

# 乌鲁木齐冬季冷锋云带和锋下层积云的微物理结构及其降雪特征

王广河 游来光

(人工影响天气研究所)

## 提 要

本文根据1983年11月7日云物理专业考查飞机对乌鲁木齐冬季一次冷锋降水前期的云与降水微结构观测,进行了分析与研究,结果表明:在冷锋降雪初始阶段,云具有多层结构,锋上存在一条宽约5 km的云带,估计云带中的上升气流大于 $0.8\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,具有窄对流云带的某些特征。冰晶初始形成于温度为 $-17^{\circ}\text{C}$ 的锋上云带顶部。在锋上与锋下存在两个过冷水区,据此判断在冷锋降雪前期具有人工增雪条件。

## 一、引 言

我国北方人工降水的经验认为,一般在降水过程的前期作业有较好效果。根据近年来的研究,冷锋降水中的强降水时段与强降水云带有关,但目前对不同云带中微结构特征的深入了解仍然很少。

本文根据1983年11月7日新疆冬季人工降雪资源研究协作组对乌鲁木齐地区一次冷锋降水云前期的飞机观测资料,分析了冷锋云带的水平及垂直微物理结构特征,并讨论了云中冰粒子的形成、增长机制和人工增加降水的条件问题。

## 二、天气形势

1983年11月7日,伴随一次较强冷空气的入侵,乌鲁木齐附近地区产生了过程降水量为3 mm左右的降雪天气。该日14时地面上,低压中心位于富蕴一带。700hPa天气图上,高空槽线呈东北—西南走向,高空槽的移动速度约为 $50\text{km/h}$ 。飞机观测时间为14时56分—15时40分。此时段地面冷锋已

移至乌鲁木齐市以东,但根据地面测站每小时各气象要素的演变和高空温、压、湿、风的特征分析,14—15时左右有一条副冷锋移过本站,中、高层主要冷锋锋区仍处于测站以西,飞行时乌鲁木齐市上空冷锋锋区高度在2000—3000 m,飞机在4000 m高度层水平穿越冷锋云带,然后向下作垂直探测。

图1为机场降雪强度随时间的演变。降雪于15时20分开始,23时结束。图中表明,先后有两个强降雪时段,每段持续约1小时30分。从地面雪晶观测分析,前段降雪以带冻滴的枝星雪团为主,后段强降雪则以不带冻滴的侧片、柱束状雪晶为主。

## 三、观测设备

飞机所装粒子测量系统公司生产的机载PMS观测仪器为:尺度为 $0.5\text{—}47\mu\text{m}$ (FSSP)云粒子探头,25— $800\mu\text{m}$ (2D-C)二维冰粒子探头及200— $6400\mu\text{m}$ (2D-P)二维雪粒子探头。用EGG露点计及机载铂电阻测温仪观测湿度与温度。地面配有雪晶显微照像,并进行每20分钟间隔的降雪强度连续观

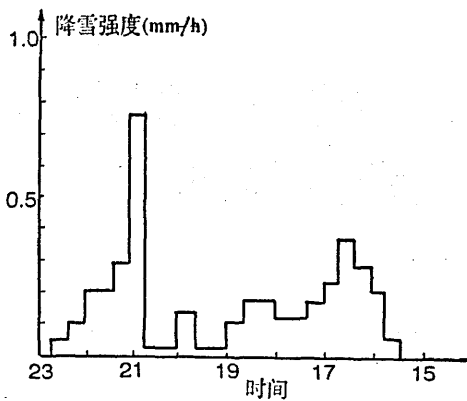


图1 降雪强度的时间演变

测。

#### 四、观测结果

本次冷锋降水云前期具有多层结构(见图2)。高层存在着一条与冷锋相平行

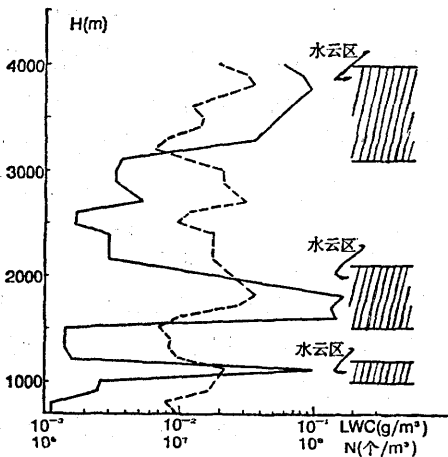


图2 云粒子浓度、含水量垂直分布  
图中实线为N, 虚线为LWC

(东北—西南走向)的冷锋锋上云带。云带宽约5km。4000m层穿越云带时的温度为 $-16.8^{\circ}\text{C}$ ，飞行未达云顶。云带底部3000m处的温度为 $-10.5^{\circ}\text{C}$ ，对应冷锋锋区上界；锋区垂直厚度为1000m，锋区逆温的温度递增率为 $0.5^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 。锋下有厚度为600m的层积云，云顶高度为2100m，温度为 $-9.8^{\circ}\text{C}$ ；云底为1500m，温度为 $-6.8^{\circ}\text{C}$ 。在低层1100m

