

高原东部地区一次雹云成雹过程的数值模拟^①

马 林 赵仕雄 张国庆
(青海省气象科学研究所, 青海省西宁市 810001)

提 要: 本文利用一维半时变双参数积云模式, 对高原东部地区一次西风槽影响下的冰雹天气过程进行了数值模拟。讨论了该雹云内的动力、热力特点以及过冷云滴、冰晶、霰、雹的产生和转化以及降水粒子碰并增长等物理过程。对高原雹云的成雹机制作了初步探讨。

关键词: 高原冰雹; 雹云数值模拟。

1 引 言

关于冰雹云的数值试验研究在我国东部地区已得到开展。胡志晋^[1,2]曾运用一维时变双参数积云模式对我国张家口地区的雹云进行了数值模拟。结果表明降水是由暖雨过程开始的, 降水粒子主要通过碰并与撞冻过程长大, 而贝吉龙过程处于次要地位。然而高原东部地区雹云的成雹过程有什么特点, 其降水粒子是怎样相互转化的, 维持这些转化的动力和热力场都有什么特征? 弄清这些问题对于研究高原冰雹的规律是非常重要的。

本文利用上述一维时变双参数积云模式, 对高原东部地区一次西风槽影响下的冰雹过程进行了数值模拟。讨论了这次雹云的动力热力结构及其成雹的微物理过程。考虑到高原的实际情况, 对原模式的若干参数做了修改, 其中包括湍流交换系数 (K 取 200)、湍流挟卷与动力挟卷之比 (C_A 取 0.1)、初始云滴谱特征值 (Nb/Db 取 800) 等。资料取自西宁 1970 年 5 月 10 日 07 时 (北京时) 的实时探空资料, 计算前将探空资料按统计相关法进行了订正^[3]。还考虑到高原东部地区地形复杂、热力作用不均以及过去对高原雹云实测资料的分析结果^[4], 在模式中取初始垂直扰动速度 $w = 4.0 \text{ m/s}$, 初始云半径 $R = 4\text{km}$, 地表温度扰动在积分开始后由 0.5°C 降至 -0.5°C , 以后由模式决定。

2 天气形势和降雹实况

1970 年 5 月 10 日高原腹地对流层中部上层有一西风槽快速东移, 槽线自青海湖向南延伸至昌都一线。青海东部地区位于此小槽槽前和兰州小高压南部, 700—500 hPa 气层为一致的偏南风。随着西风槽的快速东移, 槽后冷空气突然南侵, 使偏南风带来的

① 1993 年 11 月 3 日收到, 1994 年 3 月 1 日收到修改稿。

暖湿空气受到猛烈抬升, 从而造成这次冰雹天气。当日西宁测站降雹自 17: 35 开始, 持续了 13 min。最大冰雹直径为 15 mm, 冰雹平均重量为 2.1 g, 是一次典型的西风槽影响下的冰雹天气^[5]。

3 模拟概况

图 1, 2 是 1970 年 5 月 10 日发生在高原东部地区的冰雹云的模拟图。由图可见, 模式积分 27 min 后雹云即处于旺盛阶段, 云顶高达 8 300 m (相对高度, 下同); 冰晶最大浓度出现在 7 800 m 以上, 量级达 10^7 个/kg; 云中最大上升气流出现在 5 000 m 高度上, ≥ 10 m/s 上升气流的厚度约为 3 500 m。30 min 以后, 霰开始大量出现, 霰的最大浓度出现在 7 000 m 左右; 随着云体的发展变化, 其含水量很快由 0.5 g/kg 增加到 30 g/kg 以上。40 min 以后雹开始出现, 高度在 2 300—6 000 m 之间; 雹最大含水量为 5 g/kg。57 min 后, 上升气流已托不住雹块的重量, 雹开始夹杂着雨滴降落到地面。59—66 min 地面降雹最强, 在此期间内落地雹的平均浓度为 1.5 个/kg, 平均雹块重量为 0.2 g/kg, 换算成冰雹直径平均为 7.2 mm。70 min 以后上升气流开始迅速减弱, 低层的下沉气流厚度已超过 2 000 m, 云中水汽已大部分消耗殆尽, 雹停止产生和生长。以上模拟的情况与实况基本相似。

