

冰雪晶碰并勾连增长的实验与观测分析^{* 1}

黄 庚¹⁾ 苏正军¹⁾²⁾ 关立友¹⁾ 张纪淮¹⁾

¹⁾(中国气象科学研究院 中国气象局云雾物理重点开放实验室,北京 100081)

²⁾(南京信息工程大学,南京 210044)

摘 要

冰雪晶碰并勾连成雪花或雪团的过程是降水的重要机制之一。冰雪晶形态不同导致各类晶动力特性的差异,因此,无论从理论、数值试验还是室内模拟研究这一过程都有很大困难。该文就室内、外场试验和自然云的观测,讨论分析其发生机理和条件。结果表明:冰晶的增长过程有一个与云滴碰并增长相似的加速过程,冰晶碰并过冷滴形成霰(雹胚),淞附长成冰霰;冰雪晶相互碰并勾连、攀附增长为雪花或雪团,都是降水质点加速增长的重要过程。此过程仅在水面饱和、过饱和条件下发生,而水面欠饱和、无液滴(无云)时,冰晶很薄、晶型简单,无碰并勾连、攀附现象。冰晶在液滴存在的云雾中伴随气流对流、乱流运动中接触碰并勾连成雪花或雪团,其碰并勾连效率既受晶体形状影响,亦受晶体表面附着力的影响,其机制有勾连亦有粘连,晶型多样,以相同晶型为主,温度范围广(-3~-17℃);其中-13~-17℃碰并勾连效率最高,该层的枝、星状晶是勾连、攀附的主要区域,亦为冰晶繁生的主要区域、生长率最快,是人工增雨播撒人工冰核催化效率较高的温度段。

关键词: 冰雪晶碰并勾连;加速降水形成;室内、外试验

引 言

云由云滴组成,云滴直径一般为 2~200 μm,对流云可达 200 μm,层状云中的一些,160 μm 左右。在云生命期中,单凭凝结是不能增长到毫米量级雨滴的,要有碰并过程,但直径 < 50 μm 的滴碰并效率很低^[1]。据研究,含盐 10⁻¹³ g 的滴,5% 过饱和度下,由 20 μm 凝结增长到 40 μm 需 1.6 h,由 40 μm 到 60 μm 需 2.3 h,由 60 μm 到 80 μm 要 7.7 h,增长所需时间随滴直径增加,从云滴凝结增长到有效碰并到降雨似乎是很漫长的过程^[2]。然而人们常常观测到云在 1 h 内形成降水,有时 1~2 h 内就形成降雹,这归功于冰晶的出现、相变,通过贝吉隆过程,在冰晶浓度/水滴浓度为 1/1000 的封闭系统中,23 min 内冰晶能长大到 110 μm^[3],比凝结过程快得多。实验与外场观测发现,冰晶增长亦有一个与液滴碰并增长相似的加速过程,冰晶碰并液滴(过冷)形成霰,进而碰并过冷水滴长大成冰霰;冰晶间相互碰

并勾连、攀附,快速增长为雪花或雪团,如融化成毫米量级的雨滴,降水质点增长加快,加速降水进程。

人们早就注意观测研究冰雪晶间碰并勾连现象,认为它主要与温度有关,+1~-5℃是多发区,其机制主要是粘连,-12~-17℃次之,主要是勾连、攀附;晶型最多的是片状及辐枝状,还有针状成束晶^[4]。Farady 在 1860 年指出,0℃附近冰晶容易粘连是因为冰表面存在一层准液膜,这种准液膜使冰晶相互间存在附着力,Nakaya 和 Matsumoto 及 Hosler 等认为准液膜在 0~-25℃间存在,接近 0℃时附着力较大,Hosler 等发现,在冰面饱和和大气中,温度低于-25℃时,附着力就降为 0。随后很多学者用多种方法对该现象开展过研究,Kuczynski, Hobbs 和 Mason 等认为“准液膜理论”不能充分解释冰相粘连的机制,Hobbs 等人认为相接触的冰相的表面形成“冰桥”,主要是蒸凝过程所致^[1-2],等等。总之,冰雪晶的聚并或碰并勾连比水滴碰并更复杂,其受诸多难确定因素影响,如冰晶表面干湿程度、环境湿度、过冷水汽含量、冰晶形

* 国家自然科学基金项目(40205001)、“十一五”国家科技支撑计划重点项目“人工影响天气关键技术及装备研发”(2006BAC12B00)和中国气象局云雾环境开放实验室共同资助。

