

慕尼黑一次混合型雹暴的数值模拟与成雹机制

胡朝霞^{1, 2} 郭学良¹ 李宏宇³ 洪延超¹

1 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

2 中国科学院研究生院, 北京 100049

3 北京市人工影响天气办公室, 北京 100089

摘 要 利用三维冰雹云模式, 对发生在德国南部慕尼黑的一次混合型雹暴进行了数值模拟, 模拟云的雷达回波结构、过冷雨水区特征与实际雷达观测的分析结果比较一致。模拟结果表明: 该例雹云中冰雹胚胎既有冻滴也有霰, 二者在数量上相当; 虽然雹云中不存在过冷雨水累积带, 但在主上升气流区周围存在过冷雨水区, 过冷雨水对冰雹的形成起着重要作用; 在雹云发展的不同阶段, 冰雹的形成机制也不相同。

关键词 冰雹云 数值模拟 过冷雨水累积带 成雹机制

文章编号 1006-9895(2007)05-0973-14

中图分类号 P426.6

文献标识码 A

Numerical Simulation of a Hybrid-Type Hailstorm in Munich and the Mechanism of Hail Formation

HU Zhao-Xia^{1, 2}, GUO Xue-Liang¹, LI Hong-Yu³, and HONG Yan-Chao¹

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

2 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*

3 *Beijing Weather Modification Office, Beijing 100089*

Abstract A three-dimensional hailstorm numerical model with detailed microphysical processes is used to simulate a hybrid-type hailstorm occurring in Munich, south of Germany. The simulated radar echo structure and the characteristics of supercooled raindrop zone are in agreement with the analyzed results revealed by Doppler radar measurements. The simulated results show that the hailstone embryos are frozen drops and graupel particles, and their numbers are equivalent. Although the accumulation zone of supercooled raindrops is not present, raindrops exist in the main updraft zone of the storm considered, which play an important role in the hailstone formation. The mechanism of hail formation is very different at various stages of hailstorm developing.

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

1 引言

冰雹灾害是由强对流天气引起的一种剧烈气象灾害, 是我国主要灾害天气之一。1995 至 2003 年, 全国有 23 个省(区、市)组织开展了高炮、火箭防雹作业, 保护区面积达 41 万余平方公里, 累计减

免雹灾损失约 340 多亿元。目前, 国内外人工防雹中所使用的方法基本上有两种: 一种是播撒促进冰晶化的催化剂, 另一种是爆炸的方法^[1]。我国的人工防雹作业大都采用第一种方法, 即往云中播撒 AgI、液氮或液态 CO₂ 等成冰催化剂, 这种方法是建立在前苏联提出的“利益竞争”(Beneficial Com-

petition) 假说^[2, 3]之上的。这个假说的关键是 Sulakvelidze 提出的过冷雨水累积带^[4], 认为累积带是冰雹生长的主要场所, 用火箭或高炮向累积带播撒人工冰核, 使人工冰核冰化后产生的人工雹胚和自然雹胚“争食”云中过冷水, 从而抑制大冰雹的形成。在此理论的指导下, 前苏联和欧洲一些国家的防雹工作取得了巨大成功, 减少雹灾损失 70%~90%^[5]。累积带理论的基本依据是认为雷达强回波区是由大量过冷却大水滴组成, 但在美国国家冰雹试验 (NHRE) 中^[6], 用装甲飞机对强雹暴的直接观测证明, 在雷达强回波区里主要是固态粒子, 并不存在过冷雨水的累积区。在瑞士、法国和意大利的联合防雹试验中, 也没有发现过冷雨水累积带^[7, 8]。

在 20 世纪 60 年代初期以前, 有关冰雹增长的数值模式都是一维非时变的, 一般也不考虑微物理过程对宏观条件的反作用^[9]。List 等^[10]在一维模式中考虑了冰雹的反馈机制, 研究了冰雹生长对含水量的影响以及冰雹生长的热反馈作用和拖带效应。Srivestava 等^[11]根据一组考虑了云的微物理参数化的动力学、热力学和水分平衡方程, 计算模拟了积云的发展过程, 发展了一维时变模式。Wisner 等^[12]的一维时变积云模式中, 更为广泛地考虑了微物理过程的参数化, 研究了动力、热力和凝结的作用。指出了冰雹融化作用的重要性, 但这个模式中降水只能在上升区中形成和降落, 不能模拟降水粒子的循环生长, 所以难以形成较大的冰雹。在 Danielsen 等^[13]的一维时变积云模式中, 动力过程比较简单, 而对微物理过程考虑得比较仔细, 还引进了液态和固态水成物粒子的随机碰并方程。模式的数值试验结果表明了冰雹的生长主要依赖于上升气流速度、初始水滴分布、地面水汽辐合比以及冻结层高度的关系。得到的冰雹生长机制不同于苏联雹暴模式中提出的累积带理论。雹暴中的粒子除了在上升区中随着气流作垂直运动外, 还要作水平方向的移动。Browning 等^[14]的二维非时变积云模式中首先考虑了这一问题。在雹暴中存在持续的、倾斜的强上升气流, 模式模拟了冰雹粒子的循环增长, 解释了大雹的多层结构。Takahashi^[15]关于轴对称云的二维时变模式较详细地考虑了冰雹生长的宏微观过程, 较好地模拟了冰雹云的流场和云中各类水成物的演变过程, 刻划了冰雹在再循环过程中

的微物理特征, 但没有考虑雹块的湿增长。Orville 和 Koop^[16]将 Wisner 等^[12]的体积水参数化冰相微物理过程加以扩充后结合到二维面对称山地积云模式中, 并模拟了雹云生命史。模式中将冰相质粒分为云冰和雹块, 考虑了冰雹的湿增长方式和雹块融化水的脱落。这个模式后来得到不断发展。Farley 和 Orville^[17]把雹块按质量分为 20 档, 建立了冰雹分档模式。以上的雹云模拟研究取得了一些满意的结果, 但模式的一维或二维结构限制了其对雹暴动力学结构及传播路径的充分再现。Xu^[18]在 Clark 三维云模式的基础上, 发展了一个三维雹块生长模式, 模拟了冰雹的生长轨迹。

进入 20 世纪 90 年代后, 国内外冰雹云的三维数值模拟工作发展很快。Farley 等^[19]、Holroyd 等^[20]以及 Heimbach 等^[21]分别在 Clark 模式的基础上, 模拟了 AgI 粒子对地形云的播云效果。在国内, 许焕斌等^[22]利用三维 Euler 强对流云模式和三维 Lagrange 粒子群运行增长模式, 研究了冰雹云中水凝物粒子的累积机制和过冷水的消耗。在中国科学院大气物理研究所, 自孔凡铀^[23]建立了三维冰雹数值模式后, 该模式得到不断发展。黄燕等^[24]考虑了 AgI 粒子的多种成核机制, 洪延超^[25]改进了孔凡铀的冰雹云模式, 采用双参数体积水方案, 考虑了详细的微物理过程。周玲等^[26]利用该模式模拟了陕西旬邑的一次降雹过程, 发现在该例冰雹云中不存在过冷雨水累积区。胡朝霞等^[27, 28]还在洪延超模式^[25]的基础上, 对雨滴冻结过程作了改进, 模拟研究了旬邑和玛曲冰雹云的累积带特征。结果表明, 在旬邑地区的冰雹云中, 绝大多数都存在过冷雨水累积带; 在玛曲的冰雹云中, 过冷雨水累积带较弱, 累积带中的过冷雨水有利于雹块的增长, 但不起主要作用。

1990 年 6 月 30 日, 在德国南部慕尼黑 (Munich) 发生了一次混合性雹暴过程 (简称 Mun90630 雹云)。雷达观测表明, 在该例雹云中不存在与雷达高反射区相对应的过冷雨水累积带^[29]。由于雹云的地域差别很大, 本文目的是应用三维冰雹云模式^[27], 对发生在慕尼黑的这次雹暴过程进行模拟, 并分析该例雹云中的过冷雨水区情况及冰雹形成机制。

