

冰雹云中微物理过程研究*

洪延超 肖辉 李宏宇 胡朝霞

(中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

P42 A

摘要 利用三维冰雹云模式通过实例模拟研究了云中冰相物理过程, 结果表明, 云中粒子产生有一源地, 在雹云发展阶段早期, 霰、冻滴、雹和雨水的极大产生率都位于 6.0 km 高度附近, 这里是雹胚及冰雹形成的源区, 从“利益竞争”概念出发, 人工防雹的催化部位应在此高度附近; 粒子产生高度与其源项发生高度及主要增长方式有关, 粒子产生和增长过程在云的发展不同阶段也是不同的。在冰雹形成过程中, 作为雹胚的霰和冻滴主要通过撞冻过冷水增长。撞冻增长占增长量的大部分, 云中存在丰富的过冷水对冰雹胚胎和冰雹形成, 增长都是十分重要的。在“冰晶-过冷水-雹胚-冰雹”这一链环中, 没有过冷水参与很难形成强烈降雹。通过两例雹云的对比研究, 发现若雹云云底温度降低和湿度增大, 由于霰撞冻过冷水尤其是撞冻过冷云水增长量大幅度提高, 霰的尺度加大, 提高向冰雹的转化率, 使霰胚数量大大增加。

关键词: 数值模拟; 粒子增长; 微物理过程链

1 引言

20 世纪 60 年代中期, 苏联宣称防雹能减少雹灾损失 70%~90%。Sulakvelidze 等^[1]提出了著名的冰雹形成的“累积带”理论。美国 1972 年执行的国家冰雹研究试验^[2]中, 采用苏联提出的催化原理和技术, 但只得到 7% 的防雹效果; 以后, 瑞士、法国和意大利又于 1977~1981 年在瑞士进行随机防雹试验^[3], 认为苏联的防雹原理和技术也不适合瑞士。探测表明只有极少数雹云含有大过冷雨滴。几十年来, 我国通过影响云微物理过程减少雹灾的催化技术也是基于“累积带”理论, 防雹效果也有争议。这说明冰雹形成的机理是复杂的, 我们还没有充分予以认识。人工防雹是十分复杂的科学问题, “累积带”理论并不普遍适用, 即使成功的催化防雹技术也不能简单地向另一地区推广。

因此, 即使在人工防雹工作已开展几十年的我国仍然需要重视和加强冰雹云中冰相物理过程研究, 尤其要研究“冰晶-过冷水-雹胚-冰雹”的过程链及这一链环中各种粒子的联系和相互影响, 在此基础上, 研究有效的雹云催化技术。

关于雹云中的微物理过程已有不少研究。如孔凡铀等^[4]利用三维冰雹云模式研究冰相微物理过程对雹云发展的影响, 冰相形成释放的潜热可使云体发展更加强盛; 甚至可以引起风暴动力结构和生命史的改变。胡志晋、何观芳^[5]用二维云模式研究了张家口地区的一例雹云的冰相物理过程, 指出雹胚主要是霰, 它起源于大量初生的雨滴, 并分析了冰雹和降水的形成过程。这些研究对深化雹云微物理过程的认识是有益的。本文在

2000-10-10 收到, 2001-04-09 收到再改稿

* “九五”国家攻关课题 (96-020-01-07) 和中国科学院大气物理研究所 2000 年创新重点项目共同资助

以前研究的基础上, 利用我们建立的先进的三维冰雹云模式^[6~8]进一步研究冰雹云中冰相物理过程及冰雹形成机制。模式的微物理过程中含有水汽、云水、雨水、冰晶、雪这些水质, 由于冰雹的胚胎主要有霰和冻滴两种类型, 还包含霰、冻滴和冰雹三种粒子, 而且粒子采用双变参数谱, 考虑了凝结(华)、核化、繁生、融化、碰并、自动转化、融化蒸发等物理过程。因此模式可定量计算雹胚的数量、预报粒子含水量和浓度, 适合研究雹云中的微物理过程和冰雹形成机制问题。

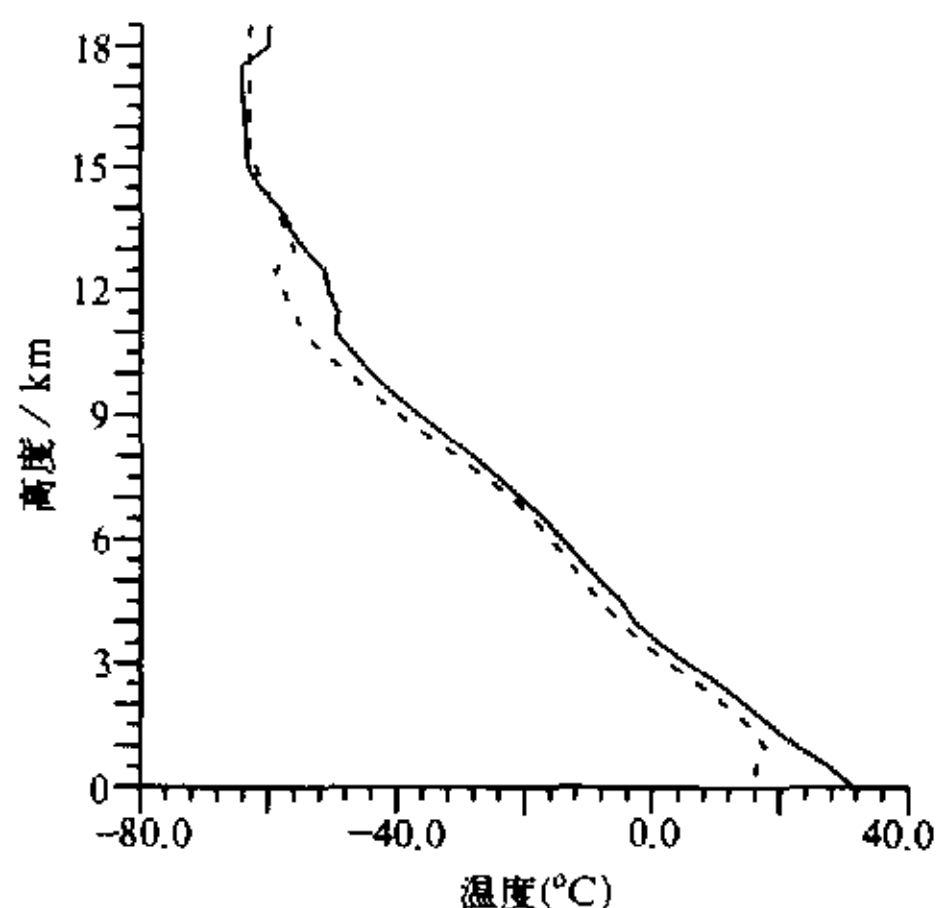


图 1 97708 (实线, 15:00) 和 97009 (虚线, 07:00) 雹云的环境大气的温度层结

模拟研究选择了两例雹云。第一例是 1997 年 7 月 8 日在陕西旬邑防雹试验区出现的, 称 97708 雹云, 0℃层高 3.5 km, 雹云顶高 12.0 km; 第二例是 1997 年 7 月 9 日在甘肃平凉防雹试验区观测的, 称 97709 雹云, 当地 0℃高 3.2 km, 雹云顶高 10.0 km。两例雹云温湿层结类似, 所不同的是 97709 雹云整层环境温度和云底温度比 97708 雹云低 3~4℃ (图 1), 低层比湿高些而高层比湿低些。比较而言, 97708 雹云云底“暖”些, 而 97709 雹云云底则“冷”些。