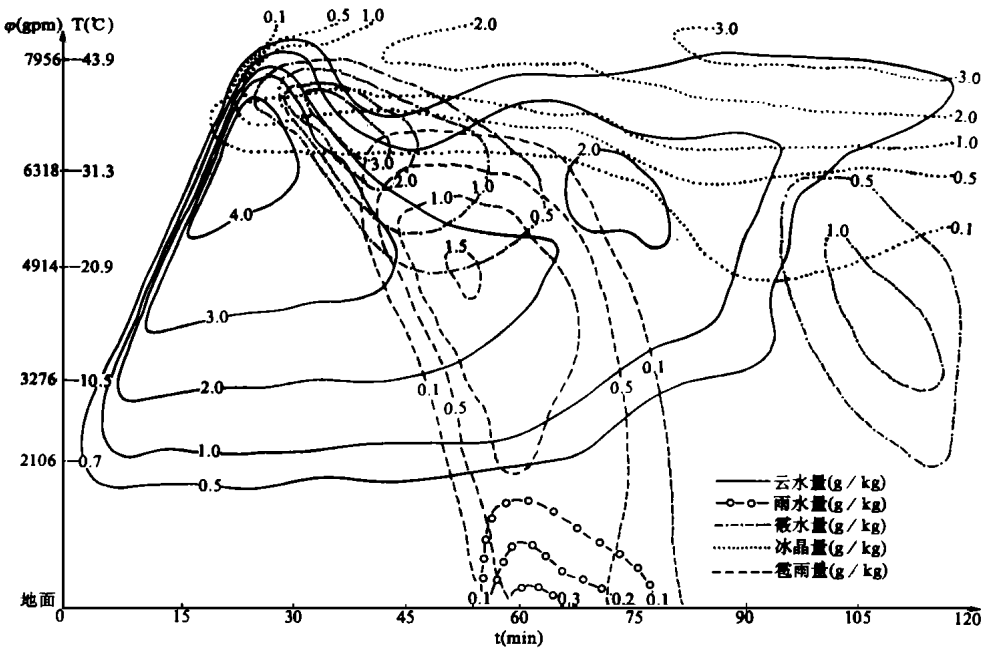


图 1 1970 年 5 月 10 日雹云云水、雨水、雹、霰、冰晶含水量的高度—时间剖面图

Fig. 1 The altitude—time cross—section of water content for cloud, rain, hail, graupel and ice crystal in the hail cloud on May 10, 1970.

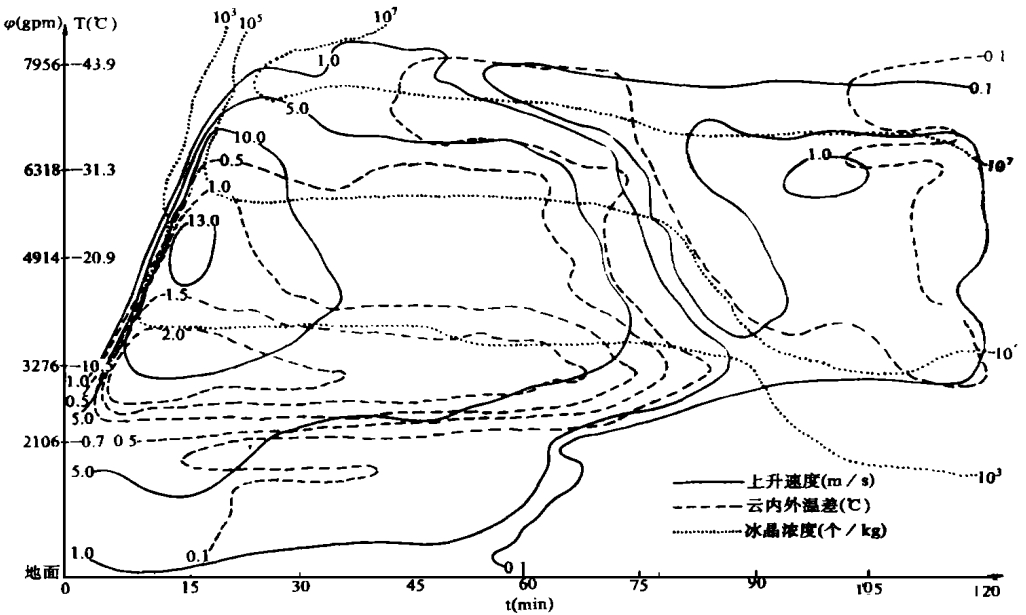


图2 1970年5月10日雹云的上升气流速度、云内外温度差和冰晶浓度的高度—时间剖面图
Fig. 2 The altitude—time cross—section of vertical velocity of the rising air—flow, temperature difference between cloud inner and outer parts and ice crystal concentration in the hail cloud on May 10, 1970.