2 慕尼黑冰雹云概况

1990 年 6 月 30 日发生在德国慕尼黑的这次雹

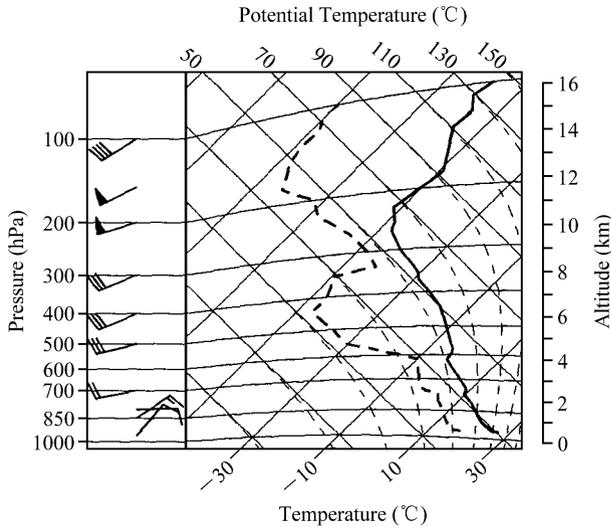


图1 1990年6月30日12:00(当地时间14:00)慕尼黑探空。
实线: 温度; 粗虚线: 露点温度; 左侧风羽表示风
Fig. 1 The 1200 UTC 30 Jun 1990 sounding at Munich. Temperature (solid line) and dewpoint (thick dashed line) are shown. Wind barbs are indicated on the left margin

暴是一次混合型雹暴, 所谓混合性雹暴, 是因为这次雹暴具有多单体和超级单体的某些特征, 如里查森数和风暴移向上都介于多单体和超级单体之间。从雷达回波结构上看, 在14:47 [国际协调时(下同), 当地时间为16:47]的PPI图上, 45 dBZ回波等值线呈V字形, 没出现超级单体一般具有的钩状回波结构。12:53雷达回波上有四个中心, 即A、B、C和D四个单体, 12:58时C和D两个单体合并, 逐渐合并成一个共同的回波中心, 而A和B两个单体在强度上减弱, 逐渐消散。这次风暴的发展可分为三个过程: (1) 初始阶段, 从13:15UTC开始; (2) 成熟阶段, 从13:15~14:55约100分钟; (3) 消散阶段。雷达站的平均海拔高度为600 m, 观测此次雹暴的RHI雷达回波最大强度为65 dBZ, 回波顶高13~14 km, 强回波中心高度在4 km左右。云底温度15.2°C, 属暖云底雹云。地面降水物有霰、雹和雨夹雹, 在东西长120 km、宽5~14 km的范围内造成了不同程度的灾害。详细的雷达回波、流场分布及雹灾分布等见文献[29]。

选取文献[29]中12:00的探空曲线及风廓线(见图1)作为模式输入量, 采用湿热泡方式启动, 最大扰动位温为2.0°C, 模拟时间为60分钟。图2是模拟的雷达回波图, 雹云回波的最显著特征是强

回波区在第26分钟之前基本上维持在4~5 km高度, 即使在第22分钟地面已经出现降水, 此时的强回波中心仍未下降。第30分钟时, 在云体高层(7 km上下)出现60 dBZ强回波区。此云在较长时间内处于相对稳定发展阶段, 40分钟后雹云逐渐进入消散阶段。

3 模拟结果分析

3.1 冰雹云累积带

模拟到第12分钟时, 在4.5 km高度处云中出现过冷雨水, 此后过冷雨水含量逐渐增加, 到第20分钟时过冷雨水含量达最大, 为7.53 g/m³, 此时的过冷雨水含量中心仍在4.5 km高度, 略高于0°C层高度。而第12分钟时, 最大上升气流位于4.5 km高度, 最大上升气流速度的位置随时间逐渐抬升, 到第19分钟时最大上升气流为9.07 m/s, 位于6.0 km高度处, 第29分钟时最大上升气流达到最大, 为19.96 m/s, 位于8.5 km高度处, 此处的温度为-26.28°C。表1给出了过冷雨水含量最大值、最大上升气流及其位置的分布情况。从表1中可看出, 第12~15分钟过冷雨水含量与上升气流最大值的位置处于同一高度, 第15分钟之后, 过冷雨水含量最大值的位置都在上升气流最大值以下。根据Sulakvelidze对累积带的定义^[2, 4], Mun90630雹云中不存在过冷雨水“累积带”, 但雹云中的确存在着大量过冷雨水。图3是13~22分钟过冷雨水和垂直上升气流及温度的分布。从图3上也能反映, 在最大垂直上升气流区存在着过冷雨水。因此, 该例雹云中虽然不存在Sulakvelidze经典理论的“累积带”, 但在主上升气流区周围存在过冷雨水区, 这与实际雷达观测的分析结果一致。

3.2 冰雹胚胎

图4、5是模拟云中冻滴和霰的含水量及雨水和温度随时间的变化。在第24分钟时, 冻滴和霰的最大含水量都达到了2 g/m³; 在第36分钟以前, 云中冻滴和霰的含量基本相当, 第36分钟后霰的含水量大于冻滴的含水量, 也就是说, 该例雹云的环境对冻滴和霰的产生都是非常有利的。

冰雹是冻滴和霰长大的结果, 在模拟的60分钟内, 冰雹总量为269009.4 t, 其中冻滴转化成雹(CNfh, 文中符号的物理意义见表2)的质量为93299.2 t, 占冰雹总量的35%; 霰转化成雹

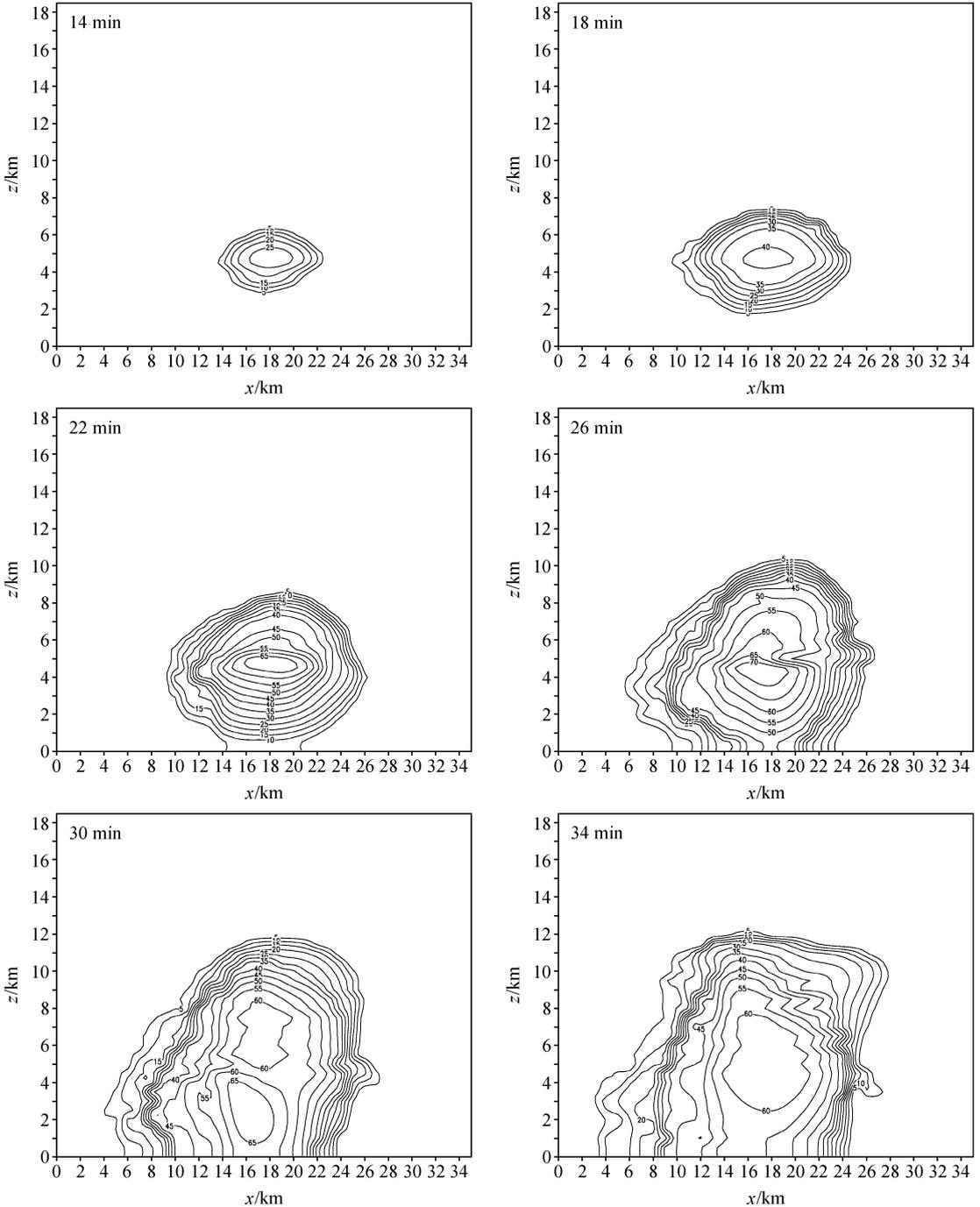


图2 模拟的 Mun90630 雹云雷达回波 (单位: dBZ) 在 $y=18$ km 处的垂直剖面
Fig. 2 The $x-z$ vertical sections of simulated radar echo (dBZ) at $y=18$ km

