

融化层附近降水粒子微物理特征的个例分析

陈万奎 游来光

(气象科学研究院人工影响天气研究所)

提 要

本文给出了融化层中雪花融化过程特征和融化层附近降水粒子尺度谱分布函数;雪花、融雪、雨滴尺度谱分布均可用指数函数 $N = N_0 \exp(-\lambda D)$ 来拟合。在融化层附近,谱参数 N_0 、 λ 随温度升高而增大有正相关关系。谱参数 N_0 、 λ 之间有幂指数关系 $N_0 = \sigma \lambda^p$,降水粒子相态不同, σ 值差异明显。

一、引 言

在降水云的雷达观测中,亮带的存在表明负温层不断有雪花下落在融化层中融化,这对于判定降水激发机制和降水维持过程有重要参考价值。

此外,雪花在融化过程中,还可能引起许多微物理过程。如融雪对云滴碰并速率比等质量水滴碰并云滴速率的增加,融雪间碰并的增强,碰并时伴随产生的破碎、融雪表面水膜的溅散,雪花、融雪、雨滴尺度谱分布的演变,以及这些过程对暖雨形成、发展、维持的影响都有待于对融化层的精细观测和深入分析研究。

Ohtake (1969)^[1]首先报导了雪花通过融化层的粒子尺度谱分布变化。由于他是在日本Zao山和阿拉斯加道格拉斯岛上的山坡梯度站观测的,因而只有二个或三个高度上粒子尺度谱变化,没有详细的融化过程和谱分布连续变化。云中融化层附近粒子的精细观测是近十年来开展的,它是光学排阵粒子测量系统(PMS)广泛用于飞机探测的结果。Houze(1979)^[2]给出了温带气旋计划中锋面云中降水粒子尺度谱分布、Lo(1982)^[3]研究了美国冬季风暴中降水粒子尺度谱分布、以及Gorden(1982)^[4]报导了加利福尼亚雨带降水粒子尺度谱分布。这些研究重点分析了负温层中雪花尺度谱分布,由于融化层中降水粒子谱资料不多没有论述。

本文重点讨论一次层状云降水中融化层附近飞机探测结果(1982年7月8日内蒙呼和浩特附近)。机载仪器同文献^[2,3,4]。降水云系是由主体云和低云组成。主体云是高层云,降水量不大,在云下5—15℃层中测得的雨滴谱计算的雨强平均值 $\bar{I} = 1.49$ 毫米/小时。主体云云底高5000米(海拔高度、下同)、温度2.6℃。其下为一少云层厚度800米,再下

是低云，由层积云、碎层云和积云状层积云构成，低云顶高4200米、温度 4.2°C 。低云底高2300米、温度 15°C ，低云含水量很小平均为 $0.04\text{克}/\text{米}^3$ ，对降水粒子碰并增长、雨强增加作用不大。选择这样的个例，目的是重点讨论雪花在融化层中详细融化过程、粒子尺度谱分布的演变。

二、雪花的融化过程

云中融化层中雪花融化过程的观测，过去由于机载仪器性能的限制，没有取得雪花融化的详细资料。Takaya(1981)^[5]曾在总结室内试验基础上，提出了雪花融化的数值模拟结果，他假定雪花是球形，定义雪花半径 R 的减小率 $\frac{dR}{dt}$ 为融化率，结果是融化率不仅依赖于融化层中温度，还依赖于相对湿度、雪花大小、雪花密度（和凇附程度有关）和下落速度。可见雪花融化是十分复杂的，受多个因子影响。

在本次个例中，根据飞机实际探测云中相对湿度近于100%（由机载温度表和露点仪决定）。因而雪花落入融化层就开始融化。那些小的、凇附弱的雪花先融化为液滴，与此同时，那些大雪花的枝叉也将融化为液滴，或和母体雪花脱离变成小的液滴，抑或扩展成水膜覆盖在母体雪花中心骨架上形成融雪。随着融雪加速下落（融雪落速大于同质量雪花落速），环境温度不断增高，融雪表面水膜不断增厚，雪花外形逐渐消失。最后，中心骨架全部融雪化为液滴，整个融化过程结束。由此可见，通常讲的融化层厚度实际上是指大的、凇附强的雪花完全融化的厚度，小的、凇附弱的雪花融化厚度是处于大雪花融化厚度之中的。