对 97708 雹云, 已做了数值模拟研究^[7]。研究了各种粒子产生和增长的物理过程、冰雹形成机制及催化防雹机制。本文在

此基础上进一步研究各种粒子产生高度和增长方式, 并与 97709 雹云比较, 研究云底温度降低对雹云中冰相过程链和成雹机制的影响。

2 97708 雹云中粒子产生源及其增长方式

雹云中粒子产生源位置, 尤其是可以转化成冰雹的霰粒子及冻滴的形成位置和增长方式对冰雹形成机制研究非常必要, 也是人工防雹催化技术研究的基础。

97708 雹云第 20 min 地面出现降水、降雹, 第 28 min 降雹强度和地面降雹动能通量达最大值, 第 55 min 降水结束。图 2 中, Q_i 、 Q_s 、 Q_g 、 Q_f 、 Q_h 、 Q_c 分别代表冰晶、雪、霰、冻滴、冰雹、云水 (见表 1), CL_{cr} 代表雨水收集云水的增长率。字母 u 指高层而 d 则为低层。从图 2 看, 在雹云发展早期粒子产生率只有一个极值, 冰晶、雪产生率极值高度分别为 7.0 km、6.5 km。在 12 min 之后, 冰晶和雪产生率出现两个极值, 高层冰晶极值高度 (u- Q_i) 在云发展过程中不断升高, 最后稳定在 10 km 高度, 而低层极值高度 (d- Q_i) 下降后稳定在 4.5 km 高度。雪的高层极值高度在 36 min 之前一直是上升的; 而低层极值维持在 5~5.5 km 高度。值得注意的是, 在雹云发展早期阶段 (约 20 min 之前), 霰、冻滴、雹的产生率只有一个极值且极值都位于 6.0 km 高度附近区域 (见图 2 中 Q_g 、 Q_f 、 Q_h 线)。可见这里是雹胚及冰雹形成的源区。24 min 后冰雹形成于 4.0 km 高度, 与霰、冻滴的低层极值高度差不多。此外, 4.0 km 高度一直是云水 (Q_c) 形成高度, 当雹云在地面产生了强降雹 (第 28 min) 后, 高层出

现产生云水的另一区域, 极值一直位于 10 km 高度。而雨水产生在 5.5 km 高度 (见图 2 中 CLcr 线), 于 16 min 后上升到 6.5 km 高度, 即 5.5~6.5 km 高度区是雨水产生源区。

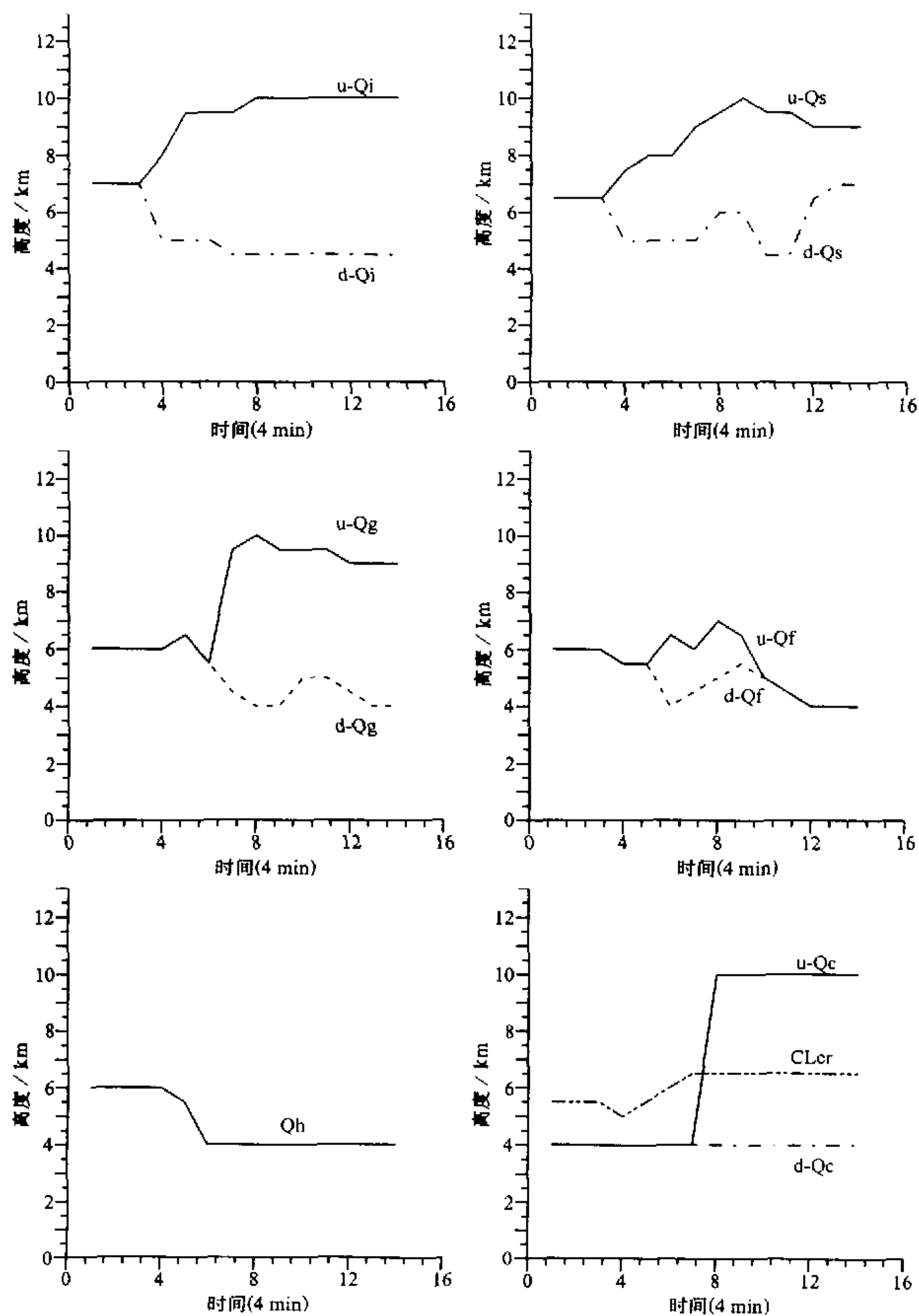


图 2 97708 雹云中冰粒子产生率极大值高度的时间变化

各种粒子质量产生率出现非零值的开始时间为:

冰晶 8 min; 雪 9 min; 霰 10 min; 雨滴 11 min; 冻滴 12 min; 冰雹 14 min

表 1 文中所用符号物理意义

符号	物理意义	符号	物理意义
Qc	云水	CLif	冻滴碰并冰晶和雪增长
Qr	雨水	CLii	冰晶自碰并
Qi	冰晶	VDvi	冰晶凝华增长
Qs	雪	VDvg	霰凝华增长
Qg	霰	VDvf	冻滴凝华增长
Qf	冻滴	CNis	冰晶自转化成雪
Qh	冰雹	CNsg	雪自转化成霰
NUvi	冰核化过程	CNfh	冻滴自转化成雹
NUrf	雨滴核化形成冻滴	CNgh	霰自转化成雹
Pci	冰晶繁生过程	TNh	冰雹总数量
CLris	极小雨滴与冰雪碰并冻结成雪	TNg	霰总数量
CLrf	雨滴与冰晶雪接触而冻结成冻滴	TNi	冰晶总数量
CLes	雪撞冻过冷云水增长	TNs	雪总数量
CLci	冰晶撞冻过冷云水增长	TNCNgh	霰自转化形成雹的总数量
CLcg	霰撞冻过冷云水增长	TNCNfh	冻滴自转化形成雹的总数量
CLrg	霰撞冻过冷雨水增长	TNCNig	冰晶自转化形成霰的总数量
CLrf	冻滴撞冻过冷雨水增长	TNCNsg	雪自转化形成霰的总数量
CLrh	冰雹撞冻过冷雨水增长	TNCNis	冰晶自转化形成雪的总数量
CLsh	冰雹碰并雪增长	TNNUvi	冰核化形成冰晶的总数量
CLgh	冰雹碰并霰增长	TNpci	繁生过程产生冰晶的总数量
CLfh	冰雹碰并冻滴增长	TNCLris	极小过冷雨滴冻结成雪的总数量
CLig	霰碰并冰晶和雪增长		

粒子产生高度与其源项发生高度及主要增长方式有关。现以 97708 雹云成雹关键时期中的第 16 min 各种粒子产生率的垂直分布 (图 3) 来分析。从图 3a 看, 各种粒子的产生在垂直方向上极值高度是不同的。尤其是冰晶 (Qi)、雪 (Qs) 和冰雹 (Qh) 产生的高度层次分明, 极值出现高度分别为 8.0 km、7.5 km 和 6.0 km, 雨水 (Qr)、冻滴 (Qf) 产生率达到云生命期中的最大值: 雨水为 537.8 t s^{-1} , 形成区域从 3.0 km 到 8.0 km; 冻滴为 462.4 t s^{-1} , 形成区域从 3.5 km 到 8.0 km。它们和霰、冰雹的极值高度都在 6.0 km。为什么 16 min 时冰晶产生率会出现高层、低层两个极值呢 (低层极值极小), 这与形成冰晶的两个物理过程发生高度有关。冰核化过程 (NUvi) 发生在 8~9.5 km 的高层 (图 3b), 而繁生过程 (Pci) 发生在 4.0~5.5 km 的低层, 产生率的极值高度分别为 9.0 km 和 5.5 km。此时冰晶主要通过凝华过程 (VDvi) 增长, 它们产生率的廓线 (Qi 和 VDvi 线) 几乎重合, 因此高低层冰晶的形成过程不同, 但增长过程相同。

雪的形成与冰晶有关 (图 3c)。首先冰晶自转化 (CNis) 可以形成雪, 它的质量产生率极值发生在 8 km 高层; 其次过冷极小水滴与冰雪晶碰并 (CLris) 冻结形成雪, 其产生率极值位于 7.0 km 高度, 在冰晶与雨水产生率极值高度之间, 是两种粒子共同作用之结果。虽然 CNis 过程对雪的质量贡献比 CLris 过程小, 但数量上的贡献要大得多, 此时 CNis 过程产生的雪有 10^{14} 个, 而 CLris 过程要小一个量级, 为 10^{13} 个。雪主要通过撞冻过冷水 (CLes) 增长, 极值产生率位于 7.5 km 高度, 这是雪与云水共同作

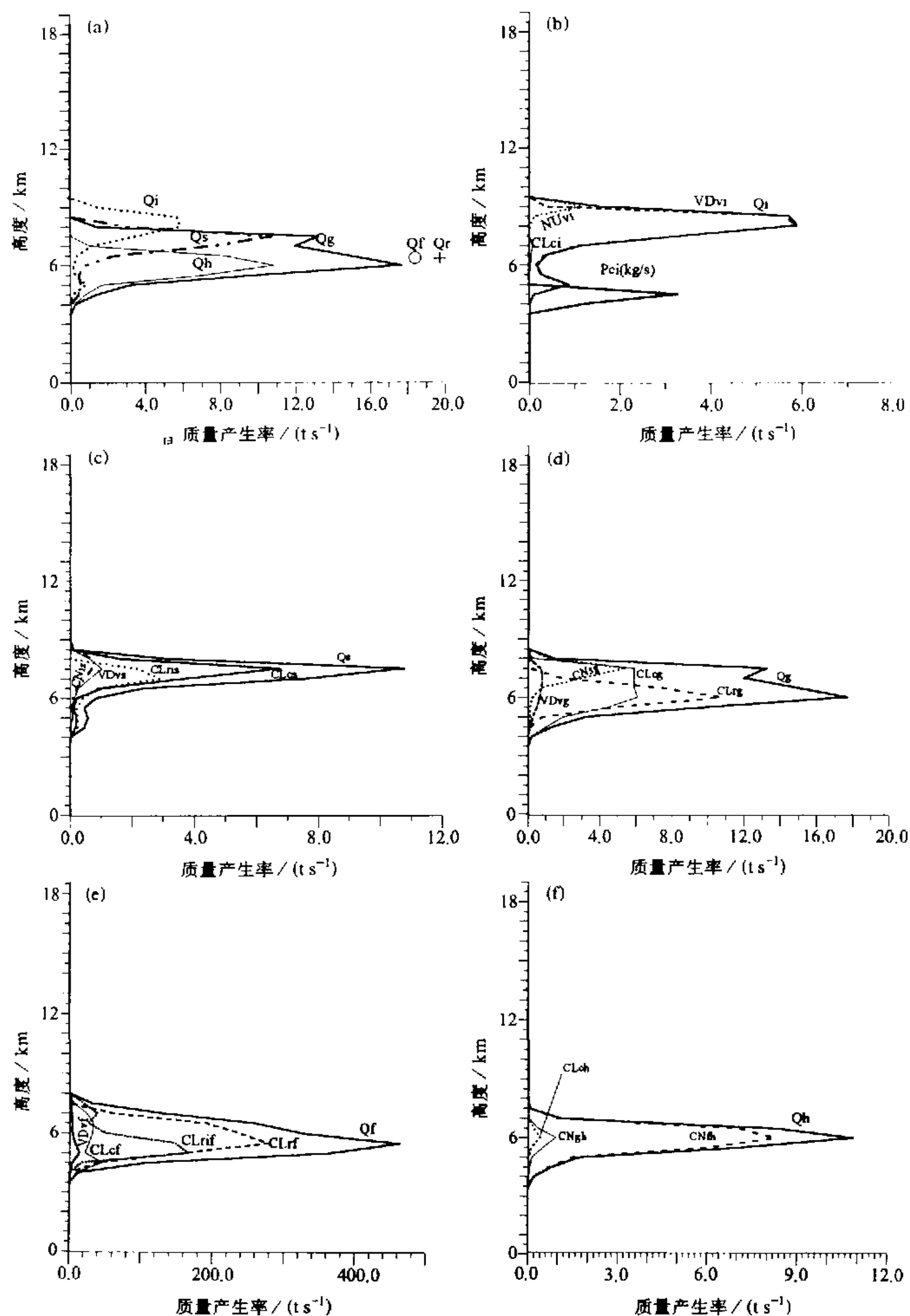


图3 第16 min时, 97708 雹云中粒子产生率 (a) 及其源项产生率
 [(b) 冰晶; (c) 雪; (d) 霰; (e) 冻滴; (f) 冰雹]随高度的分布
 (a) 中符号“○”和“+”指示冻滴和雨水产生率最大值的高度