2006-03-03 收到,2007-01-11 收到再改稿。

状、下落速度、飘移状况及冰雪晶聚合体密度、落速、形状、尺度等都会影响聚并效率。冰雪晶碰并勾连的研究对自然降水(雪),尤其在人工引晶催化增雨中很有意义。

本文就室内实验和外场观测中冰雪晶粘连、攀附现象,分析讨论其形成的机理与条件。

1 室内试验中冰雪晶碰并勾连与繁生

1 m³ 等温云室高 1.76 m,内径 0.88 m。云室温度预先设定,自动调节,达到预置温度后可长时间保持,温度波动低于 0.1 °C。温度是用 3 个铂电阻,与标准温度表比对测量,其误差小于 0.1 °C。温度水平温差低于 0.4 °C,垂直温差低于 0.2 °C^[5]。云室的雾由超声雾化器产生,湿度、滴谱浓度可手动调节,实验中含水量一般维持在 1.0~1.5 g·m⁻³,雾滴平均直径 10~13 μm,雾滴浓度约为 500~800 个·cm⁻³;无液滴云时(冰面饱和),-3~-20 °C 时的相对湿度约为 82%~96%。在某温度下,注入人工冰核气溶胶粒子后自由活化、长大、重力沉降,落在载玻片上,模拟、观测冰晶增长、碰并勾连及繁生过程。水面饱和及过饱和条件下,重复实验多次,-3.5~-20 °C 时晶型基本固定(图略),晶型与温度、湿度的关系如表 1。用电镜扫描,试验焰剂粒子尺度为 0.013~

1.45 μm,其密度 $\rho=1.7 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,相应粒子数浓度: $N_i=1/(\pi D^3 \rho/6)$ (个/g) = $5.1135 \times 10^{17} \sim 3.6851 \times 10^{11}$ (个·g⁻¹),在 -3.5~-20 °C 范围内,观测到冰晶的数浓度为 $1.44 \times 10^8 \sim 2.50 \times 10^{15}$ (个·g⁻¹);冰晶直径多数在 50~70 μm,单位视野面积 $1.77 \times 10^{-2} \text{ cm}^2$,体积约 3.99~5.3 cm³,其冰晶数 1~197 个,冰晶浓度约为 0.2~49 个·cm⁻³。注样后 10~30 min 基本全部活化,从活化至观测到冰晶最快需 30 s,直径小于 40 μm,生长速率超过 $1 \mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,最快活化的晶型有星状、枝状(-13~-17 °C),六角板、扇形板状(-18~-20 °C)。如表 1,在 -3~-20 °C 温度范围实验中,碰并勾连现象主要发生在 -13~-17 °C 间的枝、星状冰晶,碰并勾连冰晶数与总冰晶数之比达 37%~52%,它们之间常常相互攀附、缠绕出现(图 1b)。即使单位视野的冰晶稀少亦如此(图 1a),与其他温度段冰晶不同,其他温度段的冰晶多为叠置(图 1c);其机制是勾连和攀附,碰并勾连冰晶形状相同,大小接近,尺度从 40 μm 到超过 100 μm,尺度低于 40 μm 和浓度低于 1 个·cm⁻³,碰并勾连几率很小。-7~-9 °C 的碰并勾连几率为 4%~10%, -10~-12 °C 和 -18~-20 °C 时都在 20% 以内,直径低于 40 μm 或长轴低于 50 μm 和浓度低于 3 个·cm⁻³,叠置的几率很小;低于 -7 °C 的针、片状冰晶数浓度小,无碰并勾连出现。

表 1 冰晶形状、碰并状况与环境条件的关系

Table 1 Shapes of ice crystal and aggregation varied with air conditions in the cloud chamber

在水面饱和及其以上			在冰面和水面饱和之间		
温度/°C	形成冰晶的形状	碰并勾连状况与比例	温度/°C	形成冰晶的形状	碰并勾连状况与比例
-3~-4	平板状				
-4~-6	针状		-4~-10	柱状	
-6~-10	圆柱状、柱状	叠置 4%~10%	-10~-20	六角薄板	
-10~-12	六角板、扇形板状	叠置 12%~20%			
-13~-17	星状、枝状	勾连 37%~52%			
-18~-20	六角板、扇形板状	叠置 11%~20%			

在无液滴(水面欠饱和)条件下,如图 1 d,活化冰晶小而薄,多为六角片,少量柱状,六角形多数看不到它的内部结构,形状、结构简单,相对湿度小(82%~90%),无蒸凝效应,无液滴蒸发的水汽来源,仅靠冰面过饱和至饱和的水汽供冰晶增长,长得慢,个体小,从几 μm 到 50 μm,下落末速在 $1.00 \sim 3.76 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$,相对速度小,空间数浓度少,难以相遇,在 -10~-20 °C 都未出现任何碰并、攀附现象。当(无液滴云)活化结束后缓慢增加湿气(目测无