处存在着约200m厚的低云，低云中的温度约为 $-3^{\circ}\text{C}$ 。锋区所在高度为一千层，厚约1km，可能与锋区附近的动力下沉有关(1)。

##### 1. 冷锋云带水平微结构特征

综合观测的微结构数据、飞行航迹及宏观记录资料，给出了飞机在4000m高度处水平穿越冷锋云带时，沿航线的雪粒子浓度(见图3)。冷锋云带中的雪粒子最大浓度为4000

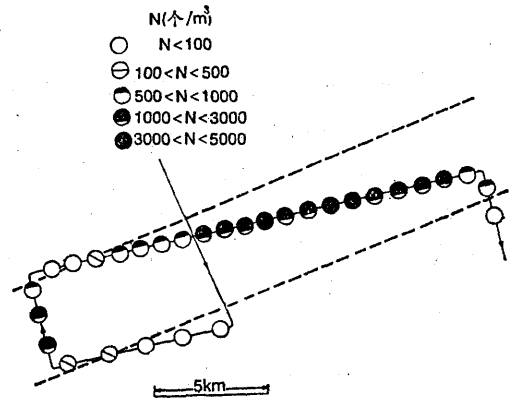


图3 飞机在4000m层水平穿越冷锋云带沿云带时航线雪粒子浓度

个/ $\text{m}^3$ 。雪晶主要形状为霰或类霰粒子。根据冷锋云带中雪粒子的水平分布情况，将浓度按0—500、500—3000、3000—4000个/ $\text{m}^3$ 分为I、II、III三种类型，其分别对应的一些微物理特征量(见表1)， $4、N_0$ 为按指数谱

$$\frac{dN}{dD} = N_0 \exp(-AD)$$

拟合的系数，IWC为雪的含水量。

##### 2. 各层云微结构特征

图2为直径 $2-47\mu\text{m}$ 的粒子浓度垂直分布，在冷锋云带中粒子浓度由上层 $1 \times 10^8$ 个/ $\text{m}^3$ 向下减少到 $3 \times 10^6$ 个/ $\text{m}^3$ 。锋下层积云上部云滴浓度达 $1.5 \times 10^8$ 个/ $\text{m}^3$ 。三层云之间存在两个干层区，粒子浓度都低于 $3 \times 10^6$ 个/ $\text{m}^3$ 。冷锋云带中的含水量由高层 $0.036\text{g}/\text{m}^3$ 向下减少到 $0.0065\text{g}/\text{m}^3$ 。层积云中的

表 1

特征量 \ 类型	I	II	III
$\bar{N}$ (个/ $m^3$ )	126	1667	3542
$\sqrt{\bar{D}}$ ( $\mu m$ )	352	848	915
$\sqrt{\bar{D}^3}$ ( $\mu m$ )	382	963	1013
$\Lambda$ ( $mm^{-1}$ )	6.28	2.44	2.35
$N_0$ ( $m^{-3} \cdot mm^{-1}$ )	791	4067	8323
IWC ( $g \cdot m^{-3}$ )	0.0016	0.36	0.86

含水量最大值在云的中上部,仅 $0.0038g/m^3$ 。低云中的最大含水量为 $0.022g/m^3$ 。冷锋云带以下的干层区上部的较大含水量可能是冰粒子按液滴计算高估了含水量值造成的。这种现象可由各层粒子谱分布特征表现出来。

由图4可以看出:各高度上的云中粒子谱和干层区中的粒子谱存在着明显差异。在小粒子段,云中浓度高于干层2—3个量级,而较大粒子( $30\mu m$ )低于干层3倍。几种云

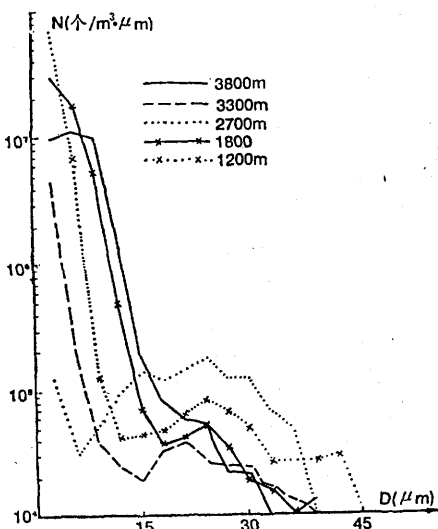


图4 不同高度上的云粒子谱

状间的粒子谱也有所不同。冷锋云带上部,小于 $47\mu m$ 云粒子浓度较高,且大部分粒子集中在 $9\mu m$ 以下的小粒子段,可视为液滴云。冷锋云带下部的粒子谱有双峰,除 $6\mu m$ 以下的小粒子段有高值外,在 $20\mu m$ 处有第二峰值浓度,同等尺度下,浓度均低于上部。层积云和低云中的粒子谱都有两个峰值浓度,小于 $9\mu m$ 的粒子具有高浓度。