(CNgh) 的质量为 104246.3 t, 占冰雹总量的 39%。从数量上看, 冰雹总数 (TNh) 为 $10^{12.3}$ 个, 其中霰转化成雹的个数 (TNCNgh) 为 $10^{12.06}$ 个, 占 57.5%; 冻滴转化成雹的个数 (TNCNfh) 为 $10^{11.93}$ 个, 占 42.5%。作为冰雹胚胎的霰和冻滴对

冰雹的贡献基本相同。

霰转化成雹的效率 (TNCNgh/TNg) 为 0.01%, 也就是说大约 10000 个霰粒中才有一个长大成雹; 冻滴转化成雹的效率 (TNCNfh/TNf) 为 0.13%, 即 10000 个冻滴中约有 13 个冻滴可以长

表 1 过冷雨水含量最大值、最大上升气流及其位置

Table 1 The maximums of supercooled rainwater content, vertical velocity and their positions

时间/min	上升气流				过冷雨水			
	最大值 / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	位置 (格点)	高度/km	温度/ $^{\circ}\text{C}$	最大含量/ $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	位置 (格点)	高度/km	温度/ $^{\circ}\text{C}$
12	5.68	19, 19	4.5	-0.73	0.13	19, 19	4.5	-0.73
13	6.26	20, 19	4.5	-0.56	0.53	19, 19	4.5	-0.59
14	6.81	19, 18	4.5	-0.51	1.53	19, 18	4.5	-0.51
15	7.37	19, 19	5.0	-3.25	2.92	19, 19	5.0	-3.25
16	7.87	20, 19	5.0	-3.22	4.34	19, 19	4.5	-0.66
17	8.27	19, 19	5.5	-6.20	5.64	19, 19	4.5	-0.70
18	8.73	19, 19	5.5	-6.15	6.54	19, 19	4.5	-0.69
19	9.09	20, 19	6.0	-9.28	7.29	19, 19	5.0	-3.42
20	9.77	18, 18	4.5	0.05	7.53	19, 18	4.5	-0.13
21	10.67	18, 18	5.5	-4.94	6.82	18, 19	4.5	-0.09
22	12.28	19, 19	6.5	-11.34	4.97	17, 19	4.5	-0.06
29	19.96	18, 18	8.5	-26.28	0.54	19, 18	8.0	-23.27

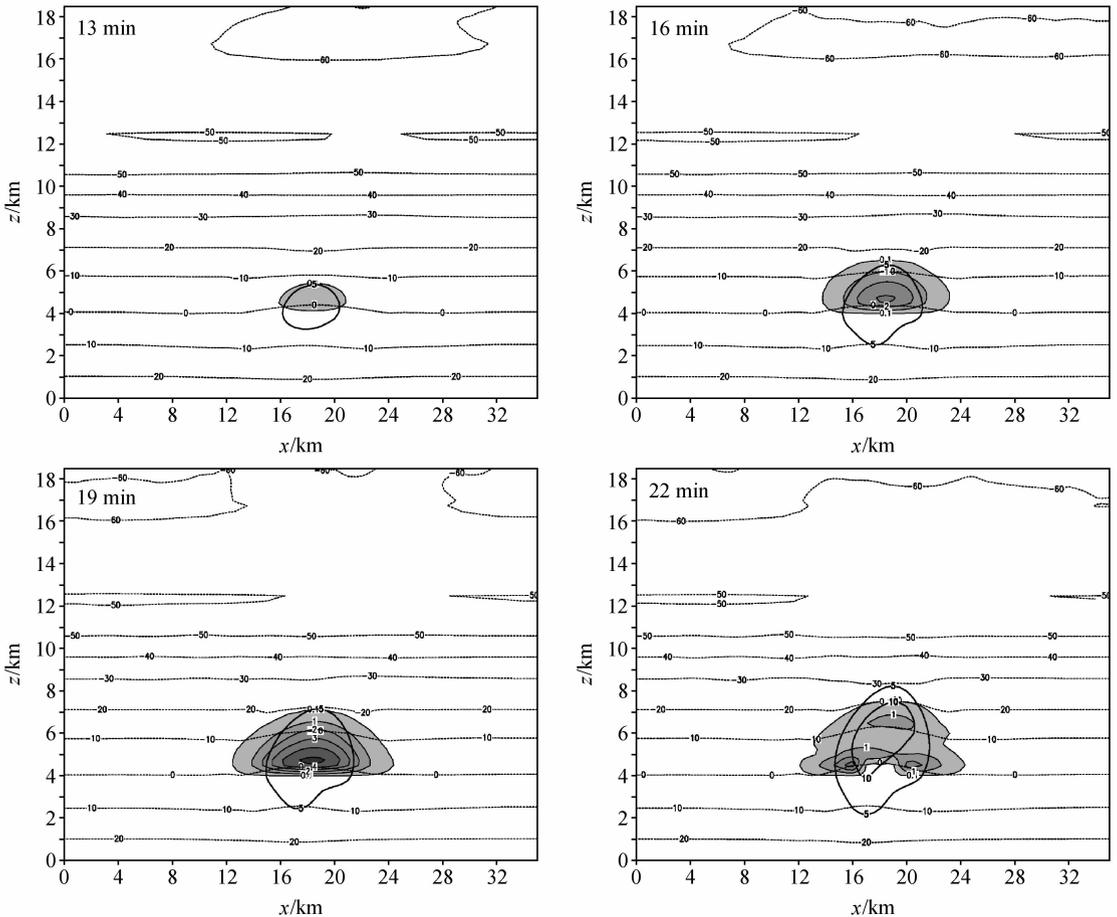


图 3 13~22 分钟过冷雨水和垂直上升气流及温度在 $y=18 \text{ km}$ 处的垂直剖面。阴影区是过冷雨水含量，等值线间隔是 1 g/m^3 ；实线是垂直上升气流，等值线间隔是 5 m/s ；虚线是温度，等值线间隔是 10°C

Fig. 3 The $x-z$ vertical sections of supercooled rainwater content (shaded area, contour interval is 1 g/m^3), vertical velocity (solid line, contour interval is 5 m/s) and temperature (dotted line, contour interval is 10°C) at $y=18 \text{ km}$