雾),又能观测到冰晶,随湿度增加冰晶慢慢加厚,显现六角形内部结构并渐显丰富,六个角渐渐变长,加至云室雾重现时,六个臂发展成漂亮的枝状,又重现枝星状和碰并勾连现象(-13~-17 °C)。在某一负温下,温度的改变可以使人工冰核多次活化,湿度的改变使原本简单的柱状由实心变为空心,由短柱变长变成针状,湿度增加使简单的片状晶迅速长大成枝星状,产生碰并勾连攀附,可见湿度仅次于温度,是冰晶增长、碰并勾连的决定因子之一。

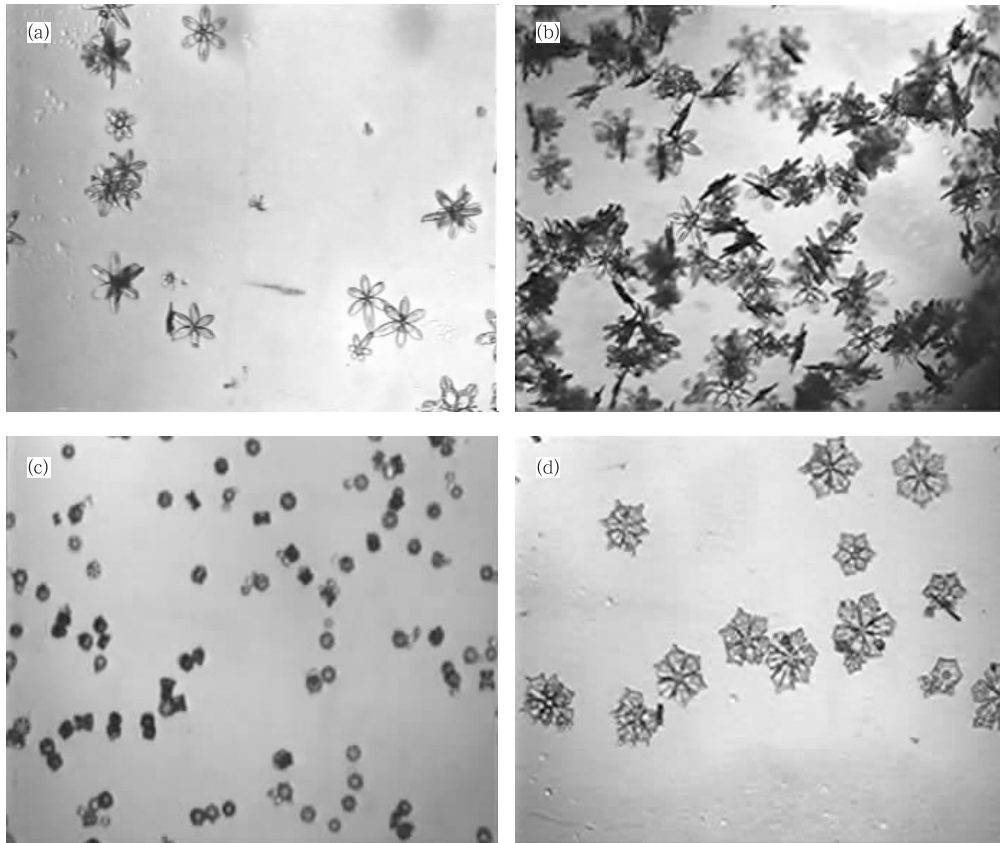


图 1 室内试验的冰晶(a,b 为碰并勾连的枝、星状晶,c,d 为其他形状极少粘连)

Fig. 1 Ice crystals in lab (a,b: aggregated with dendritic and stellar ones; c,d: seldom aggregated)

由于相变潜热释放影响,1000 hPa 时,冰晶的最大生长速率不在 $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 而是在 $-14.25\text{ }^{\circ}\text{C}$,500 hPa 冰晶的最大生长速率在 $-16.75\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[6],因此, $-13\sim-17\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度段冰晶生长速率最快,注入样气 30 s 可见冰晶,1 min 即发现相互攀附的小雪花;形成枝、星状晶枝杈、孔缕多,易于勾连和攀附;此外,勾连负重往往又容易折断,易于繁生,云室内都能看到折断的枝杈、碎片,若在自然云内,观测发现若考虑气流的冲击更易断裂,派生出其他形状或不规则的冰晶或霰^[7-8]。可见, $-13\sim-17\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围冰晶不仅生长速率最快,而且繁生快,如在此区域播入人工冰核,可能是人工增雨催化效率较高的温度段。

在高 14.8 m 的 96 m³ 中型云室中,温度水平温差 $\leq 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,垂直温差 $\leq 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$;云室内云雾通过超声雾化器产生,湿度、滴谱浓度可手工动调节,试验时含水量一般维持在 $1.0\sim 1.5\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$,雾滴平均直径 $10\sim 13\text{ }\mu\text{m}$,雾滴浓度 $500\sim 700\text{ 个}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。 $-5\sim-18\text{ }^{\circ}\text{C}$,播入碘化银焰剂后,活化时间可维持数小时,观测到粘连的针状、柱状、星状和辐枝状冰晶,晶型较 1 m³ 云室的多,主要差异是后者空间大,

