并过程进一步长大,对降水的持续发展起到重要作用。此外,在 -5.8°C 层以上,2-DC 观测到了一些针状冰晶,这些易碎冰晶与冰晶或水滴相碰,与观测的飞机探头相撞时产生破碎,也可造成冰晶浓度的增加,Rangno 等^[24] 在外场飞机穿云观测时也观测到这种现象。

6 结论

根据观测和理论分析,得出如下结论:

(1) 此次东北冷涡对流云系中等强度,具有明显的带状水平回波结构,垂直尺度小(小于 6 km)。

中尺度对流云带液态水含量十分丰富,过冷水含量最大值可达 3.3 g/m^3 ,云的上部过冷水含量也达到 2.0 g/m^3 。

(2) 云滴直径与云滴浓度在 0°C 层附近上、下呈现出负相关性。通过分析解释了上升气流强的区域有更小的云滴粒子和冰晶粒子的原因,上升气流的作用造成了 0°C 层以下粒子浓度的积累。

(3) 在弱上升气流区,2-DC 观测的粒子浓度,高浓度区对应小粒子多,低浓度区对应大粒子多;上升气流强的区域与上升气流弱的区域相比,上升气流强的区域有更小的云滴粒子和冰晶粒子。

(4) 在 $0\sim-1.8^{\circ}\text{C}$ 层之间,冰雪晶与冰雪晶攀联、冰雪晶与过冷水滴碰冻过程明显。

(5) 在中等强度的东北冷涡对流云带的垂直探测中, 云带上部存在冰雪晶高浓度区, 最大值出现在 5242 m (-6.8°C) 处, 达到 1062 L^{-1} , 在这个区域, 过冷水含量高, 对冰晶的快速长大起到重要作用。

参考文献 (References)

