

青藏高原东部冰雹形成机理的数值模拟

胡朝霞^{1,3} 齐彦斌² 郭学良¹ 洪延超¹

1 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

2 吉林省人工影响天气办公室, 长春 130062

3 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 利用中国科学院大气物理研究所发展和改进的三维冰雹云模式, 对青藏高原东部甘肃省玛曲县的一例冰雹云过程进行了模拟研究。结果表明: 玛曲冰雹云中冰雹胚胎以霰胚为主; 在地面降水中, 固态降水占降水总量的46%, 而霰占固态降水的65%, 霰主要靠撞冻雨水和云水增长; 雹云中存在较弱的过冷雨水累积带, 累积带的维持时间也很短, 累积带中的过冷雨水有利于雹块的增长, 但不起主要作用; 雹块的增长主要是通过雹撞冻云水, 其次是撞冻雨水增长。

关键词 冰雹云模拟 过冷雨水累积带 冰雹形成机制

文章编号 1006-9585 (2007) 01-0037-12 **中图分类号** P458 **文献标识码** A

Numerical Simulation of Hail Formation Mechanism in East of the Tibetan Plateau

HU Zhao-Xia^{1,3}, QI Yan-Bin², GUO Xue-Liang¹, and HONG Yan-Chao¹

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

2 *Jilin Weather Modification Office, Changchun 130062*

3 *Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*

Abstract Using a 3D cloud model developed and improved by Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, a hailstorm occurring in Maqu County, Gansu Province in east of the Tibetan Plateau, is simulated. The model results show that the hail embryos are mainly graupel particles. Solid phase precipitation accounts for 46% of ground precipitation amount and graupel-fall is 65% of solid phase precipitation. Graupel particles grow by accretion with rainwater and cloud water. Accumulation zone of supercooled water is present in this hailstorm, however, it is very weak and its maintain time is short. The supercooled raindrop in the accumulation zone is favorable to hailstone growth, but it does not play a main role. The hailstones grow mainly through collection cloud water and accretion with graupel, and secondly accretion with rainwater.

Key words hailstorm simulation, accumulation zone of supercooled raindrop, hail formation mechanism

1 引言

冰雹是一种强对流天气过程的产物, 经常会

造成严重的自然灾害。关于冰雹的研究工作已有很多, 但由于冰雹形成的复杂性和局地性, 应用新的雷达探测手段、数值模拟等方法进行冰雹云的研究工作一直在持续开展^[1~5]。

收稿日期 2006-03-27 收到, 2006-10-20 收到修定稿

资助项目 中国科学院重要方向性项目 KZCX3-SW-225 和国家自然科学基金资助项目 40333033、40475005

作者简介 胡朝霞, 女, 1966 年出生, 硕士, 副研究员, 主要从事云和降水物理及人工影响天气研究。E-mail: huzx@mail.iap.ac.cn

青藏高原是我国冰雹最频繁的地区之一。1970年,青海省气象局在青海高原东北部地区建立了防雷试验区,从那时就开始了高原地区的冰雹研究。试验研究中利用了711雷达、加密探空等技术装备和探测方法并收集雹块进行测量分析。在冰雹微物理研究、冰雹的统计特征、冰雹云的雷达识别以及冰雹预报等方面取得了不少成果^[6]。但用三维强对流云(雹暴)模式,进行青藏高原冰雹研究的工作并不多。

随着计算机技术的迅速发展,20世纪90年代初,中国科学院大气物理所建立了考虑详细微物理过程、采用体积水参数化方案的三维冰雹云模式^[7,8]。利用该模式进行了冰雹云累积带和冰雹形成机理的模拟研究^[9,10]。之后,还建立了三维冰雹分档的强对流云模式,讨论了冰雹的循环增长机制^[11]。康凤琴等^[12]用此冰雹分档模式研究了青藏高原东北边缘冰雹的形成机理。

本文应用三维冰雹参数化模式^[10],模拟研究了1999年7月12日青藏高原东端,甘肃省玛曲县的一例冰雹云过程,分析了冰雹云中的过冷雨水累积带情况及冰雹形成机理。

2 玛曲冰雹云概况

玛曲位于青藏高原的东端,甘肃省的西南部,海拔高度为3 473 m,年降雹日为12.3 d^[13]。1999年7月1~20日在青藏高原河曲地区进行了

为期20 d的人工增雨科学试验。试验期间,玛曲县站的711雷达进行了加密观测,地面雨量观测点8个,边界层低空探空点1个,地面雨滴谱收集点1个,同时红源探空站每日13时加放探空1次。

1999年7月12日在玛曲发生了一次降雹过程(简称MQ99712雹云),24 h地面实测降水量超过20 mm,观测到此次降水以软雹为主,最大雷达回波强度55 dBZ。图1是该例雹云的环境温度廓线与风廓线,玛曲环境风以西风为主,距地面9~10 km之间达最大值 $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,垂直切变强。该例冰雹云云底温度为 $3.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$,属冷云底雹云, $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 层高度较低,位于距地面2.5 km处。

3 玛曲冰雹云的数值模拟

由于玛曲没有探空,因此利用7月12日玛曲南部约60 km的红源站13:00(北京时,下同)的加密探空经过底层订正后作为模式输入量^[14],并采用湿热泡方式启动,模拟时间为60 min。图2是不同时刻模拟的雷达回波,模拟到第17 min时出现雷达回波,第25 min时出现及地回波,回波中心为45 dBZ,此后降水范围不断扩大,最大雷达回波在第30 min时达到60 dBZ,此后云体逐渐减弱。

3.1 冰雹云累积带

MQ99712雹云模拟到第18 min时云中

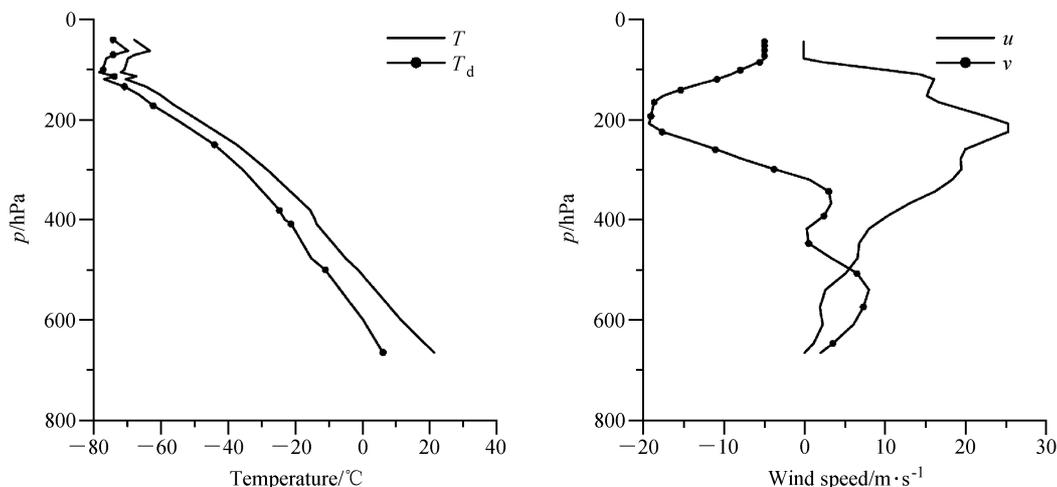


图1 MQ99712雹云 (a) 环境温度廓线与 (b) 风廓线 (T : 温度, T_d : 露点温度, u : 纬向风; v : 经向风)