4 雹云动力热力场的垂直分布和水汽凝结物累积区的形成特点

经订正的层结曲线图（图略）表明，在对流层高层（8 900—10 000 m）有一个较强的逆温层，厚度约为1 100 m。2 000 m高度以上气温开始低于0℃，5 000 m高度以上气温低于-20℃。另外自地面到2 500 m的整个对流层中下部比湿值较高，平均为7.9 g/kg。显然这样的层结结构有利于潜在不稳定能量的聚集，也有利于冰晶的产生、雹胚的孕育和雹块的长大。

图3是模式积分15 min后雹云内上升气流达最大时的云内外温差和上升气流速度的垂直分布图。由图可见，在1 000—5 800 m气层内，云内温度一直高于环境温度，最大温差位于3 000 m。与此对应，自近地面层至6 300 m为上升气流区，最大上升速度位于5 000 m左右，量值达13.2 m/s。由此往上，上升速度随高度锐减，到6 000 m以上，气流上升速度已降至5 m/s以下，这里的上升气流很不稳定，具有湍流性质。模拟表明，在5 800—6 300 m气层内有水汽凝结物累积区形成，其对应的温度约在-27—-30℃左右。这个结果与1974年7月23日对青海互助地区一次强雹云的云前、云内和云外同时施放探空气球所测得的结果颇为相似：雹云内8 800—10 600 m（海拔高度）的高度上有一极大湿度层，对应这一湿度层的温度约为-26—-32℃。同日对与互助县相邻的甘肃省永登县的入云探测结果表明，在雹云内8 000 m（海拔高度）

处, 最大上升气流达 20 m/s 。该日两地都降下直径 20 mm 的大冰雹。分析表明, 该日雹云最大上升速度面远高于 -12°C 层面, 但低于 -20°C 层面^[4]。由此推知, 如果这一湿度极大层就是水汽凝结物累积区的话, 那么该累积区应在 $-20 \sim -30^\circ\text{C}$ 层面之间。这个结果与文献 [6] 的结论很接近。

模拟表明 $27 \sim 45 \text{ min}$ 内, 累积区含水量达最大, 累积区的形成有利于降水粒子通过贝吉龙过程增长。本次模拟的贝吉龙过程最先由冰晶开始 (第 15 min), 到第 27 min 霰的贝吉龙过程也发动起来, 然而通过贝吉龙效应冰晶和霰的增长率都很小。在整个雹云生命期中, 它们最大分别只有 $0.2 \text{ mg/kg}\cdot\text{s}$ 和 $0.4 \text{ mg/kg}\cdot\text{s}$, 因此, 对于高原雹云的成雹过程来说, 贝吉龙过程仍处于次要地位。

5 成雹的主要微物理过程及其机制

本次模拟表现出的几个较显著的微物理过程有: 水汽凝结成过冷云滴、过冷云滴转化为霰、霰碰并云长大、霰转化为雹、雹碰并云长大等。这些微物理过程的主要变化如图 4 所示。

由图 4 可见, 整个微物理过程主要有三个阶段: 第一阶段 ($10 \sim 20 \text{ min}$) 为水汽凝结成云的阶段, 凝结具有突发性, 凝结率也最大, 但不稳定, 当达到最大值以后很快便呈下降趋势, 尽管这一阶段上升气流最强, 但因时间较短, 各个微物理过程均来不及发动; 第二个阶段 ($20 \sim 75 \text{ min}$) 中, 云的凝结率比较稳定并且维持时间较长, 但凝结率较第一阶段低, 过冷云晶化成霰的微物理过程已经发动起来, 与雹形成有关的微物理过程都集中在这一阶段内; 第三阶段 ($75 \sim 115 \text{ min}$), 大气中的水汽已经基本消耗尽, 微物理过程也逐渐停止。