实测结果和上面分析是一致的。图1a是用机载粒子测量系统的二维降水粒子探头(2D-P)在负温层($T = -0.4^{\circ}\text{C}$)测得的雪花图象。图中1、2是标准完整的星状雪花，4是枝状雪花，3、5、6是它们碰连形成的雪团，这些雪花外形结构清晰。7、8是雪花撞冻云滴形成的霰、米雪和不规则粒子。

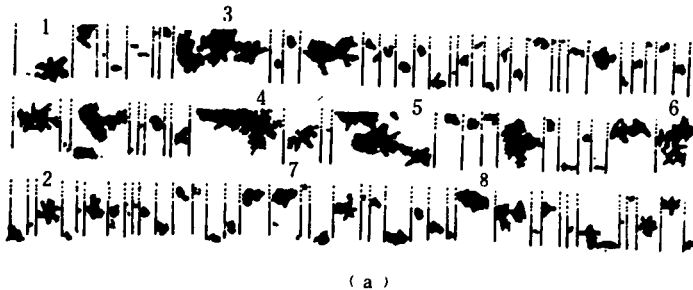


图 1a 在负温层($T = -0.4^{\circ}\text{C}$)中雪花二维图象

图中垂直方向标尺 1 厘米相当于 6.4 毫米 (下同)

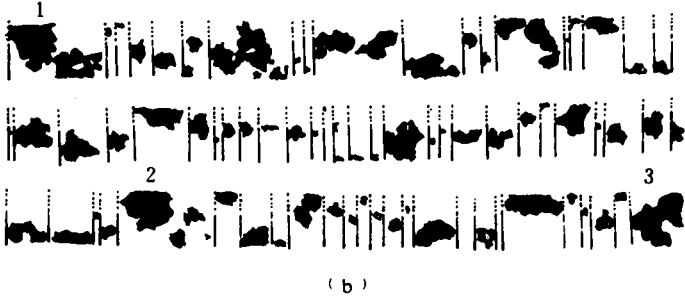


图 1b 融化层中($T = 0.8^{\circ}\text{C}$)融雪粒子二维图象

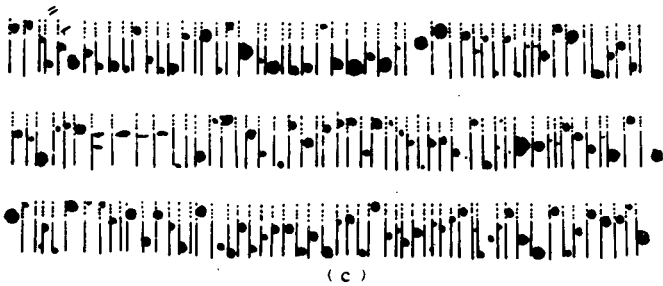


图 1c 融化层底部($T = 2.6^{\circ}\text{C}$)液滴二维图象

图1b是融化层中 $T = 0.8^{\circ}\text{C}$ 层中测得融雪粒子图象。枝、星状雪花枝叉已融化，雪花主枝和中心骨架已开始融化而被水膜覆盖变得圆滑，清晰的雪花外形已部分消失。

图2a是融化层中 ($T = 1.7^{\circ}\text{C}$) 由(2D-C)测得的融雪粒子和小液滴二维图象。图中7—9是已完全融化为液滴，其二维图象是光滑的圆形。1—6则是尚未完全融化的粒子，枝叉虽已全部消失，但二维图象光滑而不对称，表明中心骨架还未全部融化；它们可能是融化中的雪团(有二个以上的中心骨架)、抑或是碰并在一起的融雪，图中6明显可看出至少是三个融雪碰并在一起图象呈现三个突起。