对流、扰动亦较前者大,冰晶在冷雾中可维持数小时,接触机会多、时间长所致。

可见冰晶的碰并勾连攀附是受温度、湿度(过饱和度)、相对运动、数浓度、粒子尺度等因素制约的,可能与水滴碰并相类似,亦有一个阈值问题,如粒子尺度,冰晶的碰并勾连与云滴的碰并很相似,云滴直径在 $38\text{ }\mu\text{m}$ 以下很少碰并,冰晶在 $40\text{ }\mu\text{m}$ 以下亦很少碰并勾连;但由于试验条件限制,同时由于冰晶形状的复杂性和可变性引起的云动力学问题,还难以定量地测定和计算。在温度比较均匀等,无逆温层,扰动、对流小的云室内,冰晶碰并勾连、攀附主要由冰晶的形状决定。

2 冰雪晶碰并勾连增长的外场试验观测

2.1 外场液氮消雾冰雪晶的粘连

黄庚等曾参加首都机场液氮消过冷平流雾试验^[9-10]由 1997 年 12 月 17 日 20:00(北京时,下同)北京站探空层结资料可知,消雾前 54 m,293.4 m,464.6 m 高度处,相应温度分别为 $-3.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-5.0\text{ }^{\circ}\text{C}$, $7.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

逆温层顶高 464.6 m, 逆温强度 $5.8\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{hm}^{-1}$; 声雷达观测雾厚平均为 254.6 m, 最大需要超过 350 m。能见度 50 m (高速公路为 20~30 m); 地面风向 NNE; 风速 $3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; 北京 14 区县出现持续 48 h 气团性平流雾, 机场、高速公路关闭。18 日 05:50—07:13, 观测雾滴谱宽 $4\sim 46\text{ }\mu\text{m}$, 峰值直径 $6\text{ }\mu\text{m}$, 数密度 $975\sim 1515\text{ 个}\cdot\text{cm}^{-3}$, 平均 $1206\text{ 个}\cdot\text{cm}^{-3}$; 测站温度 $-4.5\sim -4.7\text{ }^{\circ}\text{C}$, 无冰晶, 东北转东南风, 风速为 $1\sim 2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。07:30 播撒作业后现场立即出现冰晶, 35 min 后下风方 4~5 km 的测站出现冰晶 (图 2a, b), 45 min 后见到小雪花 (图 2c), 50 min 时观测到大雪花 (图 2d)。随着雪花尤其是大雪花的出现、沉降, 能见度从 100 m 增加到 300 m。冰雪晶平均浓度 $0.13\sim 0.63\text{ 个}\cdot\text{cm}^{-3}$, 以柱状为主 (89%),

其尺寸: $40\times 27\times 20\sim 586\times 55\times 40(\mu\text{m}\cdot\mu\text{m}\cdot\mu\text{m})$, 有六角 (6.9%)、针状 (3.8%)、柱帽 (0.3%) 及不规则形状等。粘连成雪花主要是柱状, 此外有针状; 粘连的冰晶大小接近、形状相同。空心柱比例很大, 与庐山等地液氮催化试验结果一致^[8]。采样期间 (08:08~09:13), 测站温度 $-4.6\sim 3.1\text{ }^{\circ}\text{C}$, 风向 $170^{\circ}\sim 190^{\circ}$, 风速为 $1\sim 2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。18 日 08:00 54 m, 306.4 m, 464.6 m, 741.4 m 高度处相应温度分别为 $-4.6\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-7.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $2.0\text{ }^{\circ}\text{C}$, $5.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。此温度范围内空心柱的出现, 应为冰面过饱和度 $6\%\sim 10\%$, 针状对应的过饱和度更大, 约在 10% 以上, 达到水面饱和^[2]。

液氮常压汽化温度为 $-195.8\text{ }^{\circ}\text{C}$, 瓶装 900 g 的液氮喷出 (点源), 汽化膨胀, 距喷口 1 cm 处温度由起始的 $-132\text{ }^{\circ}\text{C}$ 升到 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 约 56 min, 播撒期间