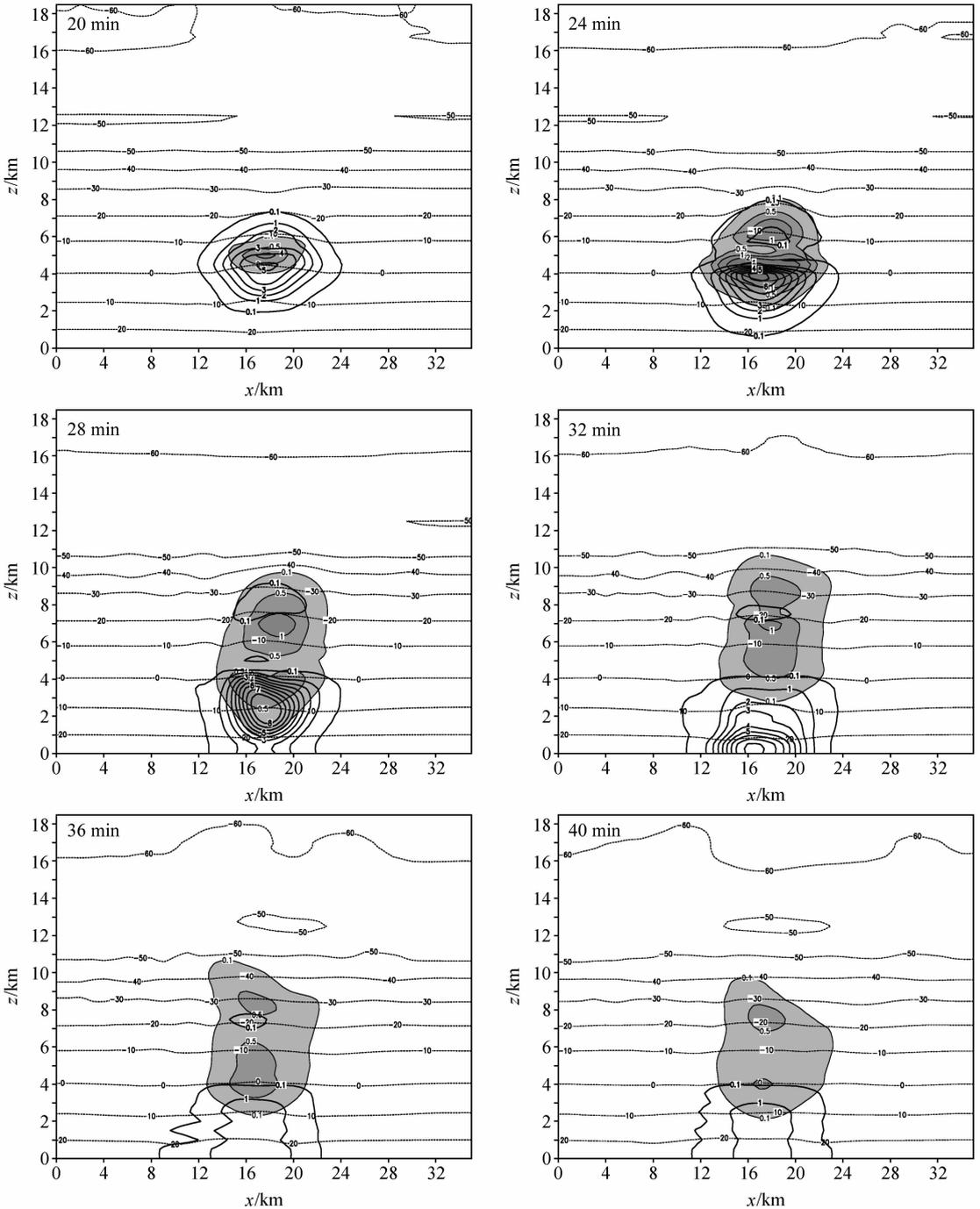


图4 模拟云中冻滴含水量(阴影区, g/m^3)及雨水(实线, g/m^3)和温度(虚线, $^{\circ}\text{C}$)在 $y=18\text{ km}$ 处的垂直剖面随时间的变化
Fig. 4 The $x-z$ vertical sections of frozen droplet water content (shaded area, g/m^3), rainwater content (solid line, g/m^3) and temperature (dotted line, $^{\circ}\text{C}$) at $y=18\text{ km}$

大成雹,可见冻滴转化成雹的效率是霰转化成雹的13倍。

从冰雹的产生情况来看,图6是冰雹产生率及其源项随时间的变化曲线,虽然图中RCNfh的峰值高于RCNgh,但60分钟内的总量TCNfh和

TCNgh是相当的,也说明该例雹云中冰雹胚胎既有冻滴也有霰,并且二者相当。

3.3 冰雹形成机制

雹云内首先产生的是冰晶,其次是雪,模拟云在第11分钟时有霰产生,第12分钟开始有冻滴和

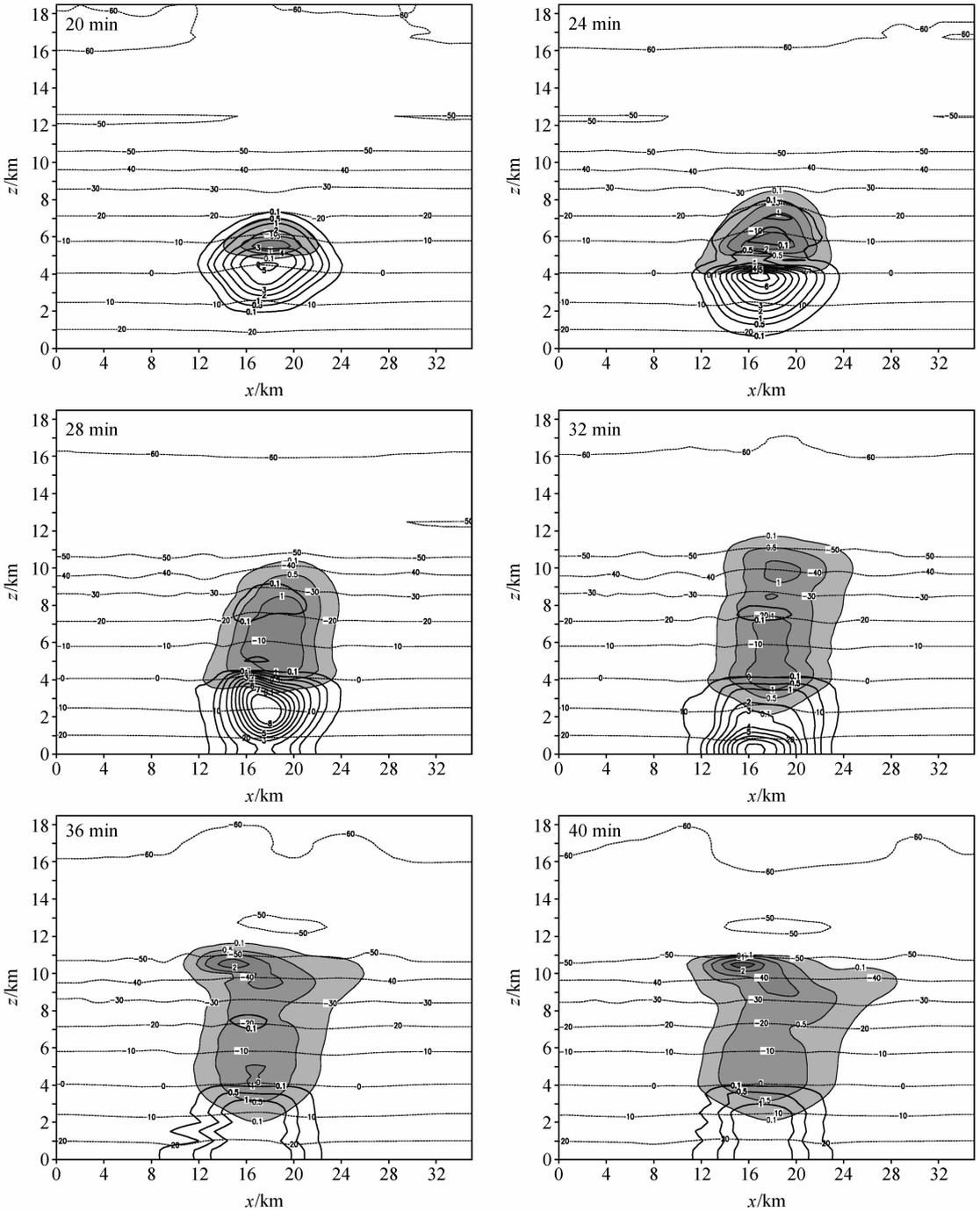


图 5 模拟云中霰含水量 (阴影区, g/m^3) 及雨水 (实线, g/m^3) 和温度 (虚线, $^{\circ}C$) 在 $y=18$ km 处的垂直剖面随时间的变化

Fig. 5 As in Fig. 4 except for graupel water content

冰雹出现。图 7 是云水 (Q_c)、雨水 (Q_r)、过冷雨水 (Q_{r0})、冻滴 (Q_f)、霰 (Q_g) 和冰雹 (Q_h) 产生总量随时间的变化。其中, 过冷雨水最大值出现在第 20 分钟; 雨水第一峰值出现在第 21 分钟, 第二峰值出现在第 30 分钟; 冻滴最大值出现在第 25 分

钟; 霰随时间不断增加, 第 54 分钟时达到最大; 第 16 分钟出现冰雹, 冰雹最大值出现在第 28 分钟, 第 29 分钟地面出现降雹, 以后冰雹总量开始逐渐减小。因此, 下面根据第 12、20、30、50 分钟的微物理过程量分析冰雹的形成和增长。

表 2 文中各符号的物理意义

Table 2 Definitions of symbols used in the text

符号	物理意义	符号	物理意义
VDvi	冰晶的凝华过程	CLrsg	雪和雨水撞冻形成雪或霰
VDvs	雪的凝华过程	CLrf	冻滴撞冻雨水
VDvf	冻滴的凝华过程	CLrg	霰撞冻雨水
VDvg	霰的凝华过程	CLrh	雹撞冻雨水
VDrv	雨滴的凝结过程	CLis	雪撞冻冰晶
NUvi	自然冰核活化形成初始冰晶	CLif	冻滴撞冻冰晶
NUrf	过冷雨滴异质核化冻结成冻滴	CLig	霰撞冻冰晶
NUrg	过冷雨滴异质核化冻结成霰	CLih	雹撞冻冰晶
Pci	冰晶繁生过程	CLsh	雹撞冻雪
CLci	冰晶结淞增长	CLfh	雹撞冻冻滴
CLcs	雪撞冻云水	CLgh	雹撞冻霰
CLcf	冻滴撞冻云水	CNis	冰晶自动转化成雪
CLcg	霰撞冻云水	CNig	冰晶转化成霰
CLch	雹撞冻云水	CNsg	雪转化成霰
CLris(g)	冰晶撞冻雨滴形成雪或霰	CNfh	冻滴转化成雹
CLrif	冰晶和雨水撞冻形成冻滴	CNgh	霰转化成雹