图5表明:冷锋云带中雪粒子浓度在中

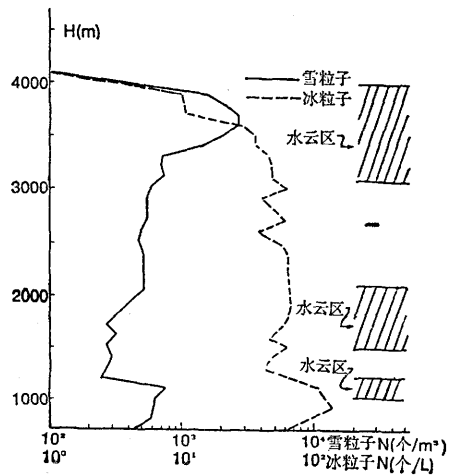


图5 雪、冰粒子浓度垂直分布

上部位有最大值,为 $2.7 \times 10^3$ 个/ $m^3$ ,向上、向下减小。层积云中平均雪粒子浓度为 $3 \times 10^2$ 个/ $m^3$ 。低云中的雪粒子平均浓度为 $3.2 \times 10^2$ 个/ $m^3$ 。冷锋云带中的冰粒子浓度由云顶处的10个/L向下至云底迅速增加到50个/L。层积云中冰粒子浓度在50个/L附近变化。低云中的冰粒子浓度为110个/L。

图6表明:在冷锋云带中由云顶至云底雪粒子平均直径以 $220\mu m/100m$ 的增长速度增长。在3000m层云底处的雪粒子直径为 $2000\mu m$ 。由3000至2100m层雪粒子直径从2000减小至 $1000\mu m$ ,这可能与干层中的蒸发有关。根据地面定时的降雪强度观测推测,在地面降雪初期,产生于冷锋云带中的大部分雪粒子可能尚未达到地面。

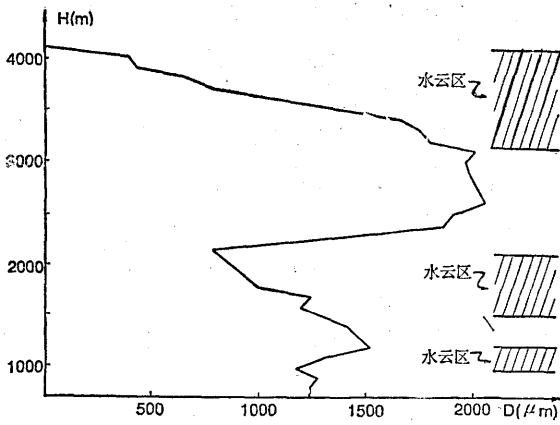


图6 雪粒子平均直径垂直分布

由图7可以看出：除冷锋云带上部雪粒子谱为单调下降之外，以下各层均有第二峰值发展。第二峰值的位置随高度降低向大直径方向偏移。这与早期的一些观测结果一致(2)。

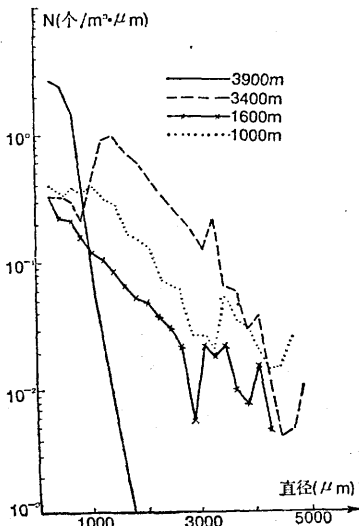


图7 各层云中雪粒子谱

## 五、讨论

以上观测结果表明，在高层冷锋云带尚未参与低层降雪的情况下，地面仅有微量降雪，随着形成于冷锋云带中的雪粒子对低层的影响，地面降雪明显加强。根据淞附的雪团以 $1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的速度下落，可推测来自冷

锋云带中的雪粒子将在15时50分落至地面。这与地面雪强随时间的演变所出现的第一峰值相对应。

根据飞机水平穿越冷锋云带观测所提供的粒子浓度、图像及温度信息，推测4000m以上应仍有较厚云体存在。云带宽约5km，具有窄冷锋降雪带的特征(3)。冷锋云带中不同高度上的冰、雪粒子图像资料(图略)反映了云中粒子的增长情况。冷锋云带4000m层雪粒子平均直径约 $400\mu\text{m}$ ，从粒子图形分析很像是霰或类霰粒子。随着高度的降低雪粒子迅速增长。在冷锋云带3400m层，其大部分雪粒子已增长成为具有明显枝叉结构的枝星雪晶。在冷锋云带3000m层，粒子形状已增长成为较大的枝星状雪晶。单晶明显减少，攀附成的雪团浓度迅速增多。