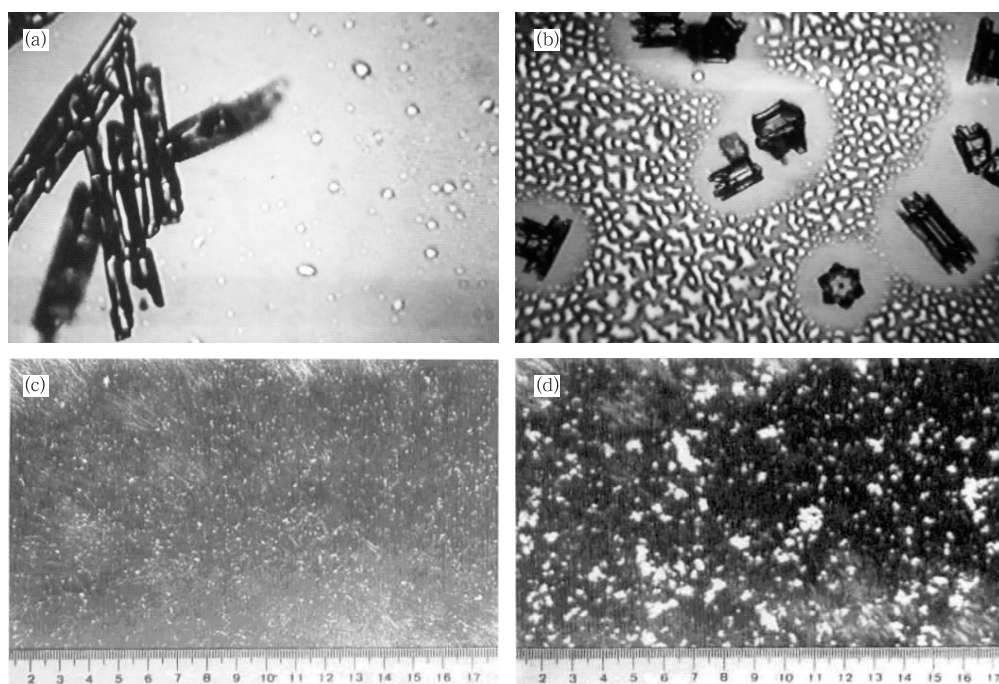


图 2 催化后出现冰雪晶 (a, b 为显微镜观测冰晶; c, d 为目测雪花)

ig. 2 Ice and snow crystals after seeding (a, b: observed with the microscope; c, d: observed with eyes)

容器皆低于 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, 56 min 内构成以容器直径为中心 ($-132\text{ }^{\circ}\text{C}$), 以 2~4 倍直径的椭圆、 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下自发核化的低温区域^[10-11], 液氮从高压瓶内喷出, 迅速汽化, 超低温形成局部超过饱和, 凝华核化形成的初始冰胚在 $-3.0\sim -8.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 环境的温、湿条件下, 长成柱、针状等晶型; 初始冰胚形成冰雪晶的胚心, 决定晶型主要是环境温度和湿度。在上风方, 强低温凝华核化的冰晶源 (线源, 系留气球携带滴播, 约高 30 m; 地面槽车压力喷撒, 喷高约 22 m), 随气流

向下游水平扩散的同时, 随相变潜热附加的浮力和辐合气流缓慢向上运动, 长大并趋向夹卷扩展^[12], 到达稳定层 (逆温层) 底时水平扩散, 此时温度较高 (正温), 冰晶表面碰并液滴, 在气流作用下相互粘连成雪花, 笔者在下风方 4~5 km 的民航楼顶 (约 20 m) 观测到播撒后形成的雪花从高空飘落而下, 从声雷达跟踪探测的辐合气流中也分析出此结果。

2.2 自然降雪中碰并勾连的冰雪晶

观测自然降雪是研究冰雪晶碰并勾连机理的另

一重要途径,图 3 是 2005 年 12 月 31 日和 2006 年 1 月 12 日的降雪天,把仪器置于野外直接观测资料,其中图 3a,3b 为显微录像,图 3c,3d 为直接照相。雪不大、雪花稀疏,观测点地面温度 -6°C 和 -4°C ,用载玻片取样,显微录像。采样时注意捕捉雪花,因此冰雪晶攀附、碰并勾连成雪花的比例较

高,占冰晶总数 78%,其中枝、星状相互攀附的占 51%,枝星状与六角片碰并勾连的占 27%;不碰并勾连的占 22%,其中枝星状占 3%,片、板状占 16%。从图 3c,3d 宏观拍摄的雪花亦可看出,雪花晶型以枝星为主,多数大小相近(图 3a),粘连其他晶型、粘连大小不一的冰晶是少数(图 3b)。