注：符号前加 T 表示总量，加 N 表示浓度，加 R 表示产生率。

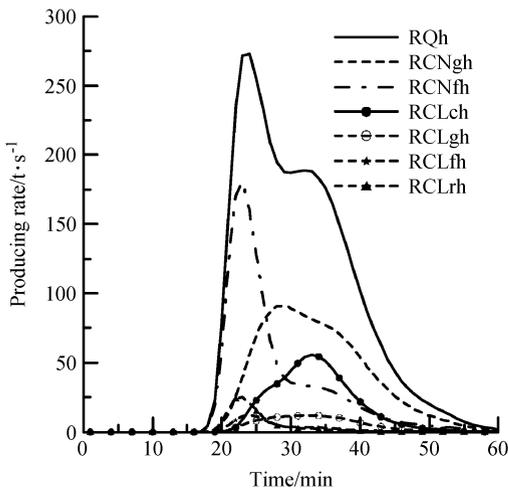


图 6 Mun90630 冰雹产生率及其源项随时间的变化
Fig. 6 The time evolution of mass producing rate of hailstone and its sources

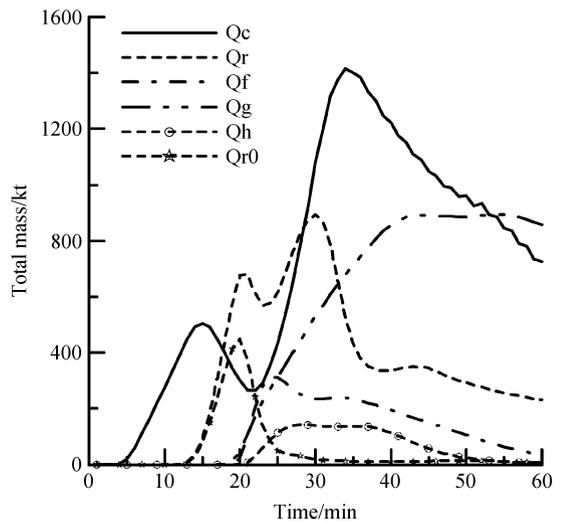


图 7 Mun90630 雹云中水成物总量随时间的变化
Fig. 7 The time evolution of total mass of various water substances

3. 3. 1 冰晶的形成过程

冰晶的产生有两个过程：自然冰核核化 (NUvi) 和冰晶繁生 (Pci)，冰晶的增长也有两个过程：冰晶碰并云水 (CLci) 长大和冰晶凝华增长 (VDvi) (见表 3)。第 12 分钟时主要通过核化过程产生冰晶，冰晶的数量为 $10^{10.15}$ 个。第 20 分钟时冰晶总数为 $10^{14.21}$ 个，主要来自于 Pci，其次 NUvi，冰晶碰并云水增长量为 0.6 t，凝华增长量为 0.2 t。第

30 分钟时冰晶总数为 $10^{18.41}$ 个，其中自然冰核核化产生冰晶 $10^{18.41}$ 个，冰质粒撞冻过冷却云滴引起的冰晶繁生 $10^{15.36}$ 个；冰晶总质量为 18.7 t，其中自然冰核核化产生冰晶 2.4 t，占 12.6%，冰晶凝华增长量为 14.8 t，占 78.9%。第 50 分钟时冰晶总数增加到 $10^{20.53}$ 个，其中自然冰核核化产生冰晶 $10^{20.53}$ 个，冰质粒撞冻过冷却云滴引起的冰晶繁生 $10^{15.86}$ 个；

表 3 冰晶及水成物转换总量

Table 3 Total mass of ice crystal and water substances transformed

时间/min	(TQi/t)/TNi	(TNUvi/t)/TNNUvi	(TPei/t)/TNPei	TCLci/t	TVDvi/t
12	0.1/10 ^{10.15}	0.0/10 ^{10.15}	0.0/10 ^{0.00}	0.0	0.0
20	0.8/10 ^{14.21}	0.0/10 ^{12.42}	0.0/10 ^{14.20}	0.6	0.2
30	18.7/10 ^{18.41}	2.4/10 ^{18.41}	0.0/10 ^{15.36}	1.6	14.8
50	637.8/10 ^{20.53}	151.9/10 ^{20.53}	0.0/10 ^{15.86}	3.1	482.7

注：TQi 表示冰晶产生的质量，TNi 表示冰晶产生的数量，TNUvi 表示自然冰核核化产生的冰晶质量，TNNUvi 表示自然冰核核化产生冰晶的数量。

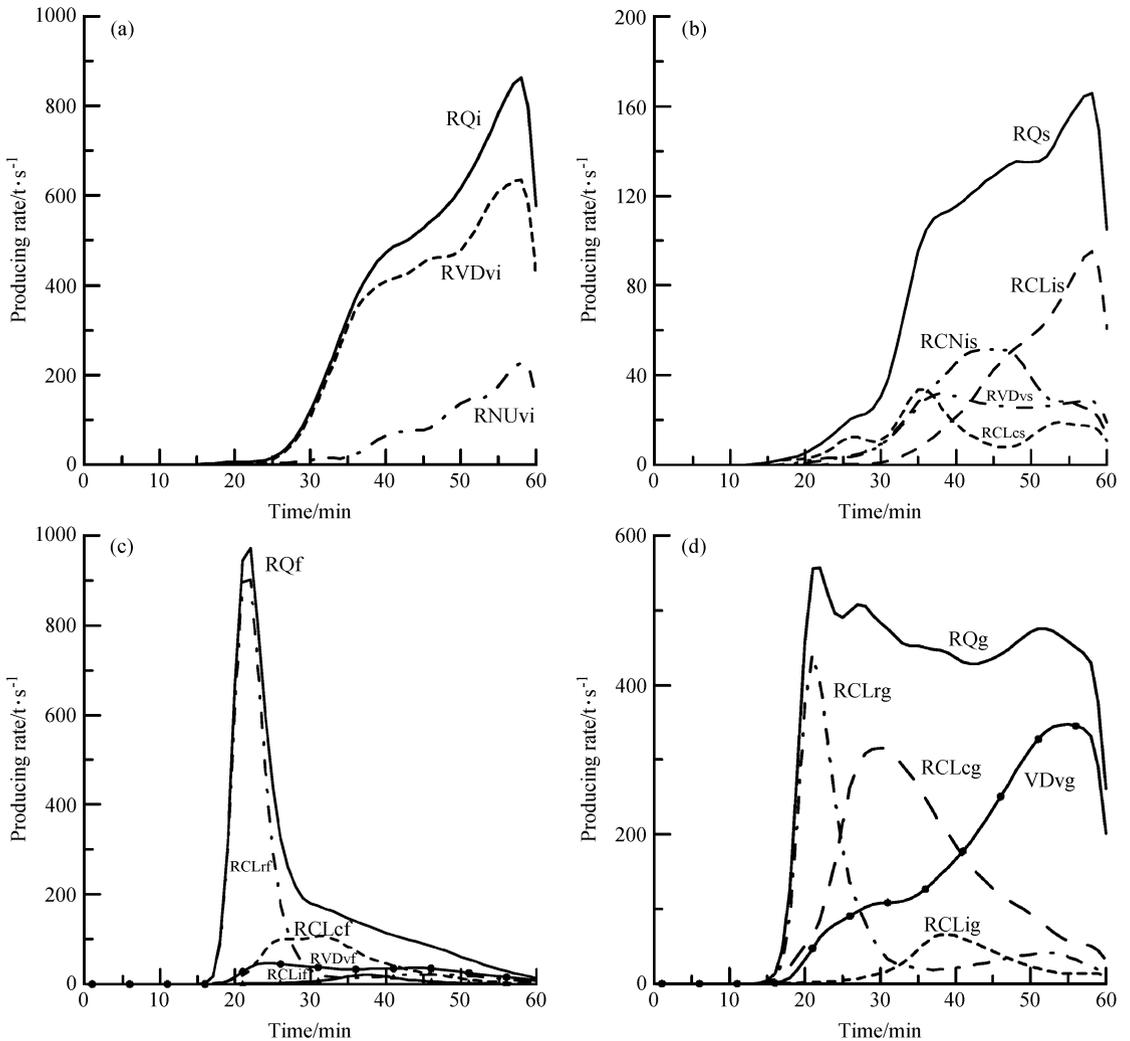


图 8 冰晶 (a)、雪 (b)、冻滴 (c) 和霰 (d) 质量产生率及其源项随时间的变化

Fig. 8 The time evolutions of mass producing rates of ice crystal (a), snowflake (b), frozen droplet (c), and graupel (d) and their sources