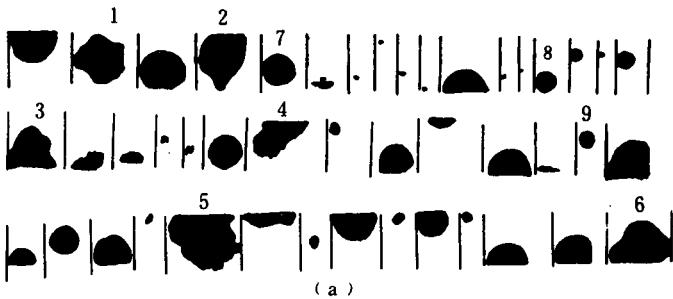


图 2a 融化层中($T = 1.7^{\circ}\text{C}$)融雪粒子二维图象

图中垂直方向标尺1厘米相当于0.8毫米。(下同)

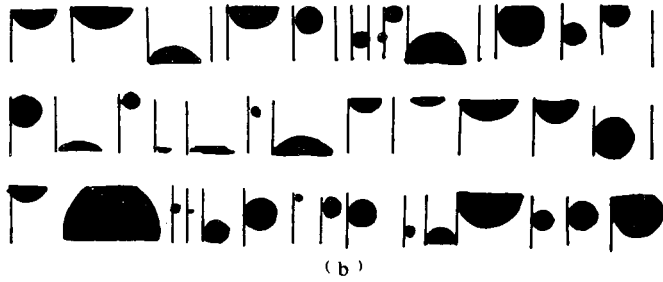
图 2b 融化层底部($T=2.6^{\circ}\text{C}$)液滴二维图象

图1c、2b是融化层底部 ($T=2.6^{\circ}\text{C}$) 由2D-P和2D-C测得的粒子图象。图中粒子二维图象表面光滑呈圆形，看不出有未融化的迹象。我们认为到此融化过程基本结束，即使大粒子中心残存有雪花中心骨架，在以后的融化过程中只是粒子图象收缩变小罢了。

由图1a、1b、1c、2a、2b确定的雪花融化层厚度、温度和Takay模拟计算结果基本相符，结果见表1。

表 1 枝、星状雪花融化层厚度和温度

资 料 来 源	雪花大小 (毫米)	融化层厚度 ΔH (米)	融化层温度 ΔT ($^{\circ}\text{C}$)
Takay ^{[5]*}	5—7	250—350	1.6—2.2
本文结果			
降水开始阶段	5.8	300	2.1
降水持续阶段	5.8	400	2.6

* 枝状雪花密度 $\rho = 0.04$ 克/厘米³

表1中降水开始和持续阶段的实测融化层厚度 ΔH 和温度 ΔT 不相等，可能是由于降水持续阶段雪花、融雪碰并较活跃，使融雪大小、落速增大，因而融化层厚度 ΔH 和温度 ΔT 增加。

三、融化层附近粒子尺度谱分布和微物理特征

融化层附近雪花、融雪、液滴尺度谱分布绘于图3。

用指数函数形式 $N = N_0 \exp(-\lambda D)$ 来拟合各瞬时实测谱。结果是融化层附近雪花、融雪、液滴尺度谱分布均能用指数函数形式来拟合，相关显著水平 $\alpha \leq 0.01$ ，见表2。

从表2看出，在降水开始阶段的雪花层中 ($-1.7^{\circ}\text{C} \leq T \leq 0^{\circ}\text{C}$)，雪花尺度谱分布

斜率 λ 变化范围不大，平均值 $\bar{\lambda}$ 亦小 ($\bar{\lambda} = \sum_{i=1}^P \lambda_i / P = 13.7$ 厘米⁻¹)，在融化层中 ($0 <$

$T \leq 2.1^{\circ}\text{C}$)， λ 变化范围扩大， $\bar{\lambda}$ 增大到27.4厘米⁻¹，比雪花层 $\bar{\lambda}$ 增加了一倍，而截距