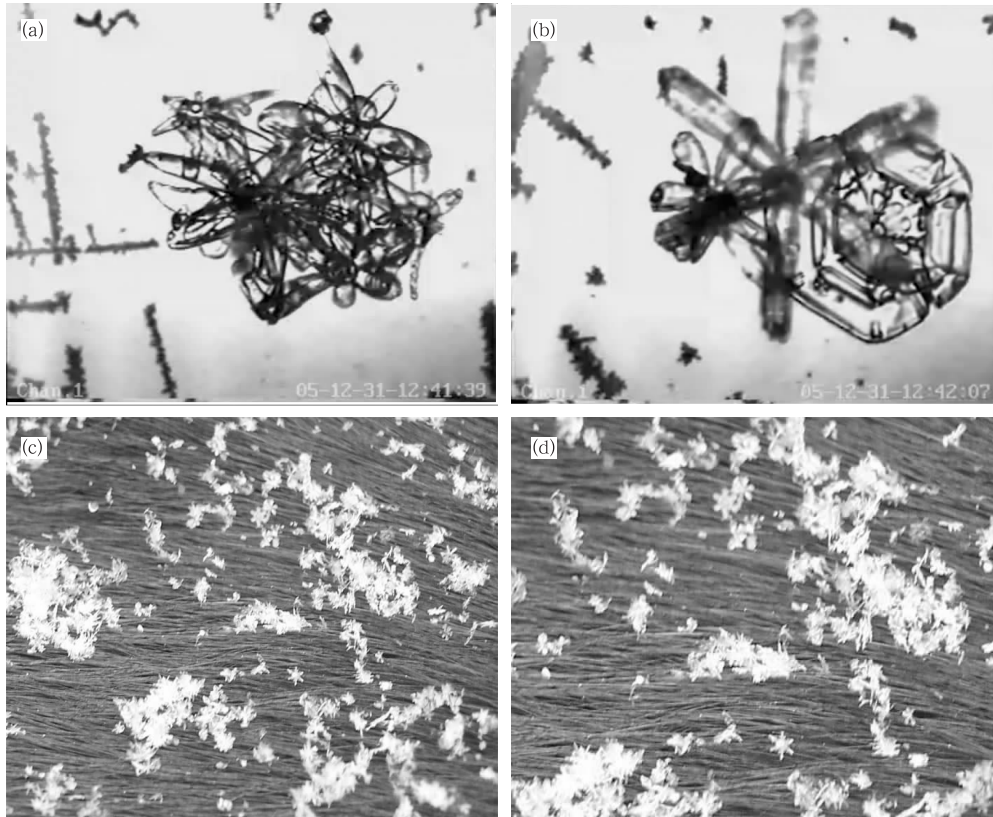


图 3 自然降雪的冰雪晶(a,b 为显微观测;c,d 为宏观观测)

Fig. 3 Snow crystals in natural snowfall (a,b: observed with the microscope, c,d: observed with camera)

游来光等在 1989 年对天山北侧低层冷云观测到冰晶碰撞攀附增长与凝华增长并重,冰晶浓度较高;在 $-12\sim-17^{\circ}\text{C}$ 层枝星状雪粒子谱迅速变宽,与此温度范围内枝星状雪强烈攀附过程观测结果一致^[12-13]。

陈万奎^[14]用机载粒子测量系统(PMS)对新疆冬季系统性降雪观测后认为,枝状冰晶碰撞攀附形成雪团;攀附冰晶数与总冰晶数之比变化于 0.8%~5.2%范围,主要出现于 $-3.0\sim-10.3^{\circ}\text{C}$ 的云层,使直径大于 3.3 mm 的雪团有所增加,而直径为 0.7~3.3 mm 的雪晶浓度明显减少,同时使直径为 18~340 μm 的冰晶浓度平均增加 35%(枝状冰晶碰撞碎裂繁生)。并曾在夏季用机载的 FSSP-100, 2D-C 和 2D-P 观测到融化层的粒子浓度高于上部 0

$\sim-6^{\circ}\text{C}$ 负温层约 3 倍,25~325 μm 的粒子浓度也略高于负温层,400~6400 μm 粒子浓度低于负温层约 1 倍,谱近似于正态分布,众数直径明显大于负温层,负温层的冰雪晶下落使层状云产生大云滴、毛毛雨滴,对暖雨过程的激发和维持产生影响。

郭金平^[15]统计了 11 架次 2D-C, 2D-P 对层状云观测资料,结果表明最易碰并勾连的枝、星状雪晶出现几率最高,达 35%,其中 $-4.5\sim-7^{\circ}\text{C}$ 发生占 2%, $-8\sim-10.8^{\circ}\text{C}$ 占 8%, $-11.0\sim-13.8^{\circ}\text{C}$ 的占 26%;柱状占 15%,柱束占 4%,针状占 5%,不规则形状占 11%,霰占 16%,淞附占 15%。

游来光等^[16]在 1984 年观测 2 次自然降雪,雪晶发生攀附、碰并勾连占总数的 34%;枝星状相互攀附频率为 21%,枝星与扇状的 32%,板状与扇状

的74%；攀附的雪晶少则2个，多至15个，尺度相近，枝星状的直径为620~6430 μm ，板、扇状的直径为80~1320 μm 。云中冰晶浓度4000个 $\cdot\text{m}^{-3}$ ，平均直径60 μm ；雪晶浓度700个 $\cdot\text{m}^{-3}$ ，平均直径1100 μm 。