- [1] Yang M J, Houze R A Jr. Sensitivity of squall-line rear inflow to ice microphysics and environmental humidity. *Mon. Wea. Rev.*, 1995, **123**: 3175~3193
- [2] Pruppacher H R, Klett J D. *Microphysics of Clouds and Precipitation*. Kluwer Academic Publishers, 1997. 954 pp
- [3] Johnson D E, Wang P K, Straka J M. A study of microphysics processes in the 2 August 1981 CCOPE supercell storm. *Atmospheric Research*, 1994, **33**: 93~123
- [4] 郑国光, 陈跃, 王鹏飞, 等. 人工影响天气研究中的关键问题. 北京: 气象出版社, 2005. 102pp
Zheng Guoguang, Chen Yue, Wang Pengfei, et al. *Critical Issues in Weather Modification Research* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2005. 102pp
- [5] Garvert M F, Colle B A, Mass C F. The 13 - 14 December 2001 IMPROVE-2 event. Part I: Synoptic and mesoscale evolution and comparison with a mesoscale model simulation. *J. Atmos. Sci.*, 2005, **62**: 3474~3492
- [6] Garvert M F, Colle B A, Mass C F. The 13 - 14 December 2001 IMPROVE-2 event. Part II: Comparisons of MM5 model simulations of clouds and precipitation with observations. *J. Atmos. Sci.*, 2005, **62**: 3520~3534
- [7] Colle B A, Garvert M F, Wolfe J B. The 13 - 14 December 2001 IMPROVE-2 event. Part III: Simulated microphysical budgets and sensitivity studies. *J. Atmos. Sci.*, 2005, **62**: 3535~3558
- [8] Reisner J, Rasmussen R M, Bruintjes R T. Explicit forecasting of supercooled liquid water in winter storms using the MM5 mesoscale model. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1998, **124**: 1071~1107
- [9] Schultz D M, Steenburgh W J, Trapp R J, et al. Understanding Utah winter storms: The intermountain precipitation experiment. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2002, **83**: 189~210
- [10] Tremblay A, Vaillancourt P A. Improvement of a mixed-phase cloud scheme using aircraft observations. *Mon. Wea. Rev.*, 2003, **132**: 672~686
- [11] Field P R, Brown P R A. Simultaneous radar and aircraft observations of mixed phase cloud at the 100m scale. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 2004, **130**: 1877~1904
- [12] 汪学林, 金德镇. 云雨物理论文. 北京: 中国科学技术出版社, 1987. 1~16, 28~38
Wang Xuelin, Jin Dezhen. *Collected Works of Cloud and Precipitation Physics* (in Chinese). Beijing: Science Press, 1987. 1~16, 28~38
- [13] 游来光, 马培民, 胡志晋. 北方层状云人工降水试验研究. 气象科技. 2002, **30** (增刊): 19~56
You Laiguang, Ma Peimin, Hu Zhijin. Researches on precipitation enhancement of stratiform cloud in northern China. *Meteorological Sciences and Technology* (in Chinese), 2002, **30** (Suppl.): 19~56
- [14] 胡志晋. 层状云人工增雨机制、条件和方法的探讨. 应用气象学报, 2001, **12** (增刊): 10~13
Hu Zhijin. Discussion on mechanisms, conditions and methods of precipitation enhancement in stratiform clouds. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 2001, **12** (Suppl.): 10~13
- [15] 洪廷超, 周非非. “催化-供给”云降水形成机理的数值模拟研究. 大气科学, 2005, **29** (6): 885~896
Hong Yanchao, Zhou Feifei. A numerical simulation study of precipitation formation mechanism of “seeding-feeding” cloud system. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2005, **29** (6): 885~896
- [16] 孙力, 郑秀雅, 王琪. 东北冷涡的时空分布特征及其与东亚大型环流间的关系. 应用气象学报, 1994, **5** (3): 297~298
Sun Li, Zheng Xiuya, Wang Qi. Climatological characteristics of northeast cold vortex in China. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 1994, **5** (3): 297~278
- [17] 毛贤敏, 曲晓波. 东北冷涡过程的能量学分析. 气象学报, 1997, **55** (2): 246~251
Mao Xianmin, Qu Xiaobo. Energetics analysis of a cold vortex in Northeast China. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1997, **55** (2): 246~251
- [18] 陈艳秋, 余志豪. 东北冷涡的位涡动力诊断模型及应用. 气象科学, 2003, **23** (4): 446~451
Chen Yanqiu, Yu Zhihao. A dynamical diagnostic model of northeast cold vortex and its application. *Scientia Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2003, **23** (4): 446~451
- [19] 陈力强, 陈受均, 周小珊. 东北冷涡诱发的一次 MCS 结构特征数值模拟. 气象学报, 2005, **63** (2): 173~183
Chen Liqiang, Chen Shoujun, Zhou Xiaoshan. A numerical study of the MCS in a cold vortex over northeastern China. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2005, **63** (2): 173~183
- [20] 苗春生, 吴志伟, 何金海. 近 50 年东北冷涡异常特征及其与前汛期华南降水的关系分析. 大气科学, 2006, **30** (6): 1249~1256
Miao Chunsheng, Wu Zhiwei, He Jinhai. The anomalous features of the northeast cold vortex during the first flood period in the last 50 years and its correlation with rainfall in South China. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2006, **30** (6): 1249~1256
- [21] Stith J L, Dye J E, Bansemmer A, et al. Microphysical observation of tropical cloud. *J. Appl. Meteor.*, 2002, **41**: 97~

117

- [22] Hallett J, Mossop S C. Production of secondary ice particles during the riming process. *Nature*, 1974, **249**: 26~28
- [23] Ono A. The shape and riming properties of ice crystals in

natural clouds. *J. Atmos. Sci.*, 1969, **26**: 138~147

- [24] Rangno A L, Hobbs P V. Production of ice particles in clouds due to aircraft penetration. *J. Climate Appl. Meteor.*, 1983, **22**: 214~232