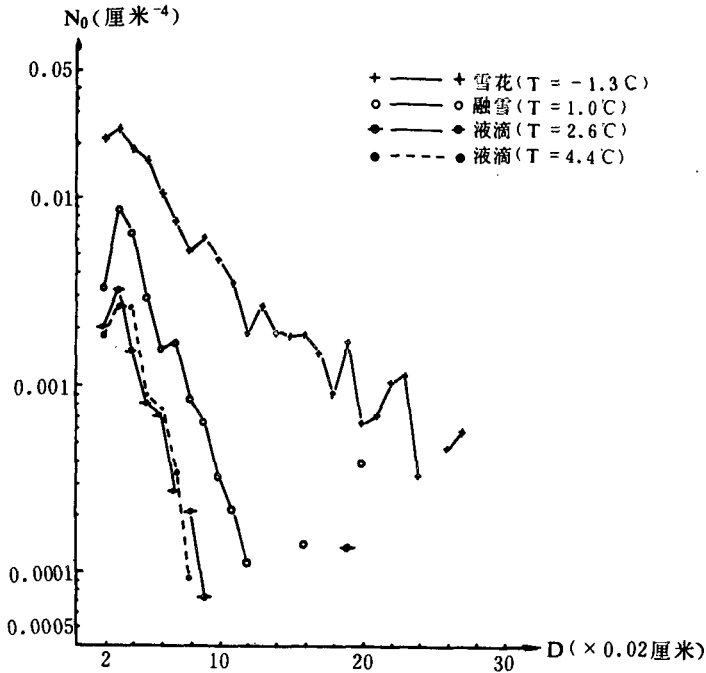


图 3 降水开始阶段粒子尺度谱分布

表 2 降水粒子尺度谱分布参数平均值及其变化范围

降雨阶段	粒子类型	温度范围 (°C)	资料组数 (P)	相关显著水平 (α)	N_0 (厘米 ⁻⁴)		λ (厘米 ⁻¹)	
					平均值 \bar{N}_0	变化范围	平均值 $\bar{\lambda}$	变化范围
开始	凇附枝、星状雪	-1.7-0	10	≤ 0.01	0.017	0.005-0.053	13.7	8.6-21.8
	融雪	0-2.1	18	≤ 0.01	0.017	0.007-0.031	27.4	20.5-41.5
	液滴	2.1-4.0	8	≤ 0.01	0.024	0.012-0.030	32.8	19.1-41.8
		4.0-5.1	11	≤ 0.01	0.026	0.019-0.038	31.8	28.8-35.8
持续	凇附枝、星雪、雪团	-1.7-0	35	≤ 0.01	0.015	0.004-0.061	11.8	5.9-18.5
	融雪	0-2.6	56	≤ 0.01	0.016	0.001-0.051	15.4	3.2-34.6
	液滴	2.6-4.0	10	≤ 0.01	0.029	0.012-0.056	31.6	18.8-41.9
		4.0-5.1	10	≤ 0.01	0.027	0.003-0.056	31.6	17.1-41.9

N_0 平均值 \bar{N}_0 两层相等, 可见雪花融化为融雪时尺度谱变窄变陡明显。融化层下液滴层 ($2.1 < T \leq 5.1^\circ\text{C}$) $\bar{\lambda}$ 、 \bar{N}_0 比融雪层大, 而其中 $2.1-4.0^\circ\text{C}$ 层和 $4.0-5.1^\circ\text{C}$ 层 $\bar{\lambda}$ 、 \bar{N}_0 接近, 这表明在液滴层尺度谱变化已达稳定阶段。

在降水持续阶段, 由于雪花、融雪碰并比较活跃, 融化层 $\bar{\lambda}$ 比雪花层 $\bar{\lambda}$ 稍大而不如降水开始阶段那样增大明显, 截距平均值 \bar{N}_0 两层接近比降水开始阶段略小。融化层下液滴层 ($2.6 < T \leq 5.1^\circ\text{C}$) $\bar{\lambda}$ 、 \bar{N}_0 比融雪层大, 而其中 $2.6-4.0^\circ\text{C}$ 层和 $4.0-5.1^\circ\text{C}$ 层 $\bar{\lambda}$ 、 \bar{N}_0