冰晶总质量为 637.8 t，其中自然冰核核化产生冰晶 151.9 t，占 23.8%，冰晶凝华增长量为 482.7 t，占 75.7%。

因此，在雹云形成初期，冰晶通过核化过程和繁生过程产生，通过碰并云水过程和凝华过程增

长。在雹云的整个模拟过程中，冰晶主要是由自然冰核核化过程产生，以凝华增长为主。

图 8a 是冰晶产生率随时间的变化，RQi 是冰晶质量产生率，RVDvi 是冰晶的凝华增长率，RNUvi 是自然冰核核化产生率。从图 8 中也可看

出, RVD_{vi} 和 RNU_{vi} 对 RQ_i 的贡献最大。

3.3.2 雪的形成过程

雪主要来自于冰晶向雪的转化 (CN_{is}), 冰晶聚并的贡献很小 (见表 4)。第 20 分钟时, 雪的总数 (TN_s) 为 $10^{13.15}$ 个, 主要来自于 CN_{is}; 第 30 分钟时, 雪的总数为 $10^{14.85}$ 个, 其中冰晶自动转化成雪 $10^{14.85}$ 个, 此时雪的总量 (TQ_s) 为 10.5 t, 其中冰晶自动转化成雪 2.4 t, 占 22.9%, 雪撞冻云滴生长量 (CL_{cs}) 为 5.6 t, 占 53.4%, 雪花凝结生长量 (VD_{vs}) 为 2.3 t, 占 22.2%, 雪撞冻冰晶生长量 (CL_{is}) 和冰晶相互碰并 (CL_{ii}) 产生雪的量较小 (表中未列出); 第 50 分钟时雪的总数为 $10^{16.38}$ 个, 其中冰晶自动转化成雪 $10^{16.38}$ 个, 此时雪的总量为 137.8 t, 其中冰晶自动转化成雪 49.3 t, 占 35.7%, 雪撞冻云滴生长量为 26.2 t, 占 19.0%, 雪花凝结生长量为 34.1 t, 占 24.7%, 雪撞冻冰晶生长量为 28.2 t, 占 20.5%, 冰晶相互碰并产生雪的量较小。

可见, 在第 30~50 分钟时间内, 雪捕获冰晶的增长量逐渐增大。这由图 8b 也可看出 (图中 RQ_s 是雪的质量产生率), 而雪撞冻云滴的生长量是起伏的, 在第 35 分钟时有一峰值, 第 35~45 分钟时雪撞冻云滴生长量是减小的。

3.3.3 冻滴的形成过程

冻滴主要由过冷雨滴核化 (NU_{rf}) 和冰晶与过冷雨水撞冻 (CL_{rif}) 产生 (表 5)。第 20 分钟时冻滴的总数为 $10^{14.01}$ 个, 主要来自于 CL_{rif}, 其次是 NU_{rf}; 冻滴的增长主要通过冻滴与雨水的撞冻

(CL_{rf}) 过程, 这也就是说, 虽然该例雹云中不存在累积带, 但只要有充分的过冷雨水, 仍然可产生大量冻滴, 并为冻滴的增长提供有利条件, 为冰雹的产生提供胚胎。

第 30 分钟时冻滴个数为 $10^{14.61}$ 个, 其中过冷雨滴异质核化冻结产生冻滴 (NU_{rf}) 的个数为 $10^{14.16}$ 个, 占 35%, 冰晶收集雨水转化成冻滴 (CL_{rif}) 的个数为 $10^{14.42}$ 个, 占 65%。冻滴主要来源于冰晶收集过冷雨水转化成冻滴的过程和雨水核化产生冻滴的过程; 冻滴质量为 364.9 t, 其中 NU_{rf} 为 2.1 t, 占 0.57%, 冻滴凝华 (VD_{vf}) 为 24.8 t, 占 7%, 冻滴总量主要来源于冻滴的增长量。冻滴撞冻冰晶 (CL_{if}) 增长量为 1.6 t, 占 0.44%, 冻滴撞冻云水 (CL_{cf}) 增长量为 41.3 t, 占 11.3%, 冻滴撞冻雨水 (CL_{rf}) 增长量为 294.6 t, 占 80.7%, CL_{rif} 为 0.6 t, 占 0.15%。撞冻雨水增长是冻滴增长的主要方式, 其次是撞冻云水增长。

第 50 分钟时冻滴的产生和增长过程与第 30 分钟时一致。

可见, 冻滴质量增加主要靠撞冻雨水增长, 过冷雨水的存在是冻滴增长的一个重要因素。

比较表 5 中各时刻的碰并增长量, 有 $TCL_{rf} > TCL_{cf} > TVD_{vf}$, 由图 8c 也可看出这种规律, 就是说, 冻滴产生靠 NU_{rf} 和 CL_{rif} 过程, 增长主要靠 CL_{rf} 过程, 都是消耗过冷雨水的过程。这些过程, 尤其是冻滴产生和增长的过程, 都与过冷雨水存在的时段 (20 分钟附近) 相一致。

表 4 雪及水成物转换总量

Table 4 Total mass of snow and water substances transformed

时间/min	(TQ _s /t)/TN _s	(TCN _{is} /t)/TNCN _{is}	TCL _{cs} /t	TCL _{is} /t	TVD _{vs} /t
12	0.0/10 ^{9.87}	0.0/10 ^{9.87}	0.0	0.0	0.0
20	0.8/10 ^{13.15}	0.1/10 ^{13.15}	0.7	0.0	0.0
30	10.5/10 ^{14.85}	2.4/10 ^{14.85}	5.6	0.1	2.3
50	137.8/10 ^{16.38}	49.3/10 ^{16.38}	26.2	28.2	34.1

表 5 冻滴及水成物转换总量

Table 5 Total mass of frozen droplets and water substances transformed

时间/min	(TQ _f /t)/TN _f	(TCL _{rif} /t)/TNCL _{rif}	(TNU _{rf} /t)/TNNU _{rf}	TCL _{if} /t	TCL _{cf} /t	TCL _{rf} /t	TVD _{vf} /t
12	0.0/10 ^{3.79}	0.0/10 ^{1.06}	0.0/10 ^{3.79}	0.0	0.0	0.0	0.0
20	18.0/10 ^{14.01}	0.1/10 ^{14.00}	0.0/10 ^{12.20}	0.0	0.8	16.6	0.5
30	364.9/10 ^{14.61}	0.6/10 ^{14.42}	2.1/10 ^{14.16}	1.6	41.3	294.6	24.8
50	506.4/10 ^{14.76}	0.6/10 ^{14.47}	3.1/10 ^{14.45}	15.9	99.3	320.6	66.9

表6 霰及水成物转换总量

Table 6 Total mass of graupel particles and water substances transformed

时间/min	(TQg/t)/ TNg	(TCNig/t)/ TNCNig	(TCNsg/t)/ TNCNsg	(TNUrg/t)/ TNNUrg	(TCLrig/t)/ TNCLrig	TCLig/t	TCLcg/t	TCLrg/t	TVDvg/t
12	0.0/10 ^{8.34}	0.0/10 ^{0.00}	0.0/10 ^{8.32}	0.0/10 ^{6.90}	0.0/10 ^{4.72}	0.0	0.0	0.0	0.0
20	29.6/10 ^{14.18}	0.2/10 ^{12.39}	0.2/10 ^{12.04}	0.0/10 ^{12.15}	0.0/10 ^{14.17}	0.4	5.7	21.1	1.9
30	335.6/10 ^{15.24}	0.4/10 ^{12.86}	1.6/10 ^{13.45}	6.8/10 ^{15.13}	0.0/10 ^{14.51}	3.8	114.9	157.0	51.1
50	931.1/10 ^{15.94}	0.4/10 ^{12.86}	2.1/10 ^{13.68}	48.3/10 ^{15.90}	0.1/10 ^{14.92}	56.8	361.0	196.3	266.1