外场观测与室内试验相比，自然云中碰并勾连成雪花的冰晶尺度大，数浓度小，晶型丰富多样，有枝、星、扇、板、片、柱、柱束、针等，主要由枝星状聚合而成，其机制是勾连、攀附和粘连，以相同晶型为主，在较广温度范围(1~-17 $^{\circ}\text{C}$)都可观测到。雪中晶型及其结构往往表征云的温度和湿度，亦表征云体的大小和湍流、对流的强弱，实验室内和几百米厚的雾中温度梯度小，聚成雪花的晶型相同，而自然云温湿条件的差异使其同时存在的晶型往往以某晶型为主粘连其他晶型，以枝星状最为常见。庞大的自然云体，温湿条件的差异使其同时存在不同晶型和液滴，云顶部往往是逆温层的底部，冰晶随气流对流受限而夹卷扩展，沿途碰并液滴、碰并勾连其他冰晶聚合增长为雪花，其历程时间越长，发生的晶型越丰富；其碰并勾连的温度与峰值，晶型及峰值因地、甚至因不同次的观测而异，当然观测的温度往往是捕获到雪花时的环境温度，并非冰雪晶发生碰并勾连、攀附的温度。因为枝、星状晶在水面饱和且在-13~-17 $^{\circ}\text{C}$ 时才出现，1~-12 $^{\circ}\text{C}$ 时可能是枝、星状降落到该高度的温度。-18 $^{\circ}\text{C}$ 以下，云内过冷云滴减少，晶型又不易勾连，亦很少观测到冰雪晶碰并勾连现象。

冰晶、冰雪晶之间的碰并勾连、攀附过程在云降水形成中非常重要。观测表明，冰雪晶碰并勾连聚集体——雪花是冬季中纬度的主要降水形式，即使夏季强对流云系，冰晶聚集体也是云内过冷层的重要降水形态。但冰雪晶碰并(连)可能比水滴碰并更复杂，其受诸多难确定因素的影响，如冰晶表面干湿程度、环境湿度、过冷水汽含量、冰晶形状、下落速度、飘移状况及冰雪晶聚集体密度、落速、形状、尺度等都影响碰并勾连效率。

3 小结与讨论

1) 冰雪晶相互碰并勾连、攀附增长为雪花或雪团是降水质点加速增长的重要过程。此过程仅在水面饱和、过饱和条件下进行，而在水面欠饱和、无液滴时，冰晶薄，形状、结构简单，无碰并勾连、攀附现

象。

2) 冰雪晶在有液滴存在的云雾中随气流对流、乱流运动中接触而碰并勾连成雪花或雪团，其碰并勾连效率既受晶体形状的影响，亦受晶体表面附着力的影响，其机制有勾连亦有粘连，碰并勾连的温度范围广(-3~-17 $^{\circ}\text{C}$)，晶型丰富多样，有枝、星、扇、板、片、柱、柱束、针等形状，以相同晶型为主；其中-13~-17 $^{\circ}\text{C}$ 的碰并勾连效率最高，此温度段枝星状晶生长率最快，既可勾连亦可粘连，碰并勾连效率高，也是冰晶繁生的主要区域，可能是人工增雨播撒冰核催化效率较高的温度段。

3) 冰晶的碰并勾连攀附与云滴碰并作用相似，加速了降水质点的增长，加快了降水进程，该过程受温度、湿度(过饱和度)、相对运动速度、数浓度、尺度等因素制约，可能与云滴碰并相似，也有一个阈值问题，如粒子尺度，冰晶的碰并勾连与云滴的碰并很相似，云滴直径在38 μm 以下很少碰并，冰晶在40 μm 以下也很少碰并勾连；但由于试验条件的限制，同时由于冰晶形状的复杂性和可变性引起的云动力学问题，还难以定量地测定和计算，有待进一步完善和试验研究。