Fig. 1 Temperature (T), dewpoint temperature (T_d) and wind profile (u : latitudinal, v : lognitudinal)

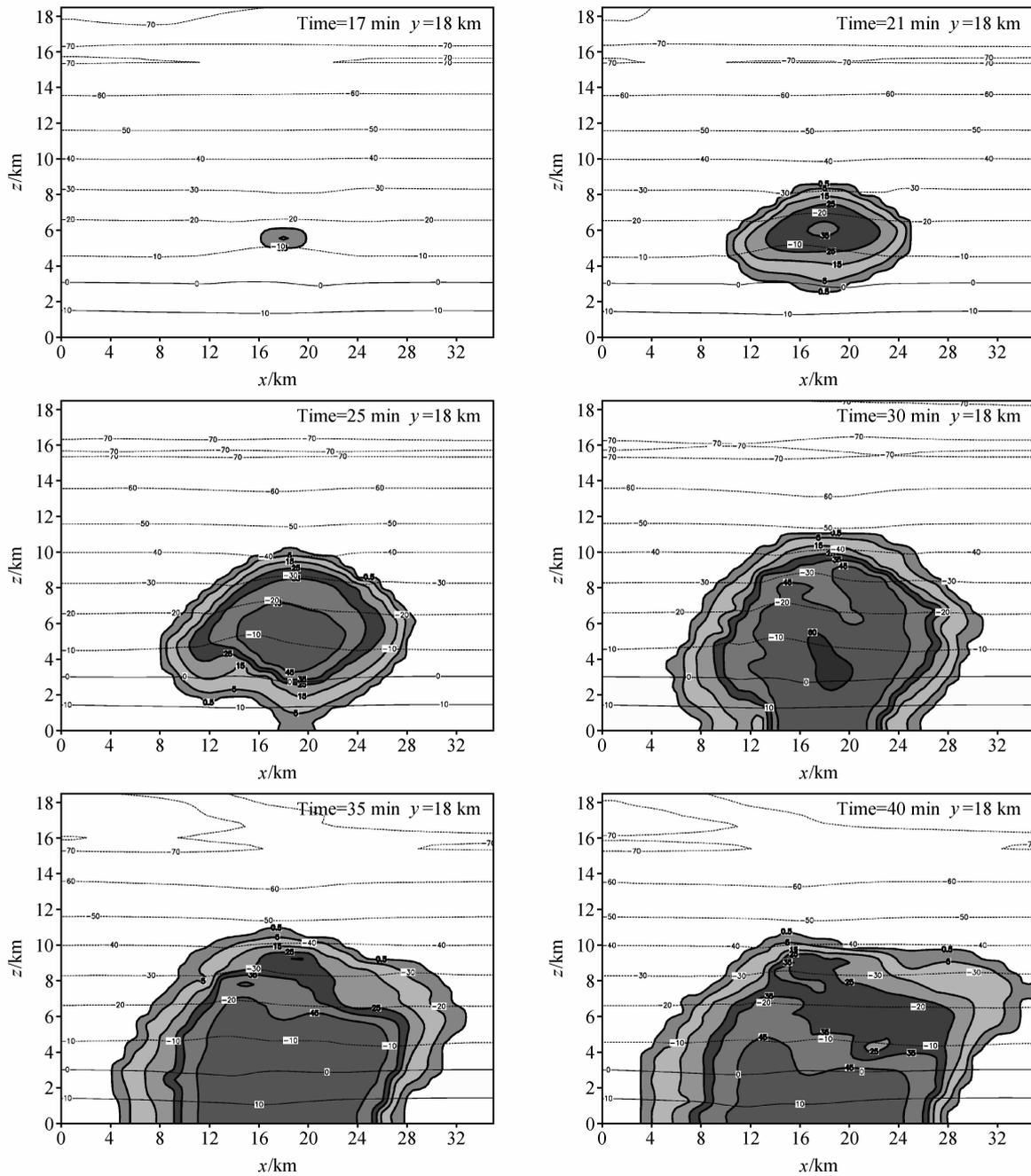


图2 模拟的MQ99712 雹云在不同时刻的雷达RHI回波(阴影区, 单位: dBZ)和温度(虚线, 单位: °C)
Fig. 2 The time evolution of simulated radar RHI echo (dBZ, shaded area) and Temperature (°C, dashed line)

过冷雨水, 最大含量出现在第 23 min, 为 $3.67 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$, 云内最大上升气流为 $14.23 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 出现在第 27 min, 过冷雨水最大含量及最大上升气流的分布列于表 1 中。同时, 图 3 也给出了模拟云内过冷雨水和垂直上升气流及温度的分布情况。

由表 1 看出, 过冷雨水出现后含量逐渐增加, 到第 23 min 时达到了最大为 $3.67 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ (此时

的云水含量也最大为 $1.71 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$), 然后又逐渐减小, 并不是保持不变的。第 18~20 min 内, 过冷雨水含量中心都高于上升气流最大值的高度, 按照 Sulakvelidze 提出的累积带理论^[15,16], 这段时间内存在过冷雨水累积带, 其厚度约 1~2 km, 并且累积带的位置在垂直上升气流最大值偏前上方, 温度介于 $-12 \sim -15^\circ\text{C}$ 之间。而 21~24 min,