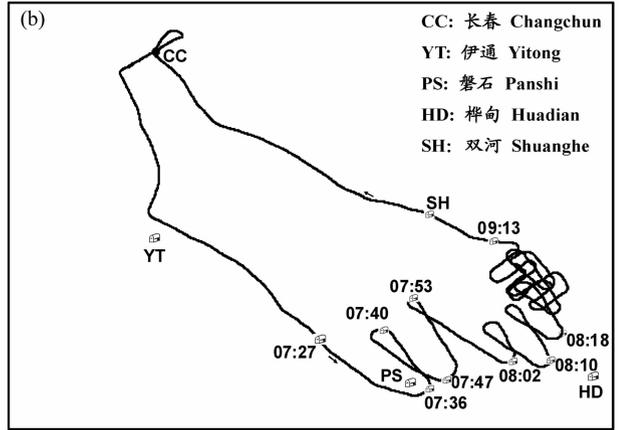
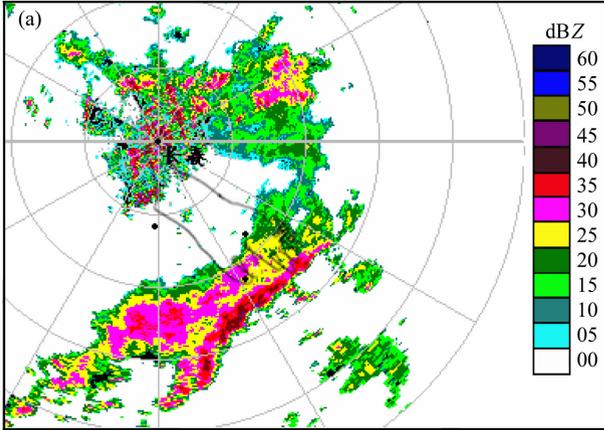


图7 2003年7月8日飞行轨迹在07:47:12雷达PPI回波图上的水平投影(a)以及飞行轨迹水平投影(b)图

Fig. 7 Horizontal projection of flight track on PPI radar scans along 0° azimuth at 0747: 12 LST (a) and horizontal projection of flight track (b) on 8 Jul 2003

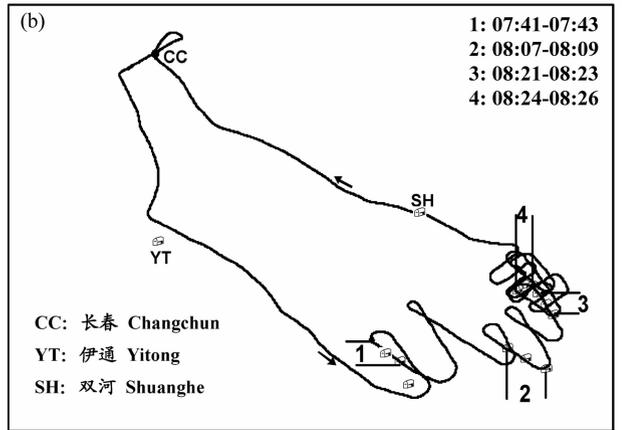
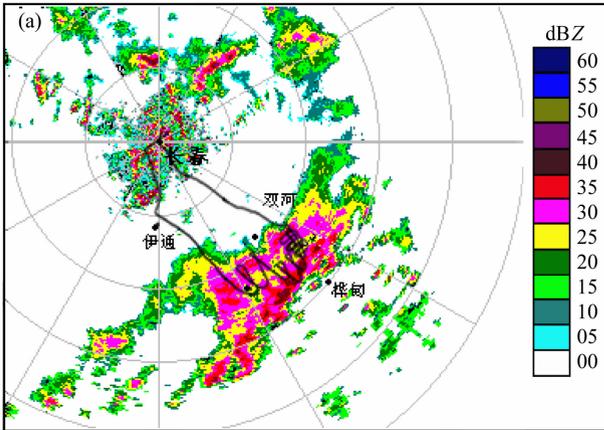


图9 2003年7月8日飞行轨迹在08:26雷达PPI回波图上的水平投影(a)以及飞行轨迹水平投影图(b)

Fig. 9 Horizontal projection of flight track on PPI radar scans along 0° azimuth at 0826 LST (a) and horizontal projection of flight track (b) on 8 Jul 2003