用之结果。由于 CLcs 极值大, 其极值高度确定了雪的极值高度。雪产生率在低层的极值高度与冰晶的相对应, 它与 Pci 过程有关。

霰 (图 3d) 通过雪转化过程 (CNsg) 形成, 质量产生率很小, 产生率极值位于 7.5 km 高度, 与雪极值高度一致。但由于雨水产生率在 6.0 km 高度最大, 而霰又主要通过撞冻过冷雨水 (CLrg) 和云水 (CLcg) 过程增长, 因此 CLcg 和 CLrg 的产生率极值位于 6.0 km 高度, 进而霰极值也位于 6.0 km 高度, 其产生高度比冰晶、雪低。

冻滴 (图 3e) 由雨水冻结而成, 其形成高度很大程度上取决于过冷雨水产生高度。尽管冰晶和雪产生率极值在高层, 6.0 km 处都不到 1.0 t s^{-1} , 由于这里是雨水产生率极值高度, 极值达到 537.8 t s^{-1} , 仍有大量雨滴与冰晶和雪接触而冻结成冻滴 (CLrif)。这个高度上冻滴撞冻过冷雨水 (CLrf) 增长, 使冻滴质量产生率大为增加, 达到 462.4 t s^{-1} 。

冰雹 (图 3f) 主要由冻滴转化过程 (CNfh) 产生, 霰转化 (CNgh) 产生率很低, 而撞冻云水增长量也很小, 因此 CNfh 极值高度决定了冰雹之极值高度, 即为 6.0 km。由于冰雹刚形成, 产生率低, 撞冻增长率不高。

从第 16 min 时雹云中粒子产生源之位置与粒子形成过程来看, 可以认为粒子产生源所在高度与粒子形成和增长的主要物理过程有关。在此时刻雪的产生率极值高度比冰晶低, 是由于 CLris 过程与雨水有关; 霰和冻滴也是通过 CLrg 和 CLrf 过程增长的, 其极值产生率高度与雨水相同。冰雹产生率极值高度又通过冻滴间接与雨水发生关系。可见在雹云发展阶段, 过冷雨水是成雹之关键, 6.0 km 高度附近是雹胚及雹产生、增长的源地。

粒子产生和增长过程在云的发展不同阶段也是不同的。例如雪, 从质量上讲, 第 16 min 时 (图 3) 产生的主要过程是 CLris, 而增长主要过程是 CLcs; 24 min 时 (图 4a, 相对而言, CNis 是形成雪之主要过程, 凝华 (VDvs) 是主要增长过程; 到了 36 min 时 (图 4b), 雪几乎完全由 CNis 过程产生, 而高层 CLis、低层 VDvs 是主要增长过程, 撞冻云水增长已不是主要的。又如, 霰虽然形成仍通过 CNsg 过程, 但和 16 min 相比, 24 min 霰主要靠 CLcg 过程增长 (图 3c), 而不是 CLrg。冻滴也由 16 min 时以 CLrf 过程增长为主转变成靠 CLcf 增长 (图 3d), 而 VDvf 增长重要性增加。因为在云不同发展阶段, 发生的微物理过程不同。如 97708 雹云在消散阶段, 低层盛行下沉气流 (参考文献[7]图 2), 但高层仍存在中层入流—上升气流。虽然雨水产生率大大降低, 但高层冰晶、雪和源于雪的霰的产生率却都在加大 (如 16 min、24 min、36 min 时雪的产生率极值分别为 11.0 t s^{-1} 、 27.0 t s^{-1} 、 64.0 t s^{-1})。消散阶段, 暖云过程减弱, 必然使冰粒子撞冻增长率降低。

3 雹云中冰相过程和冷底雹云中冰雹形成机制分析

97708 暖底雹云中冰雹形成问题在文献[7]中已有细致研究, 在地面最强降雹和降雹动能通量达到最大值时间的前 3 min (25 min), 约 97% 以上的冰雹是以冻滴为胚胎的。为了分析 97709 冷底雹云的冰雹形成问题。图 5 给出两例雹云的对比资料。97708 雹云中, 冻滴向冰雹转化 (CNfh) 产生率明显比霰 (CNgh) 的大, 极值产生率达到