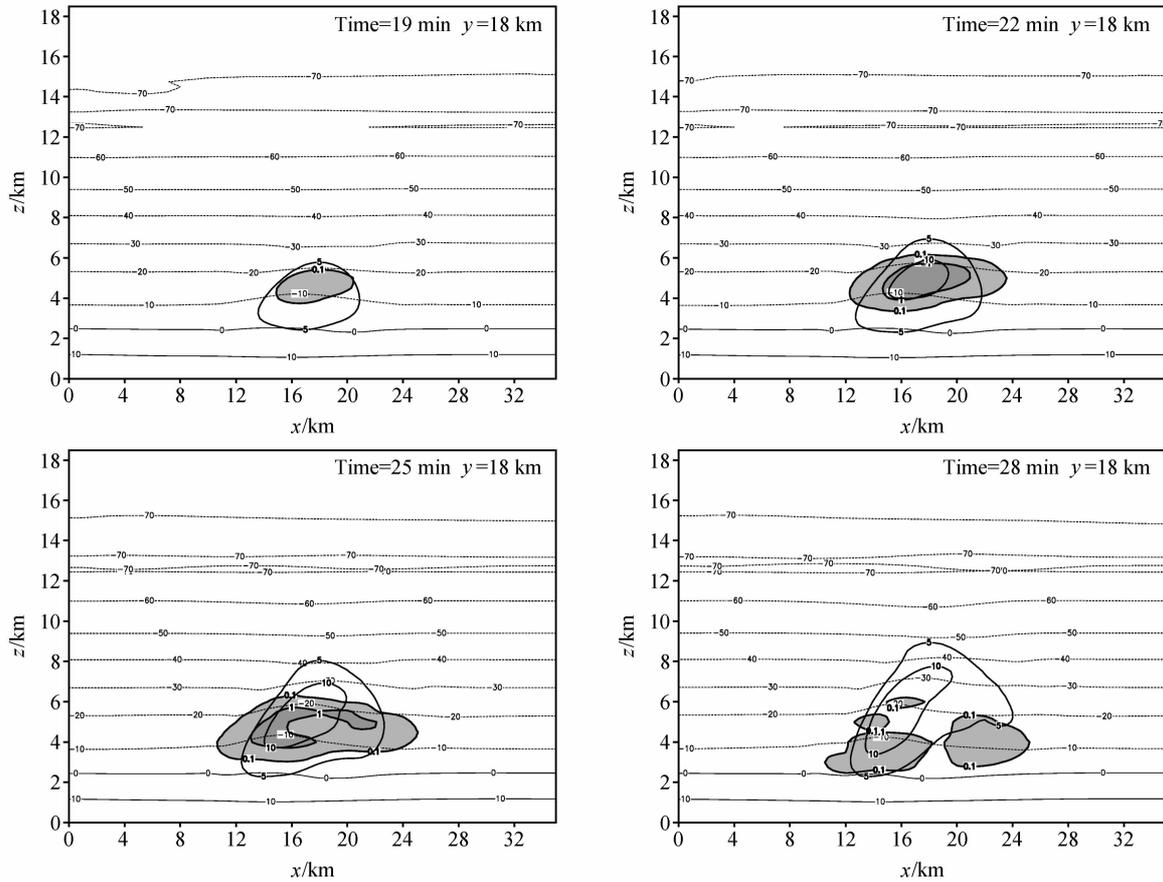


图3 模拟的MQ99712 雹云内过冷雨水(阴影区, 单位: $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)、垂直上升气流(粗实线, 单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)和温度(虚线, 单位: $^{\circ}\text{C}$)的分布

Fig. 3 The x - z vertical sections of supercooled rainwater content ($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, shaded area), vertical velocity ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, solid line) and temperature ($^{\circ}\text{C}$, dotted line) at $y=18$ km

表1 过冷雨水含量最大值、最大上升气流及其位置

Table 1 Maximum of supercooled rainwater, vertical velocity and its position

时间/min	上升气流				过冷雨水			
	最大值/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	位置 (网格)	高度/km	温度/ $^{\circ}\text{C}$	最大含量/ $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	位置 (网格)	高度/km	温度/ $^{\circ}\text{C}$
18	8.11	19, 19	4.0	-8.77	0.15	19, 19	4.5	-12.19
19	8.98	18, 19	4.5	-11.95	0.44	19, 19	4.5	-12.15
20	9.99	19, 19	4.5	-12.11	1.16	19, 20	5.0	-14.94
21	10.79	18, 20	5.0	-14.73	2.06	19, 20	5.0	-15.08
22	11.59	18, 19	5.0	-14.73	2.85	19, 19	5.5	-18.17
23	12.23	19, 19	5.5	-18.20	3.67	20, 19	5.5	-18.80
24	12.91	18, 19	5.5	-18.01	3.32	20, 20	5.5	-19.13
25	13.31	18, 18	5.5	-17.53	2.34	17, 21	4.0	-8.21
26	14.14	18, 19	6.0	-20.44	1.63	17, 17	4.5	-12.51
27	14.23	17, 19	6.0	-20.53	1.01	21, 17	5.0	-17.63

过冷雨水区与上升气流仍配合较好。

从图 3 看出, 在第 24 min 之前, 过冷雨水区主要位于 $-10 \sim -20 \text{ }^\circ\text{C}$ 温度区, 过冷雨水区温度较低。另外, 从图 3 中还发现, 在第 28 min 时, 在计算域中央 $x=18 \text{ km}$ 附近过冷雨水出现分离现象, 在中心轴两侧有两个含水量中心。图 4 是模拟云内总含水量及流场随时间的演变, 可见云中总含水量和上升气流都没有出现分离, 过冷水的分离不是由于窄的上升气流冲破了含水量累积区, 把它一分为二。这在后面的图 5、6、7 第 28 min 图上, 冻滴、霰和雹含水量中心都是在模拟域中央 $x=18 \text{ km}$ 附近。也就是说, 在中心轴附近, 冻滴、霰和雹消耗的过冷水较多, 而中心轴两侧消耗的过冷雨水少, 因此出现这种过冷水的分离现象。

3.2 冰雹胚胎

图 5、6 和 7 分别是模拟云内冻滴、霰和冰雹含水量的 $x-z$ 剖面, 从图中可以看出, 在第 28 min 时霰的含水量中心超过 $3 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$, 而冻滴在 28 和 32 min 时含水量中心最大值大于 $1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$, 说明该例雹云中霰的含水量大于冻滴含水量 (从图 8 中也可看出)。

图 8 是云中各种水成物总量随时间的变化, 可见, 在第 28 min 之前云中的雨水全部是过冷雨水, 与其他雹云不同的是, 霰与冻滴总量产生峰值时间是一致的, 都在 $30 \sim 35 \text{ min}$, 但前者峰值比后者大得多。该例雹云中冰雹总量较小, 从第 18 min 产生冰雹, 第 33 min 时冰雹总量达到最大, 冰雹峰值与冻滴和霰产生峰值的时间基本一致。