由以上可以看出第二阶段为成雹的主要阶段, 这一阶段又可以分为两个时期。第一个时期 ($20 \sim 40 \text{ min}$) 为过冷云转化成霰的时期, 该过程主要发生在上升气流随高度急剧递减的区域里, 最大云霰转化率为 $2 \text{ mg/kg}\cdot\text{s}$, 转化成的霰聚集在这里并与过冷云碰并长大, 在霰具有一定重量后逐渐下降并与来自低层的云滴碰并, 碰并率最大达到 $23 \text{ mg/kg}\cdot\text{s}$, 维持时间约 $20 \sim 30 \text{ min}$; 第二个时期 ($40 \sim 75 \text{ min}$) 主要为霰转化为雹和雹碰并云长大的过程, 前者发生在 $5\,000 \sim 7\,000 \text{ m}$ 气层内, 后者发生在 $2\,000 \sim 6\,000 \text{ m}$ 气层内, 维持时间均为 35 min 左右, 最大值分别为 $4.0 \text{ mg/kg}\cdot\text{s}$ 和 $5.0 \text{ mg/kg}\cdot\text{s}$, 在量级上与这一时期的霰云碰并相当。模拟表

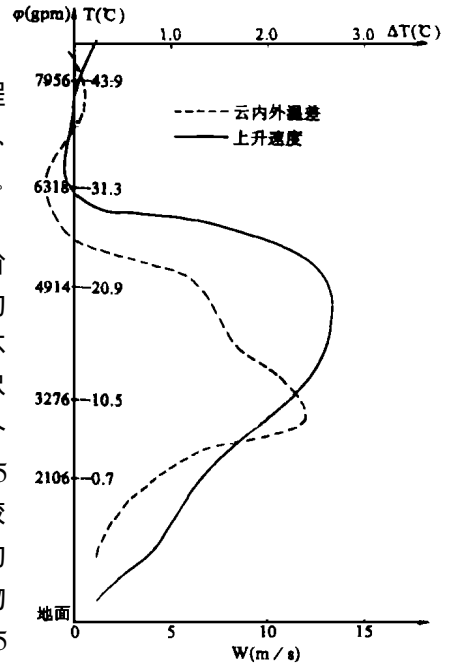


图 3 1970 年 5 月 10 日雹云内上升气流速度达最大时云内外温度差和上升速度的分布

Fig. 3 The distribution of temperature difference between cloud inner and outer parts and vertical velocity of hail cloud when the vertical velocity of rising air-flow is maximum on May

10, 1970.

明, 在 2 000m 高度以上雹块一直处于干增长过程, 2 000 m 以下雹块则处于湿增长状态。整个成雹的微物理过程以碰并为主, 云滴浓度和云滴生成率在冰雹长大过程中起了很重要的作用。

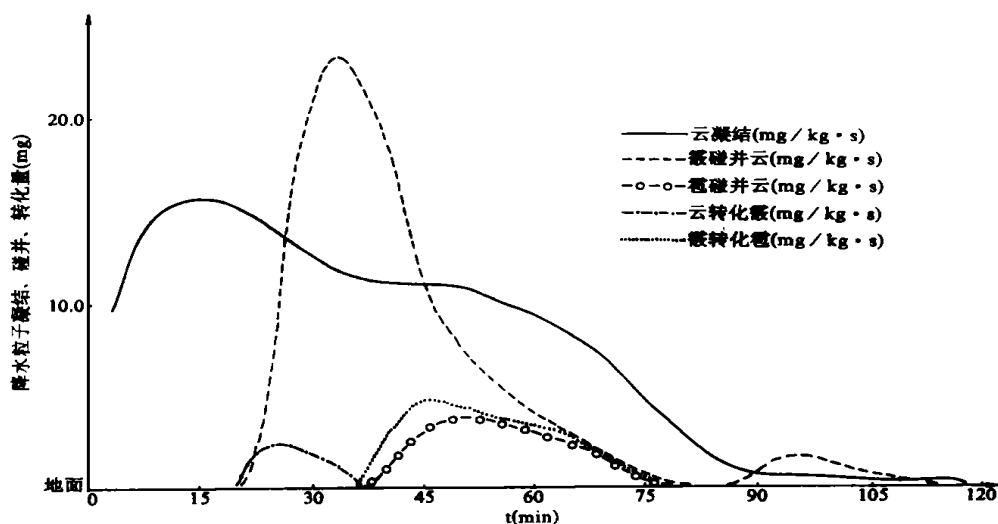


图 4 1970 年 5 月 10 日雹云内微物理过程的时间剖面图

Fig. 4 The time cross-section of the microphysical process in the hail cloud on May 10, 1970.