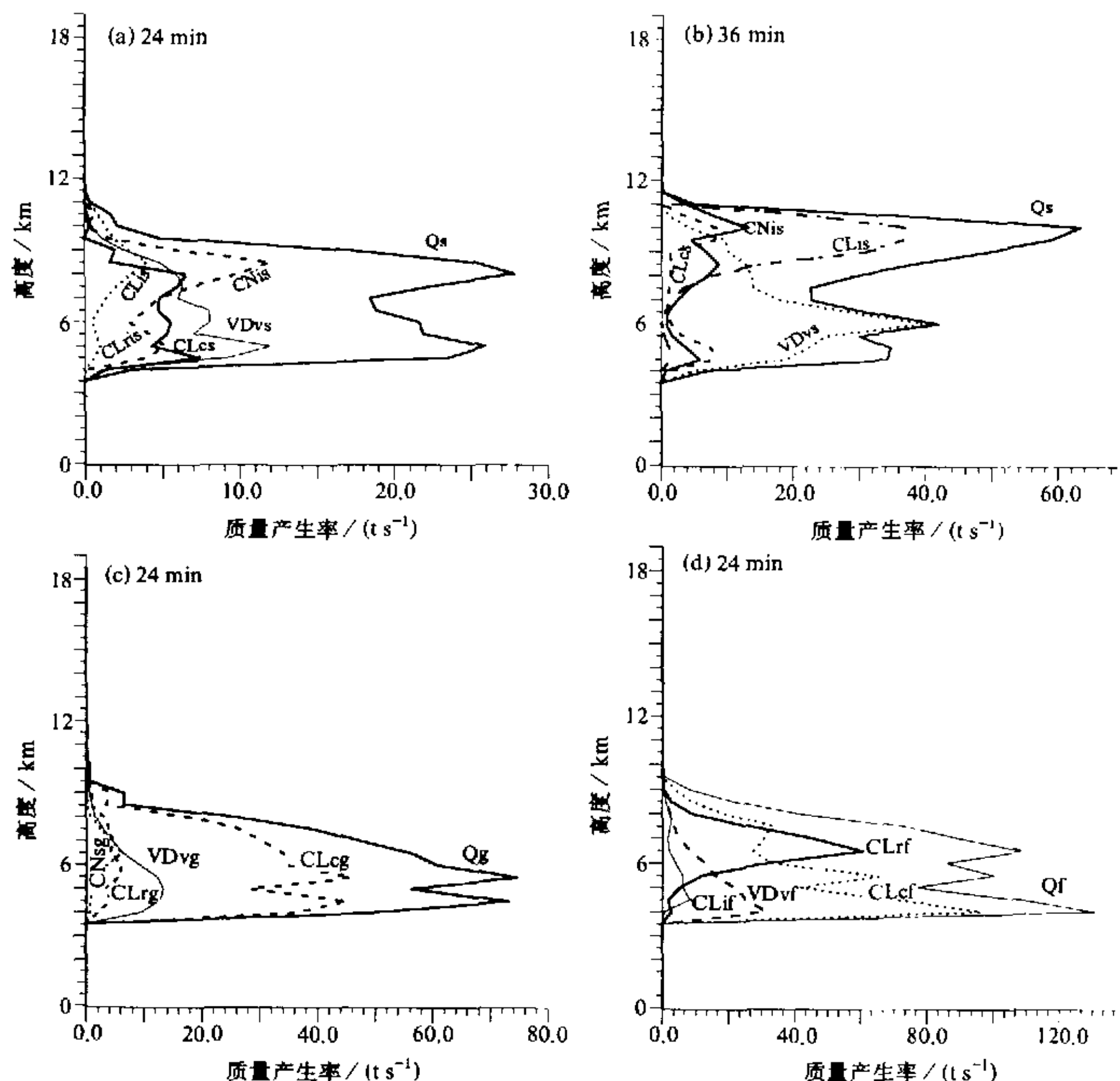


图4 97708 雹云中源项物理过程产生率的垂直分布
(a) 第24 min 雪; (b) 第36 min 雪; (c) 第24 min 霰; (d) 第24 min 冻滴

200 t s^{-1} , 而 CN_{gh} 只有 20 t s^{-1} , 且位于冰雹产生率极值时间之后 (图 5a)。和 97708 雹云相比, 97709 雹云发展环境的温度层结很类似, 只是不同高度的温度低 3~4℃, 低层比湿高些而高层比湿低些。从图 5b 看到, 相对而言, 霰向雹的转化率大为增加, 其峰值产生率达到 110 t s^{-1} 且出现时间与冰雹产生峰值时间一致, 说明 CN_{gh} 过程对冰雹产生起了作用。当然冻滴转化仍是冰雹形成的主要过程, CN_{fh} 过程极值产生率达到 215 t s^{-1} 。97709 模拟雹云地面最强降雹时间是 31 min, 地面降雹动能通量最大值达 4.0 $\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 比 97708 雹云的 2.0 $\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 大得多。据调查, 97708 雹云只产生 6 mm 左右的小冰雹, 而 97709 雹云产生的最大冰雹直径达 3 cm, 砸死了牛和羊。据计算, 在地面最强降雹出现时间前 3 min, 97709 雹云中霰胚占 31.3%, 冻滴胚占 68.7%, 即霰胚所占百分比比 97708 雹云的 3% 高得多。

为了研究云底温度降低对冰雹形成的影响, 我们用“归一化比较法”来分析这个问

题。所谓“归一化”，是计算两例雹云中每种冰相粒子质量占各种冰粒子总质量之比例（表中用百分比），再计算每种粒子源项过程产生的质量和数量占该类粒子的比例。用比例值代表该物理过程在冰粒子形成和增长中的作用大小。这样两例雹云就有同一个比较标准。将 97709 雹云和 97708 雹云相比，看各种冰相粒子及其源项产生的量的比例的变化，用向上箭头表示增加、向上双箭头表示增加很多，反之亦然。表 2 给出了两例雹云地面出现最强降雪前 3 min 各种冰粒子和它们的源项物理过程产生的质量总量和所占百分比的变化。