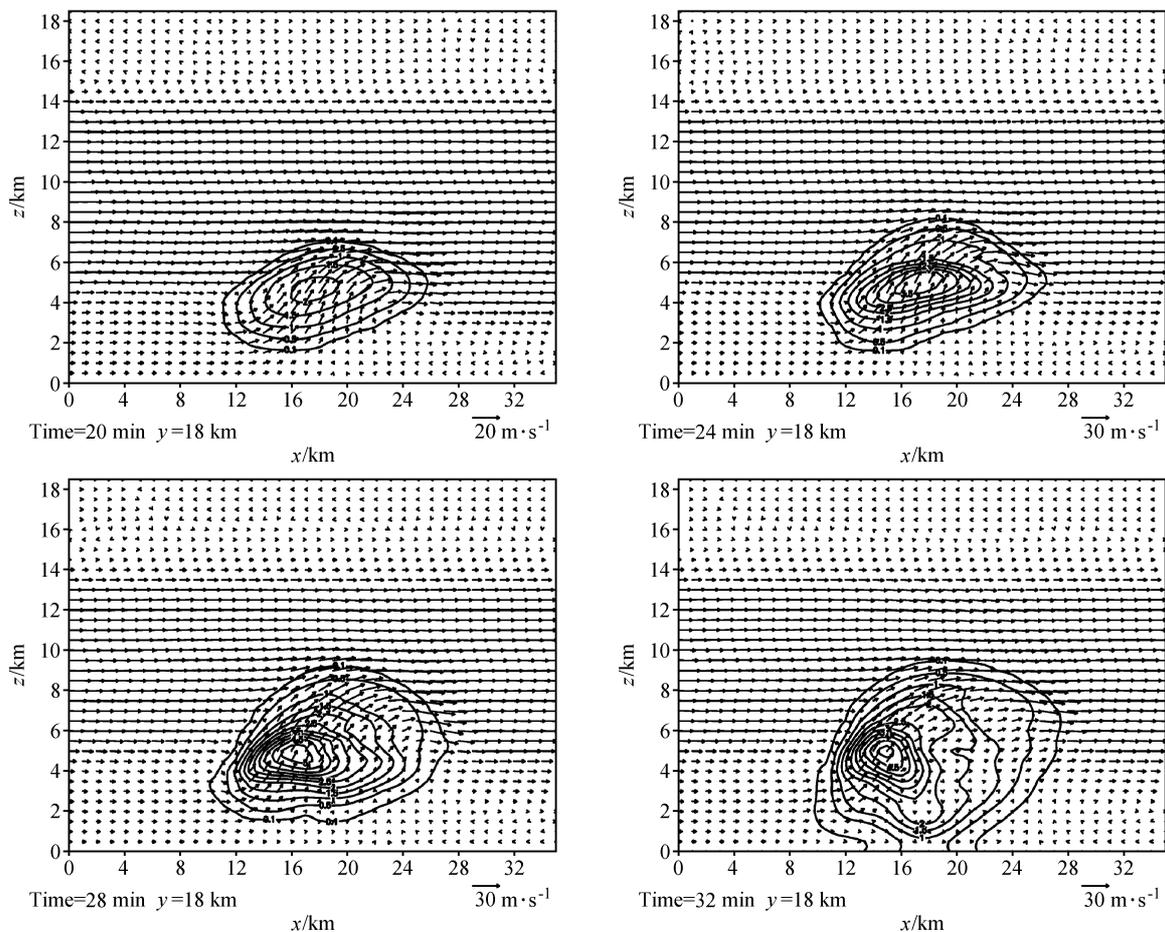


图 4 模拟的 MQ99712 雹云内总含水量 (单位: $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) 和流场的 $x-z$ 剖面

Fig. 4 The $x-z$ vertical sections of total water content ($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) and flow field at $y=18 \text{ km}$

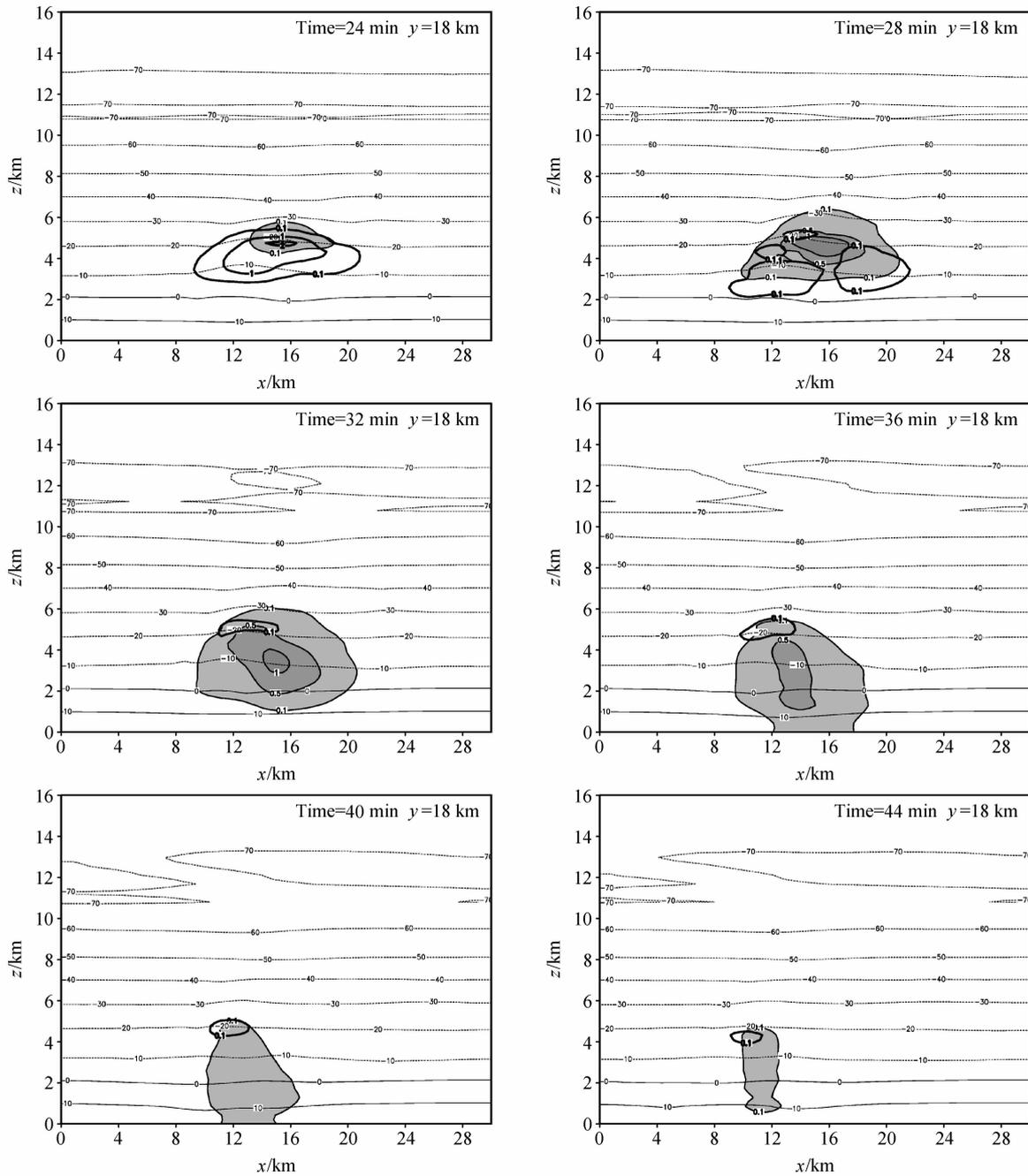


图5 模拟的MQ99712 雹云冻滴含水量(阴影区, 单位: $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)、过冷雨水(粗实线, 单位: $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)和温度(虚线, 单位: $^{\circ}\text{C}$)随时间的变化

Fig. 5 The x - z vertical sections of frozen droplet water content ($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, shaded area), supercooled rainwater ($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, solid line) and temperature ($^{\circ}\text{C}$, dotted line) at $y=18$ km

作为冰雹胚胎的冻滴和霰, 在冰雹形成的 20~40 min 内, 产生冰雹的总量为 83.455 kt, 其中冻滴自动转化成雹的量 (CNfh) 为 7.374 kt, 占雹产生总量的 8.8%; 霰自动转化成雹的量 (CNgh) 为 60.603 kt, 占 72.6%。从产生数量上

看, 40 min 内产生冰雹总数为 $10^{11.87}$ 个, 其中冻滴转化成雹 (TNCNfh) 为 $10^{10.93}$ 个, 占 11.5%; 霰自动转化成雹 (TNCNgh) $10^{11.82}$ 个, 占 89.1%。若以 60 min 的总量计算, 霰胚占 92.2%, 冻滴胚占 7.8%。因此冰雹胚胎以霰胚