参考文献

- [1] 王鹏飞, 李子华. 微观云物理学. 北京: 气象出版社, 1989: 198-199; 311-326; 336.
- [2] Mason B J. 云物理学//中国科学院大气物理研究所, 译. 北京: 科学出版社, 1978: 264-271.
- [3] 王永生, 盛裴轩, 刘式达, 等. 大气物理学. 北京: 气象出版社, 1987: 320.
- [4] 江祖藩, 印文建. 自然雾中液氮成冰扩散的研究//曹学成, 王伟民. 液氮人工增雨技术. 北京: 气象出版社, 1997: 42-46.
- [5] 苏正军, 关立友, 黄庚, 等. 一个用于催化剂成冰性能检测的新型等温温室//中国气象科学研究院. 第14次全国云雾降水物理和人工影响天气科学讨论会文集. 2004: 113-118.
- [6] 王鹏飞, 李子华. 微观云物理学. 北京: 气象出版社, 1989: 214.
- [7] 苏正军, 王广河, 刘卫国, 等. 青海省春季降水云的微物理特征分析. 应用气象学报, 2003, 14(增刊): 36-40.
- [8] 苏正军, 刘卫国, 王广河, 等. 青海一次春季透雨降水过程的云物理结构特征分析. 应用气象学报, 2003, 14(增刊): 27-35.
- [9] 黄庚, 关立友, 苏正军. 液氮消冷雾微结构的演变分析. 气象, 2006, 32(3): 27-31.
- [10] 曹学成, 许晓茂, 朱文治. 液氮载体的选择及其播撒装置的研究//曹学成, 王伟民. 液氮人工消过冷雾论文. 北京: 气象出版社, 1997: 155-159.
- [11] Pruppacher H R, Klett J D. Microphysics of Cloud and Precipitation. D Reidel Pub, Co, 1978.

- [12] 游来光,王守荣,王鼎丰,等. 新疆冬季降雪微结构及其增长过程初步研究. 气象学报, 1989,47(1):73-81.
- [13] 游来光,熊光莹,高明忍,等. 春季吉林地区层状云中冰晶的形成与雪晶增长特点. 气象学报,1965,35(4):423-433.
- [14] 陈万奎. 枝状雪晶碰撞攀附与折裂增生. 气象科学研究所院刊,1987,2(1):74-80.
- [15] 郭金平. 层状云冰雪晶二维图像分析//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, 1994:135-145.
- [16] 游来光,李炎辉,刘玉宝. 自然云中冰晶生成的核化过程及雪晶对过冷云滴的撞冻. 气象学报,1992,50(2):232-238.

Observation and Analysis of the Aggregation Growth Among Ice-snow Crystals

Huang Geng¹⁾ Su Zhengjun¹⁾²⁾ Guan Liyou¹⁾ Zhang Jihuai¹⁾

¹⁾ (Key Laboratory for Cloud Physics and Weather Modification, Chinese Academy of Meteorological Sciences, CMA, Beijing 100081)

²⁾ (Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044)

Abstract

The process of the ice-snow crystal running together plays an important part in origination of precipitation. It is a focus in cloud physics research. It discusses the cloud and fog that happens in lab and field observations. Result shows that as the droplets coalesce and grow, there is a speed up process also in ice crystals growth, such as snowflake, snow-circular, graupel and hail that coalesce super-cooled droplets and aggregate among ice-snow crystals. Experiments show, in the lab the shapes are fixed basically in temperature of -3.5 — -20 °C. The aggregate among ice-snow crystals only happens in saturated or super-saturated water level vapor pressure in the lab. While in insaturation (no liquid droplets) it does not happen. In 1 m^3 chamber their shapes are dendritic and stellar, and their aggregated mechanism is caught by branches appearing in -13 — -17 °C. While in 96 m^3 chamber the shapes are needle, columnar, dendritic and stellar, the mechanism is adhesion and adhering appearing in -5 — -18 °C. In field observations of natural cloud and fog, the mechanism of the ice-snow crystal running together is adhesion and adhering appearing in -3 — -17 °C, and their shapes are dendritic, stellar, sector, plate, tabular, needle, columnar and columnar bean.

The 1 m^3 chamber is 1.76 m high and 0.88 m wide, the experiment is made in -3.5 — -20 °C. The 96 m^3 chamber is 14.8 m high, 3.0 m wide, the experiment is made in -5 — -18 °C. The temperature is measure by three Pt resistance thermometers with the difference of 0.1 °C to compare with standards one. The sample that burnt for Silver Iodide pyrotechnic is made by deposit method. A great deal ice crystal aggregates into each other appearing in -13 — -17 °C in 1 m^3 chamber when the sample is exposed for 1 minute. But for other temperatures of -3.5 — -20 °C it does not. While in 96 m^3 chamber the aggregation process happens among ice crystals. Their sizes are lager than 1 m^3 , because the ice crystals could be maintained for a few hours, and there exists torrent and the ice crystal could move with air in 96 m^3 chamber.

In field observation, the measurement is made by PMS, 2D-C, 2D-P on aircraft in cloud, and by electronic microscope and the samples making for deposit on ground. The shapes of snowflake aggregation vary in cloud in nature because they could exist long in cloud and exhibit convective and torrent features. The ice crystal could interact with them. Another field observation is made by artificial dispersing fog by liquid nitrogen, and samples are measured by electronic microscope for deposit on ground. The ice-snow crystals running into snowflakes by the mechanism of adhering in -3 — -8 °C, and their shapes are hollow columnar, columnar and needle.

Key words: aggregate among ice-snow crystals; speed up process; experiment in lab and field