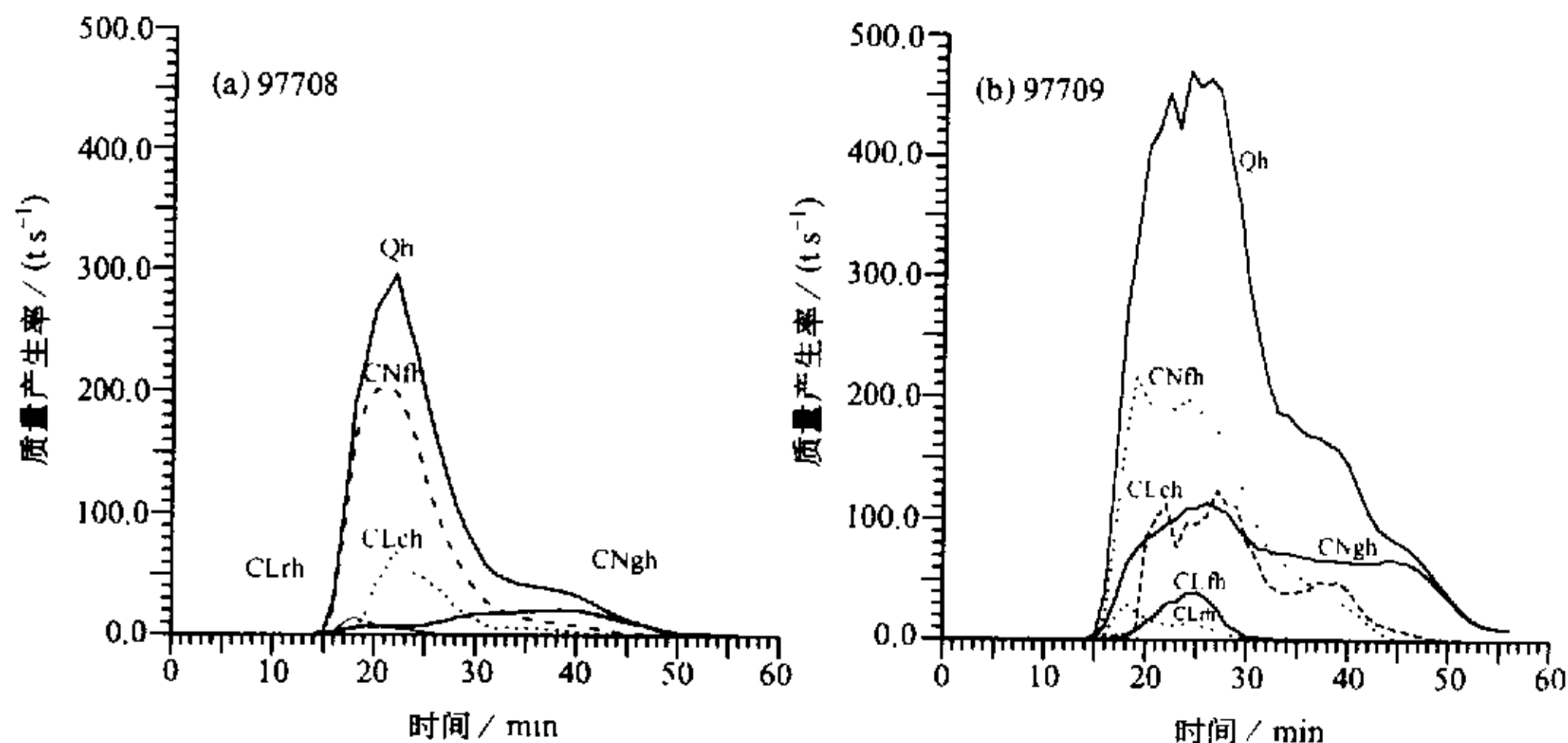


图 5 雹云中冰雹及其源项产生率的时间变化
(a) 97708 雹云; (b) 97709 雹云

表 2 和 97708 雹云相比，地面最强降雪前 3 min 97709 雹云各个微物理过程产生的总量（斜杠左边数据）所占百分比（斜杠右边数据）的变化

冰晶 ↑	NUvi* ↑ *	Pci(t) ↓ ↓	CLci ↓	VDvi [○] ↓			
86.4 / 6	3.1 / 4	$8.8 / 1.0 \times 10^{-2}$	1.5 / 2	81.8 / 95			
164.2 / 8	29.4 / 18	$7.1 / 4.3 \times 10^{-3}$	1.7 / 0.01	133.0 / 81			
雪 ↓	CNis* ↑	CLris* ↓	CLii(t) ↓	CLes [○] *	CLis ↑	VDvs [○] ↑	
94.9 / 7	18.0 / 19	34.1 / 36	$3.7 / 3.9 \times 10^{-3}$	19.1 / 20	4.3 / 4	19.3 / 20	
134.6 / 6	26.3 / 20	38.1 / 28	$1.0 / 7.4 \times 10^{-4}$	27.8 / 21	9.9 / 7	32.5 / 24	
霰 ↑	CNig ↑ ↑	CNsg* ↓	CLig ↓	CLeg [○] *	CLrg [○] ↑ ↑	VDvg [○] ↓	
147.1 / 11	$0.1 / 6.8 \times 10^{-2}$	14.8 / 10	14.2 / 10	84.1 / 57	14.2 / 10	19.6 / 13.3	
519.2 / 25	$0.4 / 7.8 \times 10^{-2}$	26.3 / 5	27.2 / 5	308.2 / 59	89.4 / 17	67.6 / 13.0	
冻滴 ↓	CLrif* ↓	NUrf ↑ ↑	CLif ↓	CLef [○] ↓	CLrf [○] ↑	VDvf [○] ↑	
923.3 / 66.3	178.0 / 19	$0.8 / 0.86 \times 10^{-4}$	22.1 / 2.4	282.6 / 30	359.7 / 39	80.1 / 8	
981.9 / 47	166.5 / 17	$1.9 / 0.19 \times 10^{-3}$	16.4 / 1.7	253.0 / 26	438.4 / 45	105.6 / 11	
冰雹 ↑	CNgh* ↑ ↑	CNfh* ↓ ↓	CLsh [○] ↓ ↓	CLch [○] ↑	CLrh ↑	CLgh ↑ ↑	CLfh [○] ↑
140.7 / 10	3.4 / 2.4	89.4 / 63.5	22.1 / 15.7	17.2 / 12.2	4.2 / 2.9	0.5 / 0.5	3.9 / 2.8
287.9 / 14	61.4 / 21.3	127.5 / 44.3	16.4 / 5.7	49.3 / 17.1	11.5 / 4.0	5.4 / 1.9	16.4 / 5.7

注：(1) 符号*表示主要产生过程，“[○]”表示主要增长过程。

(2) 表中代表总量数据除 Pci 和 CLu 外单位是 kt，上排是 97708，下排是 97709 雹云数据。

(3) CLig 和 CLif 中的 i 代表冰晶和雪。

3.1 云中的冰相物理过程

表 2 中给出两例雹云的数值模拟结果。利用表中雹云中各种物理过程产生的质量总量及它们所占比例分析各种冰粒子产生的主要过程。

(1) 冰晶几乎完全由冰核核化过程 NUvi 产生, 而通过凝华过程 VDvi 增长, 增长量占冰晶质量总量的 80% 以上。

(2) 雪形成有两个过程, 即冰晶转化 (CNis) 和冰晶与极小雨滴碰冻 (CLris) 过程。CLris 产生的雪质量比 CNis 大, 但数量上比 CNis 小得多。雪主要由冰晶转化形成, 数量上占 95% 以上。凝华和撞冻增长是雪增长的主要途径。

(3) 96% 的霰粒子由雪转化形成, 冰晶转化数量上比雪小两个量级。撞冻过冷水 (CLcg 和 CLrg) 和凝华增长是霰粒主要增长途径。撞冻增长量约为霰质量的 70% 左右, 因此, 没有撞冻过冷水增长霰很难长成为雹胚。

(4) 冻滴主要由受到冰雪晶接触扰动的过冷雨滴冻结而形成, 雨滴的核化是次要的。冻滴形成后也主要通过撞冻过冷水增长, 撞冻增长量约占冻滴质量的 70%。也就是说冻滴来源于过冷水仍通过撞冻过冷水增长。

(5) 霰和冻滴都可以通过撞冻增长而转化成冰雹。冰雹以收集过冷水增长为主, 但收集云水比雨水大得多, 撞冻增长占增长量的大部分。

3.2 云底温度降低和湿度增大对冰雹形成机制的影响

和 97708 雹云相比, 97709 雹云云底温度降低, 湿度增大。下面主要用表 2 中各个物理过程的比例的变化来分析云底温度降低和湿度增大对 97709 雹云冰雹形成机制的影响。

相比之下, 97709 雹云冰晶总量大为增加, 为 164.2 kt, 比前例雹云的 86.4 kt 大得多, 但所占冰粒子总质量比例也增大。冰核核化过程 (NUvi) 产生的总量和所占比例大为增加, 而凝华过程 (VDvi) 和撞冻过程 (CLci) 产生的总量所占比例下降, 这表明冰晶主要增长过程的相对增长量小些, 因此, 其冰晶平均尺度 0.20 mm, 比 97708 雹云的 0.25 mm 小些。于是冰晶向雪转化率 ($TNCNis / TNi$) 下降, 由 $2.54 / 10^3$ 下降到 $3.17 / 10^4$, 向霰转化率 ($TCNig / TNi$) 由 $6.17 / 10^6$ 下降到 $1.22 / 10^6$ 。

对于雪, 其所占各种冰粒子总质量的比例下降, 但绝对质量增加。CNis 过程比例上升表明, 在雪产生过程中, 冰晶转化相对作用在增大, 碰并增长比例也在加大。雪平均尺度与 97708 雹云差不多, 约为 0.57 mm。但由于其撞冻增长比例增加, 它向霰的转化率由 $6.0 / 10^2$ 增加到 $7.60 / 10^2$ 。

霰粒子不但总量明显增加, 从 147.1 kt 增加到 519.2 kt, 增加了 370 kt, 在冰粒子总质量中比例也增大, 从 11% 增大为 25%, 增幅在各种冰粒子中是最大的。霰撞冻过冷水增长量大为增加是霰质量增加和比例增大的根本原因, CLcg 产生量从 84.1 kt 增加到 308.2 kt, CLrg 从 14.2 kt 增加到 89.4 kt, 这两个过程增长量占霰总量的 77%。它们在两例雹云中所占霰质量的比例也增加, 尤其是 CLrg 比例增加更大些。