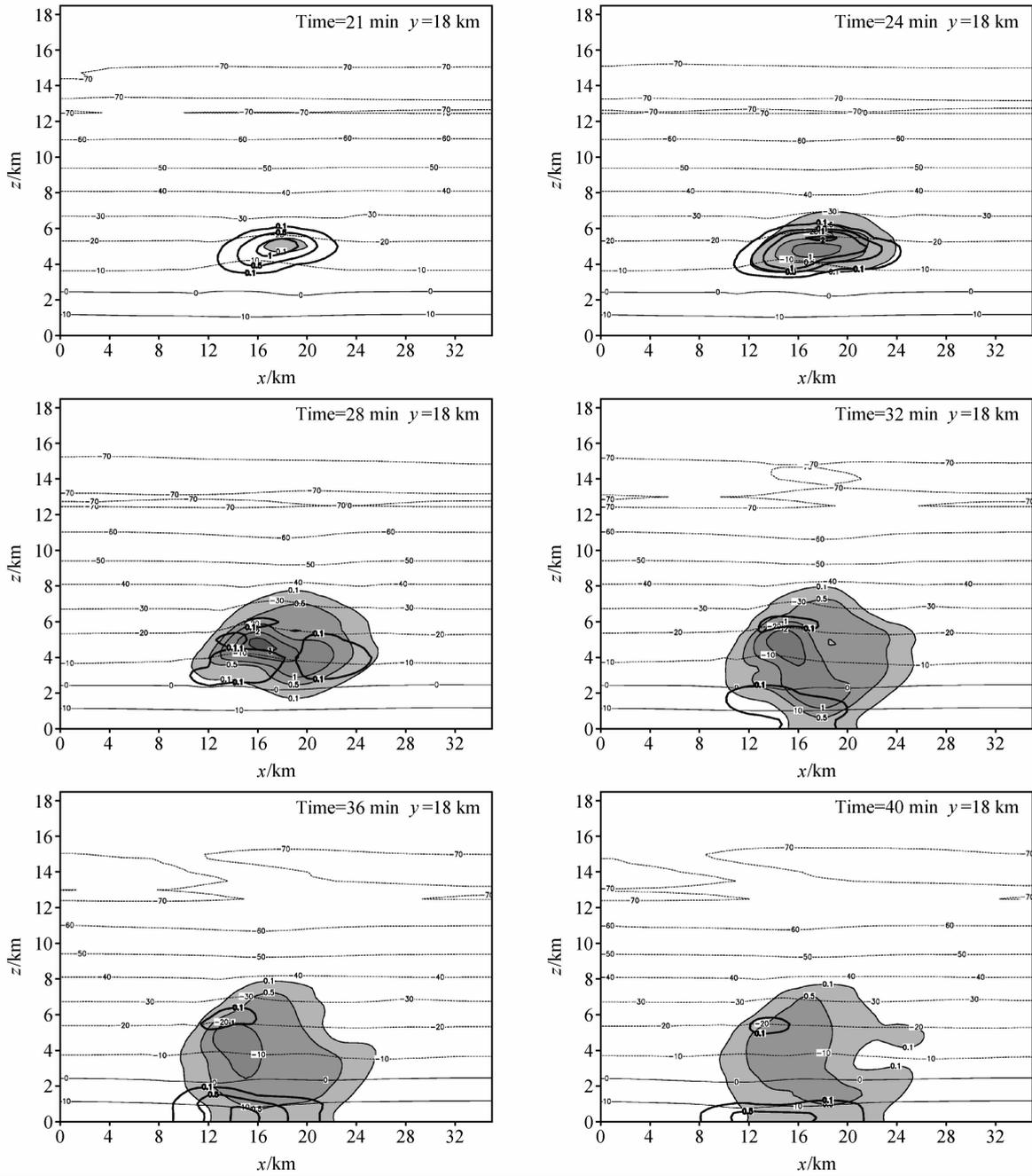


图6 模拟的MQ99712雹云霰含水量(阴影区,单位: $g \cdot m^{-3}$)、雨水(粗实线,单位: $g \cdot m^{-3}$)和温度(虚线,单位: $^{\circ}C$)随时间的变化
Fig. 6 The xz vertical sections of graupel water content ($g \cdot m^{-3}$, shaded area), rainwater ($g \cdot m^{-3}$, solid line) and temperature ($^{\circ}C$, dotted line) at $y=18$ km

为主。

3.3 地面降水组成

先分析模拟域内降水情况,表2给出了模拟域内降水总量及其百分比,地面降水中固态降水占总降水量的46%,而固态降水中(表3)又以霰为主,占固态降水的65%,冰雹降水量次之,

占18%,冻滴降水量最小,占17%。考虑到冰雹胚胎主要是霰,这与地面降雨和软雹的实际情况比较吻合。

3.4 冰雹形成机制

由于MQ99712雹云是冷云底雹云,与其他雹云的显著区别:一是地面降水中固态降水几乎占

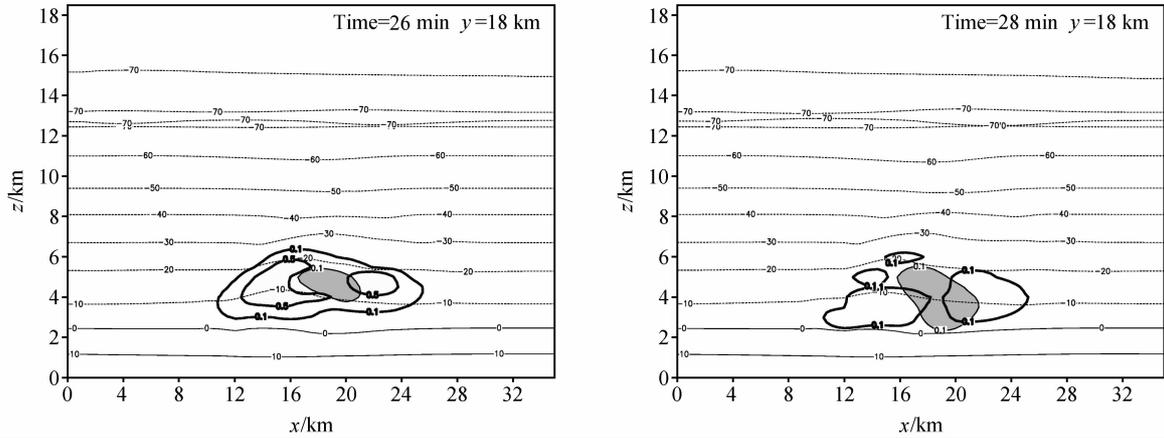


图7 模拟的MQ99712雹云冰雹含水量(阴影区,单位: $g \cdot m^{-3}$)、过冷雨水(粗实线,单位: $g \cdot m^{-3}$)和温度(虚线,单位: $^{\circ}C$)随时间的变化
Fig. 7 As in Fig. 5 except for hailstone water content

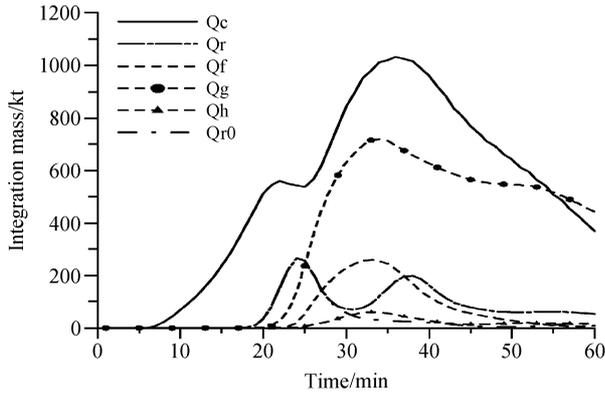


图8 模拟的MQ99712雹云中各种水成物总量随时间的变化(云水: Qc, 雨水 Qr:, 冻滴: Qf, 霰 Qg:, 冰雹: Qh, 过冷水: Qr0)
Fig. 8 The time evolution of total mass of various water substances