3.3.4 霰的形成过程

不同时刻霰及其他水成物转换总量列于表6中。在第12分钟时,霰主要由雪的转化产生(CNsg),到第20分钟时霰的总数为 $10^{14.18}$ 个,主要来自于冰晶接触过冷雨水产生霰的过程(CLrig),其次是冰晶向霰的自动转化(CNig),再次是过冷雨水的异质核化冻结(NUrg),雪自动转化成霰的量最小;霰的增长主要通过霰撞冻雨水(CLrg)过程,其次是霰撞冻云水(CLcg)和霰的凝华过程(VDvg)。这也同样说明,尽管该例雹云中不存在过冷雨水累积带,但只要有充分的过冷雨水,同样可产生大量的霰,并为霰的增长提供了条件。

第30分钟时霰的总个数: $10^{15.24}$ 个,其中冰晶自动转化成霰CNig的个数为 $10^{12.86}$ 个,占0.42%,雪自动转化成霰CNsg的个数为 $10^{13.45}$ 个,占1.62%,过冷雨滴异质核化冻结成霰NUrg的个数为 $10^{15.13}$ 个,占77.62%,冰晶收集过冷雨水产生霰CLrig的个数为 $10^{14.51}$ 个,占18.62%。霰主要来自过冷雨滴异质核化冻结成霰的过程。此时,霰的总量为335.6 t,其中CNig为0.4 t,占总量的0.11%;CNsg为1.6 t,占总量的0.46%;VDvg为51.1 t,占15%;NUrg为6.8 t,占2%。这些过程量仅占霰总量的18%。霰的增长量CLig为3.8 t,占1%;CLcg为114.9 t,占34%;CLrg为157.0 t,占47%。霰的撞冻增长过程量占霰总量的82%。这也就是说前30分钟,霰主要来自过冷雨滴异质核化冻结NUrg,并靠撞冻雨水CLrg和云水CLcg生长。

第50分钟时,霰的总数为 $10^{15.94}$ 个,其中过冷雨滴异质核化冻结成霰NUrg的个数为 $10^{15.90}$ 个,占91%,冰晶收集过冷雨水产生霰CLrig的个数为 $10^{14.92}$ 个,占9.6%。霰主要来自过冷雨滴异质核

化冻结成霰的过程;霰的总量为931.1 t,其中VDvg为266.1 t,占28.6%,NUrg为48.3 t,占5.2%,这些过程量占霰总量的34%;霰的增长量CLig为56.8 t,占6.1%,CLcg为361.0 t,占38.8%,CLrg为196.3 t,占21.1%,霰的增长过程量占霰总量的66%。这与30分钟时的情况是一致的。

从图8d中也能看出RCLrg和RCLcg过程对RQg的贡献较大,撞冻过冷雨水增长的过程主要发生在过冷雨水存在期间,在雹云发展后期,RVDvg的贡献增大。

3.3.5 冰雹的形成过程

不同时刻冰雹及其他水成物转换总量列于表7中。冰雹最初是由霰长大产生,到第20分钟时,冰雹总数为 $10^{9.61}$ 个,主要来自于冻滴长大成雹(CNfh),其次是霰长大成雹(CNgh);冻滴自动转化成雹的质量也最大,其次是霰的自动转化,冰雹胚胎有霰和冻滴两种。另外,雹块还通过撞冻过冷雨水长大。

第30分钟时冰雹总数为 $10^{12.01}$ 个,其中冻滴转化成冰雹(冻滴胚) $10^{11.77}$ 个,占60%,霰转化成冰雹(霰胚) $10^{11.63}$ 个,占40%。此时冰雹总质量为138.3 t,其中冻滴自动转化成雹的总量为69.8 t,占50%,霰自动转化成雹的总量为38.4 t,占28%,其余22%为冰雹碰并冰晶、雪、云水、雨水、冻滴和霰的增长量(CLih、CLsh、CLch、CLrh、CLfh和CLgh)。

第50分钟时,冰雹总数为 $10^{12.29}$ 个,其中冻滴转化成冰雹(冻滴胚) $10^{11.93}$ 个,占43.7%,霰转化成冰雹(霰胚) $10^{12.04}$ 个,占56.3%。在第30~50分钟的20分钟内,冻滴转化成雹的比例减小,而霰转化成雹的比例增加。此时冰雹总质量为263.9 t,其中冻滴自动转化成雹的总量为91.9 t,

表7 冰雹及水成物转换总量

Table 7 Total mass of hailstone and water substances transformed

时间/min	(TQh/t)/TNh	(TCNgh/t)/TNCNgh	(TCNfh/t)/TNCNfh	TCLih/t	TCLch/t	TCLsh/t	TCLgh/t	TCLfh/t	TCLrh/t
12	0.0/10 ^{0.24}	0.0/10 ^{0.24}	0.0/10 ^{0.00}	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
20	0.5/10 ^{9.61}	0.0/10 ^{8.54}	0.4/10 ^{9.57}	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
30	138.3/10 ^{12.01}	38.4/10 ^{11.63}	69.8/10 ^{11.77}	0.0	11.6	0.0	4.3	4.9	9.2
50	263.9/10 ^{12.29}	101.1/10 ^{12.04}	91.9/10 ^{11.93}	0.1	41.1	0.2	12.2	6.6	10.6

占34.8%，霰自动转化成雹的总量为101.1 t，占38.3%，其余26.9%为冰雹碰并冰晶、雪、云水、雨水、冻滴和霰的增长量。

由图6也可看出，冻滴胚和霰胚都对冰雹有相当的贡献，但在雹云发展的不同阶段贡献也不同，在第27分钟以前，冻滴胚多于霰胚，此后霰胚多于冻滴胚。同时从图6还可看到，在第25分钟以前，冰雹碰并雨水(RCLrh)过程使得雹块具有一定的增长量，而雹碰并云水增长量(RCLch)最大。

3.3.6 过冷雨水的消耗

雨水消耗有过冷雨滴异质核化冻结成冻滴(NUrf)、过冷雨滴异质核化冻结成霰(NUrg)、霰撞冻雨水(CLrg)、冻滴撞冻雨水(CLrf)、雹撞冻雨水(CLrh)、冰晶和雨水撞冻形成冻滴(CLrif)、冰晶撞冻雨滴形成霰(CLrig)和雨滴的凝结(VDrv)等八个过程，模拟云在前20和30分钟内各过程总量列于表8中(VDrv是暖云微物理过程，在这里没有列出)。

由此可见，无论是在前20分钟还是30分钟内，CLrg和CLrf都是二个消耗雨水的主要过程，二者消耗的雨水之和各占雨水消耗总量的99.6%和96.0%。

在第20和30分钟，各过程的雨水消耗率列于表9中。在第20分钟时，CLrg和CLrf共占雨水消耗率的99%，结合图6，说明在前20分钟内过冷雨水主要被冻滴和霰的碰并增长所消耗。在第30分钟时，CLrg和CLrf共占雨水消耗率的94%，此外CLrh所占比例明显增加。

通过以上对各微物理过程量的分析，归纳出该例雹云中冰雹形成的可能机制为：

首先，冰晶是由水汽核化(NUvi)过程和冰晶繁生(Pci)过程产生，通过撞冻云水(CLci)和凝华过程(VDvi)长大；雪主要通过冰晶向雪的自动转化(CNis)，雪的增长主要通过雪碰并云水的过

表8 在前20和30分钟内各过程消耗雨水量及占雨水消耗总量的百分比

Table 8 The mass of consumed rainwater and percentage of consumed rainwater for each process to total consumed rainwater prior to 20 min and 30 min

过程	20 min		30 min	
	消耗量/t	百分比(%)	消耗量/t	百分比(%)
NUrf	3.8	0.01	2069.3	0.44
NUrg	0.3	0.00	6750.8	1.44
CLrg	21145.8	55.77	157003.0	33.39
CLrf	16614.8	43.82	294577.1	62.64
CLrh	10.3	0.27	9210.4	1.96
CLrif	111.8	0.29	553.9	0.12
CLrig	30.4	0.08	70.8	0.02
总计	37917.2	100	470235.3	100

表9 在第20和30分钟各过程的雨水消耗率及占雨水总消耗率的百分比

Table 9 The rainwater consumption rate and percentage of consumed rainwater for each process to total consumed rainwater at 20 min and 30 min

过程	20 min		30 min	
	消耗率(t/s)	百分比(%)	消耗率(t/s)	百分比(%)
NUrf	0.11	0.01	0.76	0.94
NUrg	0.00	0.00	1.25	1.55
CLrg	372.09	37.30	43.49	53.87
CLrf	616.81	61.83	32.01	39.65
CLrh	7.00	0.70	3.12	3.86
CLrif	1.39	0.14	0.07	0.09
CLrig	0.19	0.02	0.03	0.04
总计	997.59	100	80.73	100