冻滴质量在各种粒子中仍是最大的, 达 981.9 kt, 且 66.5% 的冰雹是由冻滴转化形成的。和 97708 雹云比冻滴质量有所增大, 但形成冻滴的主要过程 CLrif 产生的质量和数量都减少, 所占总质量的比例下降, 冻结雨滴的平均直径也减小, 由 0.71 mm 变成 0.69 mm, 而雨滴核化 (NUrf) 份额加大。值得注意的是, 尽管 97709 雹云中冻滴质

量比霰大得多,但其撞冻云水 (CLcf) 增长量为 253.0 kt, 比霰的撞冻增长量 308.3 kt 小得多。97708 雹云中情况相反, CLcf 产生的质量比 CLcg 大得多。此外冻滴质量比 97708 雹云的大些, CLcf 过程产生量却在减小, 所占比例也减小, 但 CLcf 和 CLrf 仍是冻滴增长的主要物理过程。

和 97708 雹云相比, CNgh 和 CNfh 的产生量都在增加, 尤其是 CNgh 总量为 61.4 kt, 是 97708 雹云 3.4 kt 的近 18 倍。这一方面由于霰质量增加两倍多, 也由于霰向冰雹转化率提高, 由 $6/10^5$ 增加到 $50/10^5$ 。因此霰雹转化量占冰雹量的比例也显著增加。冻滴转化量虽有所增加, 但没有霰那样明显, 因此其比例下降。冰雹撞冻过冷云水 (CLch) 增长量最大, 所占比例也上升, 而 CLih 和 CLsh 比例都在减小。

下面对 97709 雹云中霰胚明显增多做一反序分析。

从表 3 知道, 97708 雹云中霰胚只占雹胚的 3.5%, 而 97709 雹云占 31.3%。这是因为雹云中有大量霰产生, 无论从质量还是数量上霰都大幅度增加, 数量上约是 97708 云的 1.9 倍 (表 3)。95% 以上的霰由雪的转化产生。从表 3 TNs 数据看, 97709 雹云中雪的数量也比 97708 雹云大得多, 约是它的 1.48 倍, 而霰约是它的 1.84 倍 (表 3 TNCNsg)。为什么 1.48 倍的雪能转换出 1.84 倍的霰? 是因为雪向霰的转化率提高了, 由 $6.0/100$ 提高到 $7.6/100$, 这是雪撞冻过冷云水增长量增大和所占比例上升所致。

表 3 雹云中粒子总数量及其相关物理过程产生的粒子数量
(用 10^x 表示, 其中 x 是表中数据。斜杠左边数据代表 97708 雹云, 右边代表 97709 雹云。)

冰雹	TNh(10^x)	TNCNgh(10^x)	TNCNfh(10^x)	Rgh(%)	Rfh(%)
	11.98274 / 12.25833	10.54046 / 11.75388	11.96677 / 12.09529	3.5 / 31.3	96.5 / 68.7
霰	TNg(10^x)	TNCNig(10^x)	TNCNsg(10^x)	Rig(%)	Rsg(%)
	14.76694 / 15.03629	13.34003 / 13.70924	14.75038 / 15.01534	3.7 / 4.7	96.3 / 95.3
雪	TNs(10^x)	TNCNis(10^x)	TNCLris(10^x)	Ris(%)	Rrs(%)
	15.96574 / 16.13486	15.94848 / 16.12588	14.55552 / 14.44528	96.1 / 98.0	3.9 / 2.0
冰晶	TNi(10^x)	TNNUvi(10^x)	TNPei(10^x)	Rvi(%)	Rci(%)
	18.55214 / 19.62460	18.55106 / 19.62453	15.94539 / 15.84856	99.80 / 99.98	0.2 / 0.02
转化率	P_{ab}	P_{ig}	P_{sg}	P_{gh}	
	$2.5 \times 10^{-3} / 3.2 \times 10^{-4}$	$6.17 \times 10^{-6} / 1.22 \times 10^{-6}$	$6.0 \times 10^{-2} / 7.6 \times 10^{-2}$	$5.9 \times 10^{-5} / 5.2 \times 10^{-4}$	

注: Rgh 和 Rfh 分别是霰和冻滴在雹胚中所占的百分比,

Rig 和 Rsg 分别是冰晶和雪向霰转化的数量占霰总数量的百分比,

Ris 和 Rrs 分别是冰晶自转化和极小雨滴冻结形成雪的数量占雪总数量的百分比,

Rvi 和 Rci 分别是冰核化化和繁生过程形成的冰晶数量占冰晶总数量的百分比,

P_{ab} 是自转化成 b 类型粒子的 a 类型粒子占本身数量的百分比 (下标 i、s、g、h 分别代表冰晶、雪、霰和冰雹)。

在 97709 雹云中, 霰的大量形成是霰胚显著增加的条件之一, 但云中适合霰增长的环境是它们是否能向冰雹转化的关键。在这样环境中, 霰粒子撞冻增长 (CLcg+CLrg) 量占霰总质量的 77%, 占增长总量的 80%。从图 4 可以看出, 在霰粒子的撞冻增长中, 以撞冻过冷云水为主, CLcg 过程质量产生率的峰值时间与霰的对应; CLrg 过程发生雹云的发展阶段, 虽然产生率没有 CLcg 那样高。但从图 5 看, 云中冰雹产生率最大值出现时间为 25 min, CLrg 产生率峰值出现在 15~20 min (图

6), 它对冰雹的形成起到重要的作用。和 97708 云比较, 由于撞冻增长, 霰粒子质量大为增加, 从 147.1 kt 增加到 519.2 kt, 平均尺度也从 1.06 mm 增加到 1.32 mm, 向雹转化率由 $6/10^5$ 增加到 $52/10^5$, 约大一个数量级。这是霰胚从 3% 增加到 31% 的主要原因。

综上所述, 若雹云云底温度降低, 大气低层湿度增大, 冰雹云中可能发生以下物理过程。

(1) 通过冰核化过程产生和凝华过程增长的冰晶量显著增加。

(2) 在雪产生过程中, 冰晶转化和撞冻增长作用加大, 它向霰的转化率提高。

(3) 霰通过雪的转化大量形成, 撞冻过冷水尤其是云水增长量大幅度提高, 使霰的尺度加大, 提高向冰雹的转化率, 使霰胚数量大大增加。

(4) 形成冻滴的主要过程 CLrif 产生的质量和数量都减少, 而雨滴核化份额加大。冻滴撞冻云水增长量减小而撞冻雨水增长的作用加大。但撞冻增长仍是冻滴增长的主要物理过程。