表2 模拟域内液、固态降水总量及百分比

Table 2 Rainfall amount at the ground and its percentage

	总量/kt	百分比/%
液态降水	639.3	54
固态降水	534.4	46

表3 固态降水的组成及百分比

Table3 Composing of solid phase precipitation and its percentage

	总量/kt	百分比/%
冰雹	98.4	18
霰	345.4	65
冻滴	90.6	17

一半,而且65%的固态降水是霰;二是绝大多数冰雹胚胎是霰。因此霰在冰雹胚胎和冰雹的形成中起着重要作用,在分析冰雹形成机制时要特别关注与霰有关的物理过程。

3.4.1 冰晶的形成过程

由于第18~24 min存在累积带和过冷雨水区,同时,第18 min时云内产生冰雹,且在第33 min时云内冰雹总量达到最大,因此下面分别给出第18、24、33、40和55 min时各水成物转换项空间平均总量的变化(表4)。

第6 min时云内冰晶就已达到 $10^{11.32}$ 个,第18 min时云内冰晶总数达到 $10^{13.32}$ 个,质量为16.94 t;从表中也可看出,在整个模拟过程中,冰晶的产生主要是自然冰核化过程(NUvi),冰晶形成后的增长主要靠凝华过程(VDvi)。

图9是五种水成物的质量产生率及其源项随时间的变化,从图9a中也可看出,VDvi和NUvi两个过程对冰晶总量贡献较大。

3.4.2 雪的形成过程

表5是雪的形成和增长过程量,可见雪主要由冰晶向雪的自动转化(CNis)形成的。雪形成后的增长,在不同时间段内是不同的:在18~24 min内,雪主要通过雪碰并云水增长(CLcs),24 min时为3.7 t,占此时雪产生总量的92.5%,其次是雪碰并冰晶增长;之后,冰晶自动转化成雪(CNis)和雪的凝华(VDvs)增长量逐渐增加;到第40 min时CNis和VDvs都已超过CLcs和CLis的产生量,同时雪与冰晶的碰并增长量也在

表 4 冰晶源项中各水成物转换项空间总量

Table 4 Total mass of substance transform into ice crystal

时间/min	(Qi/t) /TNi	(NUvi/t) /TNNUvi	(Pci/t) /TNPci	CLci/t	VDvi/t
18	16.94/10 ^{13.32}	0.02/10 ^{13.32}	0.00/10 ^{9.41}	1.33	15.59
24	595.82/10 ^{16.29}	19.10/10 ^{16.28}	0.19/10 ^{14.29}	106.86	469.67
33	48 589.02/10 ^{18.19}	1 428.89/10 ^{18.19}	2.02/10 ^{15.31}	287.34	46 870.77
40	168 948.00/10 ^{18.33}	1 914.92/10 ^{18.33}	2.93/10 ^{15.47}	689.51	166 340.50
55	479 960.40/10 ^{20.11}	65 062.94/10 ^{20.11}	5.08/10 ^{15.71}	3 535.89	411 357.10

注：Qx：水成物的质量，下标 x 表示水成物的种类；Nx：表示水成物的浓度，下标 x 表示水成物的种类；符号前加 T 表示总量，加 R 表示产生率（下同）。NUvi：自然冰核活化形成冰晶；Pci：冰晶繁生过程；CLci：冰晶结淞增长；VDvi：冰晶的凝华过程

表 5 雪源项中各水成物转换项空间总量

Table 5 Total mass of substance transform into snow

时间/min	(Qs/t) /TNs	(CNis/t) /TNCNis	CLcs/t	CLis/t	VDvs/t
18	0.1/10 ^{12.65}	0.0/10 ^{12.65}	0.1	0.0	13.2
24	4.0/10 ^{13.58}	0.1/10 ^{13.58}	3.7	0.0	0.2
33	25.6/10 ^{15.65}	7.5/10 ^{15.65}	11.4	1.2	5.5
40	117.6/10 ^{16.42}	40.2/10 ^{16.42}	25.0	18.8	33.6
55	565.6/10 ^{16.82}	109.8/10 ^{16.82}	131.5	99.2	225.1

注：CNis：冰晶自动转化成雪；CLcs：雪撞冻云水；CLis：雪撞冻冰晶；VDvs：雪的凝华过程

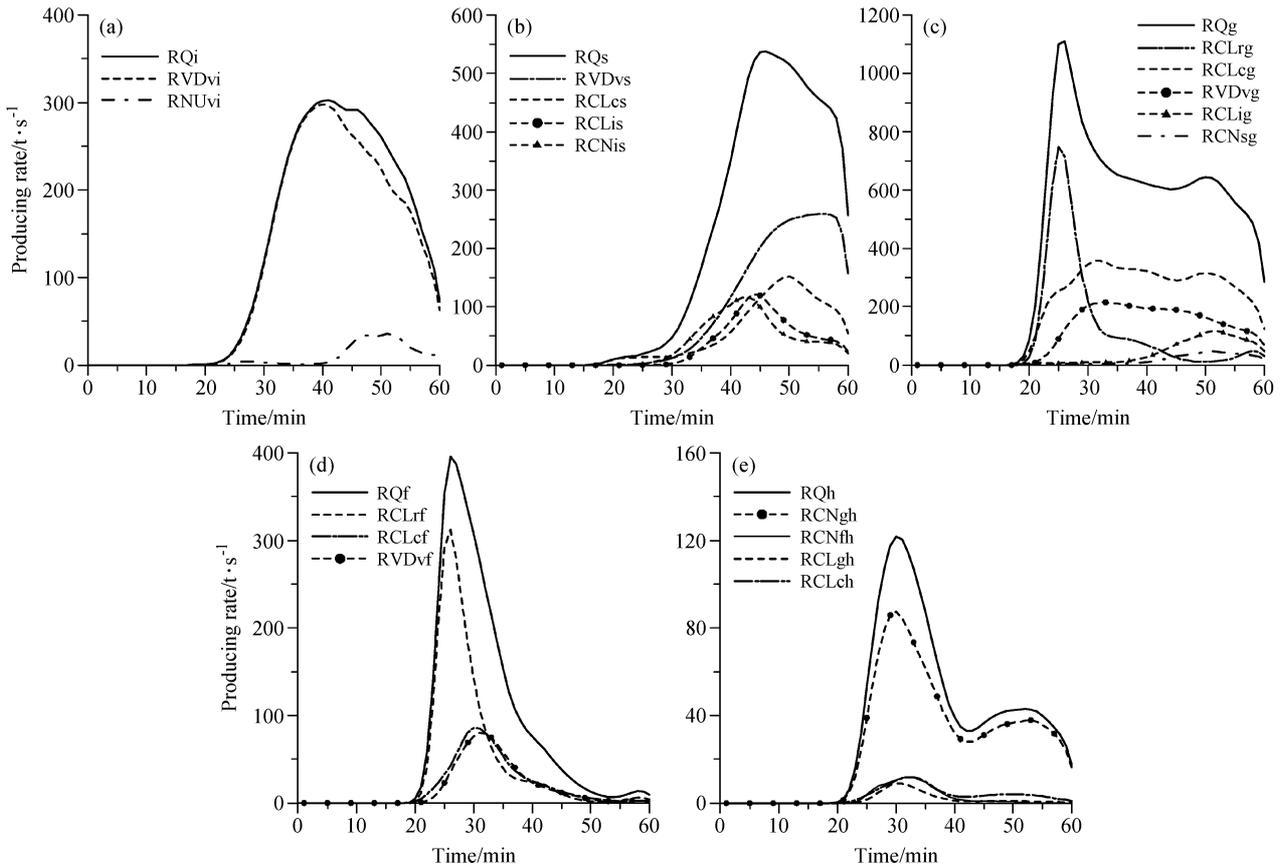


图 9 模拟的 MQ99712 雹云冰晶、雪、冻滴、霰和冰雹质量产生率 (RQi、RQs、RQf、RQg、RQh) 及其源项 (用微物理过程符号前加 R 表示) 随时间的变化