由上述可以看出, 这次雹云的成雹过程是依赖水汽凝结物累积区中的湍流性很强的上升气流来实现的。通过这种机制形成的雹块脱离水汽凝结物累积区后, 在云体的中下部进一步碰并云滴长大, 最后形成冰雹天气。成雹过程主要发生在 6 000 m 上下的气层内。这与以往雷达的多次观测结果是一致的。

6 结 语

通过模拟可以得出这次冰雹天气微物理过程的主要轮廓如下:

(1) 对流层高层较强的逆温层和中、低层较充足的水汽是冰雹生成的重要条件。高空较强的逆温层有利于水汽凝结物累积区的形成, 在充足的水汽供给条件下可为雹胚的孕育和发展提供良好的环境。

(2) 在冰晶和霰成长前期, 贝吉龙过程是主要的, 而在云转化成霰、霰成雹等过程中碰并是主要的。碰并过程主要发生在最强上升气流出现以后的时期里。上升气流具有湍流性质, 它加强了碰并过程, 是雹块形成的主要机制。这一时期也是降水粒子生长长大的微物理过程最活跃的时期。

(3) 上升气流的强度和厚度直接决定着碰并时间的长短。模拟表明, 最有利的上升气流强度为 7—10 m/s, 最有利于形成冰雹的气层约在 2 300—6 300 m 左右。

本文用一维模式对高原冰雹过程个例进行了数值模拟, 其结果有待于进一步核实和验证。如雹云内水汽凝结物累积区的高度、厚度和温度、云内上升气流强度等是否反映

了高原雹云的特点, 还有待验证。今后当用二维模式和更多的个例模拟来进一步研究高原冰雹的形成机制和特点。

参 考 文 献

- [1] 胡志晋, 积云微物理过程的数值模拟, (一) 微物理模式, 气象学报, 1987 年, 第 45 卷, 第 4 期, 467—484 页。
- [2] 胡志晋, 积云微物理过程的数值模拟, (二) 阵雨、冰雹、暴雨的个例研究, 气象学报, 1988 年, 第 46 卷, 第 1 期, 28—40 页。
- [3] 马 林, 西宁地区冰雹天气的层结结构的统计特征及一次西风槽影响下的雹云成雹过程的数值模拟, 青海气象, 1993 年, 第 3 期, 1—12 页。
- [4] 赵仕雄等, 青海高原冰雹的研究, 北京: 气象出版社, 1991 年, 127—142 页。
- [5] 雷雨顺, 冰雹概论, 北京: 科学出版社, 1978 年, 100—103 页。
- [6] N. R. 戈克海, 雹暴和雹块生长, 北京: 科学出版社, 1981 年, 98—112 页。
- [7] R. R. 罗杰斯, 云雾物理简明教程, 北京: 气象出版社, 1983 年, 112—129 页。
- [8] 顾震潮, 云雾降水物理基础, 北京: 气象出版社, 1980 年, 177—179 页。
- [9] 叶家东, 积云动力学, 北京: 气象出版社, 1988 年, 97—140 页。

A NUMERICAL SIMULATION OF THE MICROPHYSICAL PROCESSES OF FORMING HAIL OVER THE EAST QINGHAI—XIZANG PLATEAU

Ma Lin Zhao Shixiong Zhang Guoqing

(*Qinghai Research Institute of Meteorology Science, Xining, Qinghai, 810001*)

Abstract: In this paper, the hail weather process under a westerly trough effect over the eastern Qinghai—Xizang Plateau is simulated by using one—dimensional half time—dependent two—parameterized model. The characteristics of dynamics and thermodynamics in the hail cloud, and producing and transition of supercooled cloud droplets, ice crystals, graupels and hails, the collection growing of precipitation particels are discussed and the mechanism of forming hail in the plateau hail cloud is also sought preliminarily.

key words: Plateau hail; Numerical simulation of hail cloud.