(5) 在冰雹形成过程中, 霰胚比例大大增加, 收集云水增长作用加大。

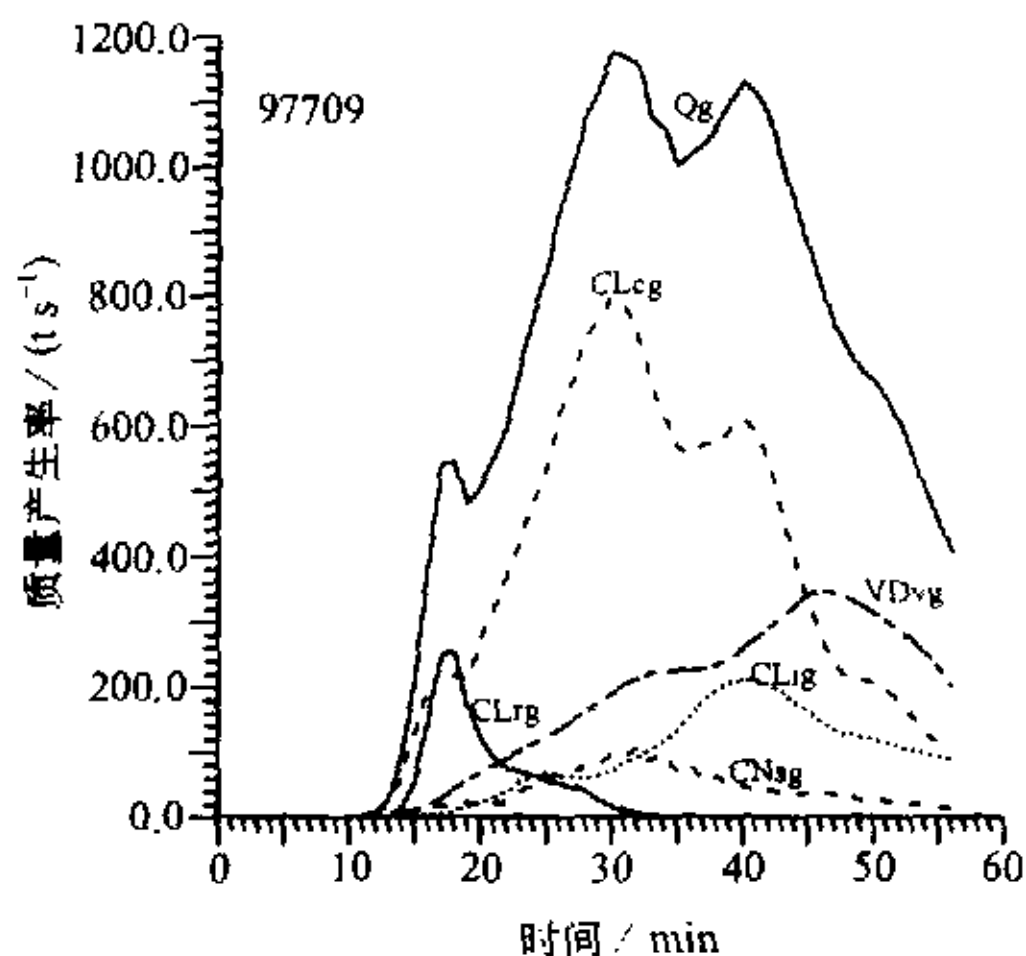


图 6 97709 雹云中霰及其源过程质量产生率的时间变化

4 讨论

根据以上分析, 冰雹云中粒子有各自产生的源地 (尤其在雹云发展阶段), 冰雹胚胎、冰雹的产生和增长也有一定高度, 了解这些对人工防雹催化作业技术十分重要。例如 97708 雹云, 6 km 高度附近是雹胚形成和撞冻增长的最佳高度, 从过量播撒概念出发, 催化部位应在此高度附近。事实上据文献[7]研究在 5.5 km 和 6.0 km 高度适时催化都可取得最佳效果。此外, 云内冰雹胚胎及冰雹产生高度变化较小。无论是冷底、暖底雹云, 云中存在丰富的过冷水对冰雹胚胎和冰雹形成、增长都是十分重要的。在“冰晶—过冷水—雹胚—冰雹”这一链环中, 没有过冷水参与很难形成强烈降雹。因为转化成雹胚的霰和冻滴的形成、增长都需要过冷水。冰雪晶的大量出现是形成雹胚的重要条件, 若无丰富的过冷水, 也就不会有大量雹胚形成, 即使有雹胚形成, 也很难靠凝华增长而成为冰雹。这只是通过两例雹云中冰相过程的分析所获得的初步看法, 我们还要对冰相过程链中的各个要素做详细的敏感性试验, 了解各个物理过程的相互影响及其作用。

参 考 文 献

- 1 Sulakvelize, G. K., N. S. Bibilashvet and V. F. Lapcheva, *Formation of Precipitation and Modification of Hail*

- Processes*, Press of Hydrometeorology, 1967.
- 2 Foote, G. B. and C. A. Knight, Results of a randomized hail suppression experiment in Northeast Colorado, Part I: Design and conduct of the experiment, *J. Appl. Meteor.*, 1979, **18**, 1526~1537.
 - 3 Federer, B., A. Waldvogel, W. Schmid et al., Main results of grossversuch IV, *J. Climate. Appl. Meteor.*, 1986, **25**, 917~957.
 - 4 孔凡铀等, 冰相过程在积云发展中的作用的三维数值模拟研究, 中国科学(B辑), 1991, 第9期, 1000~1008.
 - 5 胡志晋, 何观芳, 积雨云中微物理过程数值模拟(二) 阵雨、冰雹、雷雨的个例研究, 气象学报, 1988, **46**(1), 28~40.
 - 6 洪延超, 三维冰雹云催化数值模式, 气象学报, 1998, **56**(6), 641~653.
 - 7 洪延超, 冰雹形成机制和催化防雹机制研究, 气象学报, 1999, **57**(1), 30~44.
 - 8 孔凡铀, 黄美元, 徐华英, 对流云中冰相过程的三维数值模拟 I. 模式建立及冷云参数化, 大气科学, 1990, **14**(4), 441~453.

Studies on Microphysical Processes in Hail Cloud

Hong Yanchao, Xiao Hui, Li Hongyu and Hu Zhaoxia

(Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract Microphysical processes in hail cloud are studied by simulations of a 3-D hail cloud numerical model. The results indicate that each kind of ice particles has its generation zone and growth zone in the cloud. In a developing stage of the hail cloud maximum production rates of graupel, frozen drop, hail stone and rainwater are all situated in the vicinity of 6 km height, the hail embryo and hail generation zone. From the "benefit competition" concept, the optimum seeding position for hail mitigation should be located there. Processes of the particle generation and growth in the different developing stages of cloud are different. In hail formation, growth of graupel and frozen drop as hail embryo is mainly by the accretion processes. The growth amount by the accretion occupies the most part of the total growth amount. Plenty of supercooled rainwater is very important in the formation and growth of hail embryos and hailstones. In the chain of "ice crystal-hail embryo-hailstone", if there is not supercooled water, strong hailstone shooting would not occur. A contrast study of two observational hail clouds shows that when the temperature declines and humidity raise at the cloud base, the quantity of graupel embryo increases greatly because the amount by the accreting to supercooled water, especially cloud water, is increased by a wide margin, the size of graupel is increased, and the conversion rate of graupel to hail is raised.

Key words: numerical simulation; particle growth; chain of micropysical process