Fig. 9 The time evolution of mass producing rate of ice crystal, snow flake, frozen droplet, graupel and hailstone and their sources

增加。到第 55 min 时, 总的碰并增长量 (CNis+CLcs+CLis) 为 340.5 t, 占雪产生总量的 60%, 凝华增长的贡献为 40%。

由图 9b 也可看出雪的产生和增长过程量, 凝华增长率极值可达 $250 \text{ t} \cdot \text{s}^{-1}$, 比撞冻云水增长量大得多。

3.4.3 霰的形成过程

表 6 给出了霰的形成和增长过程量, 霰的形成主要通过雪的转化、冰(雪)晶接触过冷雨滴冻结 (CLrig) 和过冷雨水核化 (NUrg) 过程。从数量上看, 第 18 min 时, CLrig 过程产生的霰最多, 其次是 NUrg 过程; 第 24 min 后, 后者的产生量略大于前者, 因此, 雨滴冻结形成的霰在数量上占绝对多数; 而雪的转化比它们小 2 个数量级。但是从质量上讲, 雪的转化量最大, 如第 24 min 时雪的转化量 (CNsg) 为 0.65 t。霰形成以后, 主要通过霰撞冻雨水 (CLrg) 和霰撞冻云水 (CLcg) 过程增长, 并且在第 18~24 min 内 $\text{CLrg} > \text{CLcg}$, 霰自身的凝华增长过程在第 24 min 之后增长很快。这说明在冰晶形成后, 过冷雨水对霰的形成和增长提供了有利条件。

在图 9c 中, 由于 RCNig、RCLrig 和 RNUrg 的极值只有不到 $0.5 \text{ t} \cdot \text{s}^{-1}$, 而 RCNsg 在 $3 \text{ t} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上, 故 RCNig、RCLrig 和 RNUrg 无法在同一图中表示。从图 9c 上还可看出, 在第 28 min 以前, 霰撞冻雨水增长 CLrg 主要集中在 20~30 min,

对霰的产生率贡献最大, 而撞冻云水增长 (CLcg) 过程的维持时间较长。在冰雹产生率达到第一极值期间 (40 min 之前), 霰的撞冻增长量占霰总量的 76%。

3.4.4 冻滴的形成过程

从图 9d 可知, 冻滴最大值出现在第 25 min 附近, 与过冷雨水的峰值时间对应 (图 6), 冻滴形成后主要靠撞冻雨水增长, 增长率极值约 $300 \text{ t} \cdot \text{s}^{-1}$, 比霰撞冻雨水增长率极值 ($>700 \text{ t} \cdot \text{s}^{-1}$) 小得多。

从表 7 可看出, 冻滴的产生主要通过过冷雨滴异质核化冻结 (NUrf) 和冰晶接触过冷雨滴的冻结 (CLrif), 并且 $\text{TNNUrf} > \text{TNCLrif}$ 。冻滴产生之后, 冻滴的增长主要通过冻滴碰并过冷雨水过程, 其次是冻滴碰并云水和冻滴凝华增长过程, 在 18~24 min 内 CLrf 占 Qf 的 72%。这也说明累积带中过冷雨水的存在对冻滴的形成和增长是至关重要的。图 9d 也说明了同样的结果。

3.4.5 冰雹的形成过程

冰雹的形成主要通过霰向冰雹的自动转化 (CNgh) 和冻滴向霰的自动转化 (CNfh), 表 8 是冰雹源项中各水成物转换项空间总量, 可见在模拟云的整个发展过程中都有 $\text{TNCNgh} \gg \text{TNCNfh}$ 和 $\text{CNgh} \gg \text{CNfh}$ 。在第 18~24 min CNgh 占冰雹总量的 77%, CLrh 在雹块的增长中占 12%。因此, 累积带中的过冷雨水同样有利于雹

表 6 霰源项中各水成物转换项空间总量

Table 6 Total mass of substance transform into graupel

时间/min	(Qg/t) /TNg	(CNig/t) /TNCNig	(CNsg/t) /TNCNsg	(NUrg/t) /TNNUrg	
18	0.02/10 ^{11.35}	0.00/10 ^{8.97}	0.00/10 ^{10.61}	0.00/10 ^{10.84}	
24	93.09/10 ^{14.48}	0.02/10 ^{11.79}	0.65/10 ^{12.56}	0.05/10 ^{14.19}	
33	580.79/10 ^{15.20}	0.02/10 ^{11.79}	2.69/10 ^{13.61}	1.07/10 ^{14.94}	
40	849.97/10 ^{15.47}	0.03/10 ^{11.82}	5.43/10 ^{14.07}	5.05/10 ^{15.32}	
55	1 401.42/10 ^{15.60}	0.21/10 ^{12.75}	35.90/10 ^{14.68}	6.62/10 ^{15.39}	
时间/min	(CLrig/t) /TNCLrig	CLig/t	CLcg/t	CLrg/t	VDvg/t
18	0.00/10 ^{11.06}	0.01	0.01	0.00	0.00
24	0.02/10 ^{14.15}	1.93	37.38	48.58	4.46
33	0.11/10 ^{14.83}	6.40	203.35	271.93	95.22
40	0.12/10 ^{14.88}	12.35	337.05	309.34	180.60
55	0.15/10 ^{15.02}	91.63	600.04	331.84	335.03

注: CNig: 冰晶转化成霰; CNsg: 雪转化成霰; NUrg: 过冷雨滴异质核化冻结成霰; CLrig: 冰晶撞冻雨滴形成霰; CLig: 霰撞冻冰晶; CLcg: 霰撞冻云水; CLrg: 霰撞冻雨水; VDvg: 霰的凝华过程

表 7 冻滴源项中各水成物转换项空间总量

Table 7 Total mass of substance transform into frozen droplet

时间/min	(Qf/t) /TNf	(CLrif/t) /TNCLrif	NUrf/TNNUrf	CLif/t	CLcf/t	CLrf/t	VDvf/t
18	0.00/10 ^{8.08}	0.00/10 ^{6.78}	0.00/10 ^{8.06}	0.00	0.00	0.00	0.00
24	13.13/10 ^{14.20}	0.02/10 ^{13.34}	0.64/10 ^{14.13}	0.18	2.25	9.47	0.57
33	198.26/10 ^{14.80}	0.60/10 ^{14.48}	3.52/10 ^{14.52}	1.28	37.88	122.07	32.90
40	250.51/10 ^{14.89}	0.66/10 ^{14.50}	3.91/10 ^{14.65}	2.05	56.09	135.56	52.24
55	277.72/10 ^{14.92}	0.74/10 ^{14.54}	4.09/10 ^{14.68}	4.23	65.42	142.83	60.42