接近,表明雪花融化为液滴后粒子尺度谱比较稳定,而和降水开始阶段液滴谱分布平均参数亦相接近。

融雪、液滴谱分布变陡变窄一种可能机制是由于雪花在融化层中融化引起,因而谱分布参数与温度有关,为消除瞬时谱起伏的影响,用平均参数按指数函数 $\bar{\lambda} = \bar{\lambda}_0 \exp(KT)$ 、 $\bar{N}_0 = A \exp(BT)$ 进行拟合,在降水开始阶段 ($-0.8 < T \leq 3.3^\circ\text{C}$), $\bar{\lambda}_0 = 20.2$ 厘米⁻¹, $K = 0.24(^\circ\text{C})^{-1}$, 相关系数 $R = 0.98$, $A = 1.29 \times 10^{-2}$ 厘米⁻⁴, $B = 0.23(^\circ\text{C})^{-1}$, 相关系数 $R = 0.93$ 。而在降水持续阶段 ($-0.2 - 4.8^\circ\text{C}$), $\bar{\lambda}_0 = 7.6$ 厘米⁻¹, $K = 0.38(^\circ\text{C})^{-1}$, 相关系数 $R = 0.93$, $A = 6.50 \times 10^{-3}$ 厘米⁻⁴, $B = 0.41(^\circ\text{C})^{-1}$, 相关系数 $R = 0.81$ 。随着温度升高,液滴层中 $\bar{\lambda}$ 、 \bar{N}_0 与温度无关,如在降水持续阶段 $5.1 - 15^\circ\text{C}$ 层中 $\bar{\lambda} = 32.9$ 厘米⁻¹ 和 $2.6 - 5.1^\circ\text{C}$ 融滴层中 $\bar{\lambda} = 31.6$ 厘米⁻¹ 相接近。

观测结果表明,谱分布参数 N_0 、 λ 之间有某种正相关关系(见图4);谱窄时 N_0 大 λ 亦大,谱宽时 N_0 小 λ 亦小。若用幂指数关系 $N_0 = \sigma \lambda^\beta$ 来拟合,相关显著性水平 $\alpha < 0.01$ 。降水持续阶段各温度层中 σ 、 β 值列于表3。

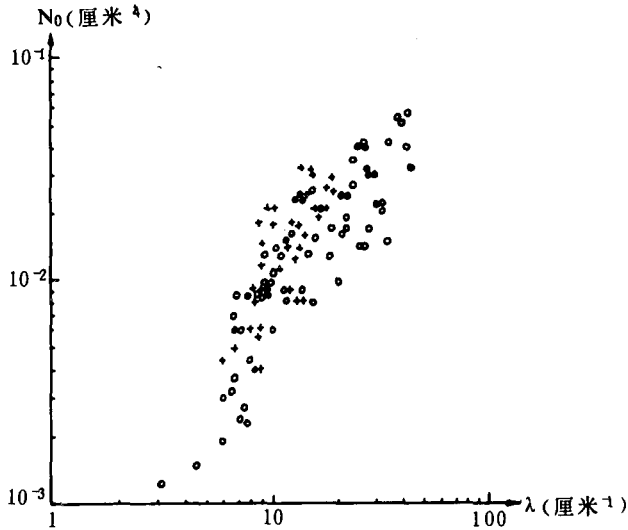


图4 降水持续阶段谱参数 N_0 、 λ 的点聚
 O 为 $0 < T < 5^\circ\text{C}$, + 为 $-1.7 \leq T \leq 0^\circ\text{C}$

表3 降水持续阶段 $N = \sigma \lambda^\beta$ 中参数 σ 、 β

观测层温度 ($^\circ\text{C}$)	资料组数	相关系数 R	σ (厘米 $^{\beta-4}$)	β
-2.0-0	47	0.74	4.23×10^{-4}	1.51
0-2.6	56	0.89	3.34×10^{-4}	1.38
5-22.0	98	0.80	8.0×10^{-5}	1.56

从表3看出,雪花、融雪、液滴参数 β 是接近的,而参数 σ 雪花和融雪相接近,液滴 σ 小,雪花、融雪 σ 是液滴 σ 的 3-4 倍。可见粒子融化不仅影响粒子谱分布参数大