地面显微照像所获取的照片资料表明：本过程先期降雪的晶形以枝星状雪晶攀附在一起的雪团为主。雪晶表面有明显的淞附现象。后期降雪，雪晶形状呈侧片及柱帽状。雪晶表面无淞附现象。上述演变特征也曾见于其它个例。

冷锋云带上部冰粒子浓度为10个/L，随着高度的降低冰粒子浓度逐渐增加。低云中的冰粒子浓度比高层增加了一个量级。冷锋云带中冰粒子浓度向下增加表明，云中除自然冰晶核化之外，雪晶的碰撞破碎有可能促使云中冰晶浓度增加。在二维粒子探头所提供的图像中，有些小的冰晶看起来很像是晶碎片或由碎片增长起来的不规则形状的冰晶。低层冰粒子的增加除上述可能外，在 $-3^{\circ}\text{C}$ — $-8^{\circ}\text{C}$ 区域雪晶因结淞而提供次生冰粒子的繁生机理，可能起重要作用。

以上观测结果表明，在本次个例中，冷锋降水云前期云中存在液态水，有利于实施人工降雪催化作业。冷锋云带中过冷水由云上部向下垂直减少，而冰晶浓度则由云上部向下增加，因此人工降雪选取冷锋云带中上部位催化作业可能会得到较好的增雪效果。

锋上云带中虽存在浓度较高的冰、雪晶粒子,但过冷水并未耗尽,说明该云带中有较强的上升气流。按所观测的冰、雪晶粒子浓度,通过凝华增长耗尽过冷水时的凝结供应率,估算云中的垂直气流速度下限为 $0.81\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,与冷锋窄雨带中所观测到的垂直气流速度相当〔1〕。这表明冰锋窄降雪带具有窄对流云带的特性。

## 六、结 语

本次冬季冷锋降雪初始阶段,锋上存在一条宽 $5\text{ km}$ 左右的云带,并有过冷水,云顶温度估计低于 $-17^{\circ}\text{C}$ 。冰晶初始形成于温度为 $-17^{\circ}\text{C}$ 的锋上云带顶部。锋区为一干层,其厚度约为 $1\text{ km}$ ,在该层雪粒子有部分蒸发。在冷锋云带中,雪粒子在下落过程中的平均增长率为 $2\text{ mm}\cdot\text{km}^{-1}$ 。

由地面至 $4000\text{ m}$ 高度,存在锋上、锋下及低云三个过冷水层。虽然液水含量都低于 $0.1\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,但地面观测的雪晶都有明显的碰撞痕迹,并且聚并成雪团下落,这表明冰、

雪晶增长的微物理过程包括凝华、淞附与攀附。

在本例中,虽云顶温度高于 $-20^{\circ}\text{C}$ ,但云中冰晶浓度高达 $40-50$ 个/L,表明存在有冰晶的繁生或积累过程。云中过冷水并未耗尽,应与有较强的水汽凝结有关。粗估锋上云带中具有 $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右的垂直速度,具有窄对流云带特性。

根据整个降水期间雪晶形态演变特点分析,相对而言,在降雪系统的前期进行人工增雪更为有利。

## 参 考 文 献

- 〔1〕 Browning, K.A. and Harrold, T.W.; Air motion and precipitation growth at a cold front; Quart. J.R.met. Soc. 96, 369—389, 1970.
- 〔2〕 游来光等,春季吉林地区层状冷云中冰晶的形成与雪晶增长特点,气象学报, Vol.35, No. 4, Nov, 1965.
- 〔3〕 Hobbs, P.V, The substructure of narrow cold-frontal rain bands, J.Atmos.Sci, 1982, Vol.39, No.2, P280—295.

# The microphysical structures and precipitation characteristics of the cloud zone over a wintertime cold front and stratocumulus under it in Urumqi

Wang Guanghe You Laiguang

(Institute of Weather Modification, AMS)

## Abstract

The microphysical structures of cloud and snowfall in precipitation starting stage were observed with a instrument aircraft on Nov. 7, 1983. The results show that there were several cloud layers in the starting stage of cold front snowfall, and there was a snow band with  $5\text{ km}$  width over the cold front. It is estimated that the updraft velocity is greater than  $0.8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  in the snowband, which is somewhat characterized by a narrow convective cells band. The ice crystals were formed at the top of the convective cloud band with temperature about  $-17^{\circ}\text{C}$ .