注: CLrif: 冰晶和雨水撞冻形成冻滴; NUrf: 过冷雨滴异质核化冻结成冻滴; CLif: 冻滴撞冻冰晶; CLcf: 冻滴撞冻云水; CLrf: 冻滴撞冻雨水; VDvf: 冻滴的凝华过程

表 8 冰雹源项中各水成物转换项空间总量

Table 8 Total mass of substance transform into hailstone

时间/min	(Qh/t) /TNh	(CNgh/t) /TNCNgh	(CNfh/t) /TNCNfh	CLih/t
18	0.00/10 ^{5.09}	0.00/5.09	0.00/0.00	0.00
24	1.46/10 ^{10.09}	1.12/10.08	0.01/8.17	0.00
33	54.75/10 ^{11.68}	39.53/11.63	4.65/10.72	0.00
40	83.46/10 ^{11.87}	60.60/11.82	7.37/10.93	0.00
55	117.58/10 ^{12.03}	89.91/11.99	8.01/10.96	0.01

时间/min	CLch/t	CLsh/t	CLgh/t	CLfh/t	CLrh/t
18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
24	0.14	0.00	0.01	0.00	0.17
33	4.51	0.00	3.38	0.69	1.99
40	7.62	0.01	4.75	0.98	2.12
55	10.83	0.03	5.58	1.03	2.18

注: CNgh: 霰转化成雹; CNfh: 冻滴转化成雹; CLih: 雹撞冻冰晶; CLch: 雹撞冻云滴; CLsh: 雹撞冻雪; CLgh: 雹撞冻霰; CLfh: 雹撞冻冻滴; CLrh: 雹撞冻雨水

块的增长,但在该例冰雹云中不起主要作用。

由图 9e 可见,冰雹产生率 Qh 与霰向雹的自动转化 CNgh 是非常一致的,也说明该例雹云中冰雹胚胎主要由霰胚组成,雹块主要通过撞冻云水和霰增长,以及撞冻雨水增长。

4 结论

在玛曲冰雹云中,由于云中的过冷雨水量不大 ($<4.0 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$),所以碰并雨水而使冰雹长大的过程作用不是很大,不是冰雹生长的主要过程,而一般降雹较大的雹云中,此过程的作用是最大的,这是此云不产生大雹的主要因素。通过以上分析,主要有以下结果:

(1) 玛曲的海拔高度较高,1999 年 7 月 12 日玛曲冰雹云属冷云底雹云。雹云中霰的数量大于

冻滴,霰主要通过撞冻雨水和撞冻云水增长,云的环境更适宜于霰的增长。

(2) 雹云累积带中过冷雨水含量小,累积带较弱,维持时间也很短,约 2~3 min。累积带中的过冷雨水对雹块的生长是有利的,但不起主要作用。

(3) 冰雹胚胎以霰胚为主,雹块的增长主要是通过雹撞冻云水,其次是撞冻雨水增长。地面降水中液态和固态降水分别占 54% 和 46%,霰占固态降水的 65%,其余为雹块和冻滴。

致 谢 感谢黄美元研究员对本工作的指导和帮助!

参考文献 (References)

[1] Thomson A D, List R. High-resolution measurement of a

- hail region by vertically pointing Doppler radar. *J. Atmos. Sci.*, 1999, **56**: 2132~2151
- [2] Knight C A, Knight N C. Very large hailstones from Aurora, Nebraska. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2005, **86**: 1773~1781
- [3] Orville H D, Kopp F J. Numerical simulation of the life history of a hailstorm. *J. Atmos. Sci.*, 1977, **34**: 1956~1618
- [4] Foote G B. A study of hail growth utilizing observed storm conditions. *J. Climate Appl. Meteor.*, 1984, **23**: 84~101
- [5] Farley R D. Numerical modeling of hailstorms and hailstone growth. Part II: The role of low-density riming growth in hail production. *J. Climate. Appl. Meteor.*, 1987, **26**: 234~254
- [6] 赵仕雄, 李正贵. 青海高原冰雹的研究. 北京: 气象出版社, 1991
Zhao Shixiong, Li Zhenggui. *Study on Hail at Qinghai Plateau* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1991
- [7] 孔凡铀. 冰雹云三维数值模拟研究. 中国科学院大气物理所博士学位论文. 1991
Kong Fanyou. Three-dimensional numerical simulation of hailstorms. Ph. D. dissertation (in Chinese), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences. 1991
- [8] 洪延超. 三维冰雹云催化数值模式. 气象学报, 1998, **56** (6): 641~653
Hong Yanchao. A 3-D hail cloud numerical seeding model. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1998, **56** (6): 641~653
- [9] 周玲, 陈宝君, 李子华, 等. 冰雹云中累积区与冰雹的形成数值模拟研究. 大气科学, 2001, **25** (4): 536~550
Zhou Ling, Chen Baojun, Li Zihua, et al. A numerical simulation of hailstorm accumulation zone and hail formation. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2001, **25** (4): 536~550
- [10] 胡朝霞, 李宏宇, 肖辉, 等. 旬邑冰雹云的数值模拟及累积带特征. 气候与环境研究, 2003, **8** (2): 196~208
Hu Zhaoxia, Li Hongyu, Xiao Hui, et al. Numerical simulation of hailstorms and the characteristics of accumulation zone of supercooled raindrops in Xunyi County. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2003, **8** (2): 196~208
- [11] 郭学良, 黄美元, 洪延超, 等. 三维冰雹分档强对流云数值模式研究 I. 模式建立及冰雹的循环增长机制. 大气科学, 2001, **25** (5): 707~720
Guo Xueliang, Huang Meiyuan, Hong Yanchao, et al. A study of three-dimensional hail-category hailstorm model. Part I: Model description and the mechanism of hail recirculation growth. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2001, **25** (5): 707~720
- [12] 康凤琴, 张强, 马胜萍, 等. 青藏高原东北边缘冰雹形成机理. 高原气象, 2004, **23** (6): 749~757
Kang Fengqin, Zhang Qiang, Ma Shengping, et al. Mechanism of hail formation on the northeast border of Qinghai-Xizang plateau and its neighbourhood. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2004, **23** (6): 749~757
- [13] 刘德祥, 白虎志, 董安祥. 中国西北地区冰雹的气候特征及异常研究. 高原气象, 2004, **23** (6): 795~803
Liu Dexiang, Bai Huzhi, Dong Anxiang. Studies on climatic characteristic and anomaly of hail in northwest China. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2004, **23** (6): 795~803
- [14] 王宏, 雷恒池, 德力格尔, 等. 黄河上游地区强对流云特征的模拟分析. 气候与环境研究, 2002, **7** (4): 397~408
Wang Hong, Lei Hengchi, De Ligeri, et al. A numerical simulation of characteristics of convective cloud at the upper reaches of the Yellow River. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2002, **7** (4): 397~408
- [15] Sulakvelidze G K. *Rainstorms and Hail*. Israel Program for Scientific Translation. Jerusalem, 1969, 310pp
- [16] 黄美元, 王昂生, 等. 人工防雹导论. 北京: 科学出版社, 1980. 92~95
Huang Meiyuan, Wang Angsheng, et al. *Introduction of Hail Suppression* (in Chinese). Beijing: Science Press, 1980. 92~95