小, 还影响参数间的数值关系。

由表 2 求出的各层平均参数 \bar{N}_0 、 $\bar{\lambda}$ 代入公式

$$\bar{D}_c = \int_{0.34}^{\infty} \bar{N}_0 \cdot e^{-\bar{\lambda}D} \cdot dD = 0.34 + \frac{1}{\bar{\lambda}}$$

$$\bar{N}_c = \int_{0.34}^{\infty} \bar{N}_0 \cdot e^{-\bar{\lambda}D} \cdot dD = \bar{N}_0 \frac{e^{-0.34\bar{\lambda}}}{\bar{\lambda}}$$

求得算术平均直径 \bar{D}_c 和平均数浓度 \bar{N}_c 列于表 4

表 4 平均数浓度、平均直径计算值和实测值比较

降雨阶段	温度范围 (°C)	平均直径 (毫米)		平均数浓度 (米 ⁻³)	
		\bar{D}_c	\bar{D}_R	\bar{N}_c	\bar{N}_R
开 始	-1.7—0	1.07	1.00	784	1428
	0—2.1	0.70	0.69	244	310
	2.1—4.0	0.64	0.64	240	261
	4.0—5.1	0.65	0.62	277	212
持 续	-1.7—0	1.19	1.09	831	1023
	0—2.6	0.90	1.19	559	569
	2.6—5.1	0.66	0.70	313	332

从表 4 看出, 除雪花数浓度外, 其它各温度层实测值 (\bar{D}_R 、 \bar{N}_R) 和计算值 (\bar{D}_c 、 \bar{N}_c) 符合较好, 最大相对误差小于 24.4%。雪花数浓度 \bar{N}_c 、 \bar{N}_R 差别大的原因主要是小的降水粒子空间起伏较大引起的, 因此用拟合的指数谱公式计算空间数浓度时应注意。

四、几点结果

1. 融化层附近, 雪花、融雪、液滴尺度谱均可用指数函数 $N = N_0 \exp(-\lambda T)$ 来拟合, 相关显著水平 $\alpha < 0.01$ 。雪花、融雪 N_0 平均值相近、液滴 \bar{N}_0 较大但无倍数差别。融雪和液滴 $\bar{\lambda}$ 明显大于雪花。

2. 在融化层 $\bar{\lambda}$ 、 \bar{N}_0 与温度呈指数相关关系。

3. 谱参数 N_0 、 λ 之间有幂指数关系, $N_0 = \sigma \lambda^\beta$ 雪花、融雪、液滴的 β 值相接近, 而雨滴值明显小于雪花和融雪, 可见融化层不仅影响谱分布还影响谱分布参数间的数值关系。

参 考 文 献

- [1] Ohtake, T., Observations of Size distributions of hydrometeors melting layer, *J. Atmos. Sci.*, 26, 545—557, 1969.
- [2] Houze, R. A., P. V. Hobbs., P. H. Herzegh., D. B. Parsons., Size distributions of precipitation particles in frontal clouds, *J. Atmos. Sci.*, 36, 156—162, 1979.
- [3] Lo, K. K., R. E. Passarelli., Jr., The growth of snow in winter storms: an airborne observa-

tional study, *J. Atmos. Sci.*, 39, 697-706, 1982.

- [4] Gordon, G. L., J. D. Marwitz., M. Bradford., Hydrometeor distributions in California rainbands, Conference on Cloud Physics. 207-210, Chicago, 1982.
- [5] Matsuo, T., Y. Sasyo., Melting of snowflakes below freezing level in the atmosphere, *J. Meteo. Sci. Japan*, 59, 10-24, 1981.

A CASE STUDY ON MICROPHYSICAL CHARACTERISTICS OF PRECIPITATION PARTICLES NEAR THE MELTING LAYER

Chen Wankui You Laiguang
(*Institute of Weather Modification, AMS*)

Abstract

The process of snow melting and the size distribution function of hydrometeors near the melting layer are described. The size distribution of snow, collapsed snow and raindrop can be fitted in with the expression of $N = N_0 \exp(-\lambda D)$ near the melting layer, the spectral parameters N_0 and λ are related to temperature, the relation between N_0 and λ , can be fitted in with the expression of $N_0 = \sigma \lambda^\beta$, parameter β is determined by hydrometeors.