程(CLcs)；霰主要通过四个过程形成：冰晶接触过冷雨水(CLrig)、冰晶自动转化(CNig)、雨水核化(NUrg)和雪自动转化(CNsg)，霰主要通过撞冻过冷雨水(CLrg)增长；冻滴由冰晶接触过冷雨滴冻结(CLrif)和雨滴核化(NUrf)产生，通过撞冻过冷雨水增长(CLrf)为主；冰雹的产生主要是冻滴

和霰长大后自然转化成雹 (CNfh 和 CNgh), 在冰雹产生和总量达到最大值前后, 无论从数量上还是质量上 CNfh 都大于 CLgh。由于霰一直是不断产生的过程, 在整个模拟时间内, 霰自动转化成雹的数量和质量都大于冻滴自动转化成雹的量, 霰胚和冻滴胚各占冰雹胚胎的 39% 和 35%。雹块的增长主要通过雹撞冻雨水和云水长大, 在湿环境下还通过撞冻冻滴和霰长大。

因此, 虽然该例雹云中不存在经典理论中的过冷雨水“累积带”, 但在适量的冰晶和雪产生后, 由于云中有着丰富的过冷雨水, 仍然会形成冰雹。

4 小结

综合以上对 1990 年 6 月 30 日德国慕尼黑雹云的分析, 可以得到以下结论:

(1) 慕尼黑雹云不存在 Sulakvelidze 定义的过冷雨水“累积带”, 但存在与上升气流配合很好的过冷雨水区, 过冷雨水含量很大。

(2) 过冷雨水区对冰雹胚胎的产生和增长以及雹块的增长都是十分重要的, 撞冻过冷雨水增长是雹胚增长的主要方式。

(3) 在雹云发展的不同阶段, 冰雹胚胎的形成和增长过程是不同的, 冰雹的形成机制也不一样。

(4) 冰雹胚胎既有冻滴也存在霰, 作为雹胚的这二种粒子在数量上相差不大。

此外, 通过与文献[27]和[28]的结果比较, 发现旬邑的冰雹云中冰雹胚胎主要是冻滴, 雹云中存在着累积带, 且累积带中的过冷雨水对雹胚的产生非常有利; 玛曲的冰雹云中, 冰雹胚胎主要是霰, 累积带存在但较弱, 对冰雹的生长不起主要作用; 德国慕尼黑的冰雹云中既有冻滴也有霰, 且数量相当, 雹云中不存在过冷雨水累积带。对于这三种不同类型的冰雹云, 催化防雹的方法也不应相同, 这还需要今后做进一步研究。

致谢 感谢黄美元研究员对本工作提出的建议和指导。

参考文献 (References)

- [1] 黄美元, 王昂生, 等. 人工防雹导论. 北京: 科学出版社, 1980. 92~104, 156~162
Huang Meiyuan, Wang Angsheng et al. *Introduction of Hail Suppression* (in Chinese). Beijing: Science Press, 1980. 92~104, 156~162
- [2] Sulakvelidze G K, Bibilashvili N Sh, Lapcheva V F. Formation of Precipitation and Modification of Hail Processes. Translated from Russian by Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem, 1967. 208pp
- [3] Battan L J. Weather modification in the U. S. S. R. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1969, **50**: 924~945
- [4] Sulakvelidze G K. Rainstorms and Hail. Israel Program for Sci. Transl., Jerusalem, 1969. 310pp
- [5] Burtsev I, Gaivoronski I, Kartsivatze A I. Hail Process Investigation and Hail Suppression Activities in the USSR. Proc. WMO/IAMAP Sci. Conf. Weather Modification, Tashkent, WMO, 1974. 189~196
- [6] Knight C A, Foote G B, Summers P W. Results of randomized hail suppression experiment in Northeast Colorado. Part IX: Overall discussion and summary in the context of physical research. *J. Appl. Meteor.*, 1979, **18**: 1629~1639
- [7] Federer B, Waldvogel A, Schmid W, et al. Main results of Grossversuch IV. *J. Climate Appl. Meteor.*, 1986, **25**: 917~957
- [8] Waldvogel A, Klein L, Musil D J, et al. Characteristics of radar-identified big drop zones in Swiss hailstorms. *J. Climate Appl. Meteor.*, 1987, **26**: 861~877
- [9] 徐家骝. 冰雹微物理与成雹机制. 北京: 农业出版社, 1979. 179~207
Xu Jialiu. *Microphysics of Hailstorm and Mechanism of Hailstone Formation* (in Chinese). Beijing: Agriculture Press, 1979. 179~207
- [10] List R, Charlton R B, Buttuls P I. A numerical experiment on the growth and feedback mechanisms of hailstones in a one-dimensional steady-state model cloud. *J. Atmos. Sci.*, 1968, **25**: 1061~1074
- [11] Srivastava R C. A study of the effect of precipitation on cumulus dynamics. *J. Atmos. Sci.*, 1967, **24**: 36~45
- [12] Wisner C, Orville H D, Myers C. A numerical model of a hail-bearing cloud. *J. Atmos. Sci.*, 1972, **29**: 1160~1181
- [13] Danielsen E F, Bleck R, Morris D A. Hail growth by stochastic collection in a cumulus model. *J. Atmos. Sci.*, 1972, **29**: 135~155
- [14] Browning K A, Ludlam F H, Macklin W C. The density and structure of hailstone. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1963, **89**: 75~84
- [15] Takahashi T. Hail in an axisymmetric cloud model. *J. Atmos. Sci.*, 1976, **33**: 1579~1601
- [16] Orville H D, Kopp F J. Numerical simulation of the life history of a hailstorm. *J. Atmos. Sci.*, 1977, **34**: 1596~1618
- [17] Farley R D, Orville H D. Numerical modeling of hailstorms and hailstone growth. Part I: Preliminary model verification and sensitivity tests. *J. Climate Appl. Meteor.*, 1986, **25**: 2014~2035

- [18] Xu Jia-Liu. Hail growth in a three-dimensional cloud model. *J. Atmos. Sci.*, 1983, **40**: 185~203
- [19] Farley R D, Nguyen P, Orville H D. Numerical simulation of cloud seeding using a three-dimensional cloud model. *J. Wea. Mon.*, 1994, **26**: 113~124
- [20] Holroyd III E W, Heibach J A, Super A B. Observations and model simulation of AgI seeding within a winter storm over UTAH's Wasatch Plateau. *J. Wea. Mon.*, 1995, **27**: 36~56
- [21] Heimbach J A, Hall W D, Super A B. Modeling and observations of valley-released silver iodide during a stable winter storm over the Wasatch Plateau of UTAH. *J. Wea. Mon.*, 1997, **29**: 731~734
- [22] 许焕斌, 段英. 强对流(冰雹)云中水凝物的积累和云水的消耗. *气象学报*, 2002, **60** (5): 575~584
Xu Huanbin, Duan Ying. The accumulation of hydrometeor and depletion of cloud water in strongly convective cloud (hailstorm). *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 2002, **60** (5): 575~584
- [23] 孔凡铀. 冰雹云三维数值模拟研究. 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 1991
Kong Fanyou. Three-dimensional numerical simulation of hailstorms. Ph. D. dissertation (in Chinese), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 1991
- [24] 黄燕, 徐华英. 播撒碘化银粒子进行人工防雹的数值试验. *大气科学*, 1994, **18** (5): 612~622
Huang Yan, Xu Huaying. Numerical experiments on hail suppression by AgI seeding. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (*Scientia Atmospherica Sinica*) (in Chinese), 1994, **18** (5): 612~622
- [25] 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 Meteor. Sinica* (in Chinese), 1998, **56** (6): 641~653
- [26] 周玲, 陈宝君, 李子华, 等. 冰雹云中累积区与冰雹的形成的数值模拟研究. *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
- [27] 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
- [28] 胡朝霞, 齐彦斌, 郭学良, 等. 青藏高原东部冰雹形成机理的数值模拟. *气候与环境研究*, 2007, **12** (1): 73~84
Hu Zhaoxia, Qi Yanbin, Guo Xueliang, et al. Numerical simulation of hail formation mechanism in east of the Tibetan Plateau. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2007, **12** (1): 73~84
- [29] Holler H, Bringi V N, Hubbert J, et al. Life cycle and precipitation formation in a hybrid-type hailstorm revealed by polarimetric and Doppler radar measurements. *J. Atmos. Sci.*, 1994, **51** (17): 2500~2522