

超级单体 单体 多单体 雹云及其 成雹特点的数值模拟研究*

段 英 刘静波

(河北省人工影响天气办公室, 石家庄, 050021)

摘 要

用数值模拟方法模拟了超级单体、单体和多单体雹云的流场和水凝结物场, 并对其成雹规律进行了数值模拟研究。结果表明: 可长成大雹的雹胚的初始出发区的位置主要由雹云的流场决定, 而与雹胚的大小关系不明显; 3 种类型的雹云的成雹规律是相似的, 超级单体之所以可以降大雹, 主要是由于流型的稳定和长的生命期。

关键词: 冰雹云, 冰雹增长, 数值模拟。

1 引 言

冰雹云的类型很多, 有的甚至难以归类, 但其基本类型是超级单体、单体和多单体。对河北省成灾冰雹过程的个例分析表明, 冰雹云常是跨县界活动的超级单体或多单体雹云系统, 它们在一年内出现机率较小, 仅占雹云活动总数的 10%, 但成灾比例很高, 可达 50% - 80%。由此可见, 深入讨论超级单体和多单体雹云的成雹机制是雹云物理和防雷原理所急需解决的问题。关于超级单体和多单体雹云的成雹过程, 根据对观测资料的综合分析, 在本世纪 70 ~ 80 年代取得了长足的进展, 并提出了一些模型 (Browning and Foot^[1], Foote and Wade^[2]。而且 Foote^[3] 通过人工施放雹胚作了在所观测到的雹云条件下的冰雹增长模拟研究。显然, 这种研究还应该深入进行。例如, 超级单体、单体和多单体雹云的各自成雹特点、冰雹增长运行与流场的相互作用、大雹的形成对雹胚大小和位置的依赖关系等。然而, 要模拟这些类型雹云的成雹特点, 首先要模拟出相应的流场, 进而研究在这些不同类型雹云中的冰雹生长。冰雹生长属于云物理过程, 但具体的增长过程涉及到云的流场和热力学场这些宏观环境, 并且被宏观环境场与微物理过程的相互作用所支配。鉴于云中降水粒子浓度有约 1 个/L, 而对冰雹而言仅有约 1 个/m³, 粒子间的距离很大, 因此单个粒子与流场之间的相互作用可看成是独立的。但在数值模拟中逐个或逐档 (按直径或质量大小分档) 地描述这种相互作用非常复杂, 计算量较大, 因此常采用参数化的方法。该方法特点之一是用降水粒子群的运动状态去替代各个粒子运动作用的总体状态。对于粒子浓度特别稀少尺度跨度又较大的冰雹云来说, 这种替代会引起明显差别, 因而不拟采用谱参

* 初稿时间: 1997 年 12 月 22 日; 修改稿时间: 1998 年 3 月 5 日。

资助课题: 河北省“九五”重大科技攻关 (96-95-12-3)。

数化的方法, 而用不同的给定大小的雹胚群来描述它们与雹云流场的相互作用, 这也算是一种粗尺度分档方法。

2 模式和模拟研究方案

用来模拟 3 种雹云流型的数值模式引用了许焕斌、王思微^[4] 97 版本的 2 维冰雹云模式(TDHM-89-97), 该模式带有详细 3 相 8 种水物质和较详细 3 相 6 种水物质的云物理过程和成雹方案(M 89 和 M 97); 而冰雹增长运行模拟应用了王思微、许焕斌^[5] 的冰雹增长运行模式(HTRAJ, 1989)。

TDHM-97 模式的计算区域为水平 50 km, 格距 1 km, 标号为 $i = 1 \sim 50$; 垂直为 15 km, 格距为 0.5 km, 标号为 $k = 1 - 30$ 。总格点数为 $50 \times 30 = 1500$ 。环境场的温 (T)、压 (P)、露点 (T_d)、风 (U) 分别由下式给定:

$$T: \quad T(1) = 290 \text{ K}$$

$$T(k) = T(k-1) - \alpha(1000z/100)$$

$$\alpha = 0.85 / 100 \text{ m} \quad k = 1 - 9$$

$$\alpha = 0.75 / 100 \text{ m} \quad k = 10 - 25$$

$$\alpha = 0.20 / 100 \text{ m} \quad k = 26 - 30$$

z : 单位为 100 m

$$P: \quad P(1) = 920 \text{ hPa}$$

$$P(k) = P(k-1) \left(\frac{T(k)}{T(k-1)} \right)^{\frac{3.415}{\alpha}} \quad k, \alpha \text{ 取值同上}$$

$$Td: \quad Td(k) = T(k) - 5.0 + 0.4k \quad k = 6$$

$$= T(k) - 3.0 \quad 6 < k < 20$$

$$= T(k) - 10.0 \quad k > 20$$

$$U: \quad U(k) = -6.0 + 0.5(k-1) \quad (\text{m/s})$$

在 $i = 20-30, k = 4-9$ 区域内给一温、湿扰动区, 以起动对流。温度范围由下式给出:

$$T(i, k) = 2.0 \sin [(i-20)\pi/10.0] \sin [(k-4)\pi/5.0]$$

$$g(i, k) = q_s(i, k) - 0.05q_s(i, k)$$

其中 q_s 为饱和比湿。

HTRAJ 的模拟计算区与 TDHM-89-97 相同。

模拟研究方案为:

超级单体雹云的宏、微观场由 TDHM-89 提供。在模式启动后模拟到 40 分钟时, 雹云

的流场和微物理的分布都近似于超级单体结构。这时把这个场输入到 HTRAJ 模式, 来作冰雹运行增长轨迹的模拟。这种做法使 HTRAJ 模式成为一个运动学模式, 即使冰雹增长运行的宏、微观背景场不随时间变, 只看在这场背景下冰雹增长运行的情况。之所以这么做, 是由于冰雹云的结构变化可以是很迅速的, 把 TDHM 与 HTRAJ 耦合运行时, 得到的宏、微观相互作用图象不易被看清楚。因此, 先把有超级单体结构的云场固定下来, 看在这种固定条件下, 雹块的增长运行如何受雹云结构的制约。

过去的一些冰雹运行增长轨迹的模拟研究中, 如文献[3], 人工施放的雹胚是放在一些不多的点上, 通常这些点被研究者认为是在雹云的胚胎帘区。为了避免播撒雹胚可能带来的人为影响, 计算区全场除边界点外全部格点上都要进行播撒。至于结局如何, 就看每个点上的雹胚与雹云宏、微观场相互作用的结果了。

多单体雹云的宏、微观场由 TDHM-97 提供, 是模拟运行 31.6 分钟时的云况, 这时的雹云结构具有一些多单体的特征。

单体雹云的宏、微观场则是由 TDHM-97 模拟到 20 分钟时的云况, 这时的雹云结构是单体特征的。

所播撒的雹胚有 4 种初始直径, 分别是 0.025 cm ($250\ \mu\text{m}$), 0.05 cm ($500\ \mu\text{m}$), 0.1 cm ($1000\ \mu\text{m}$) 和 0.2 cm ($2000\ \mu\text{m}$)。其初始体积密度 $\rho_0 = 0.9\text{ g/cm}^3$ 。

模拟计算分为 3 组 4 种 12 个算例。即:

超(表示超级单体) 025, 超 050, 超 100, 超 200;

多(表示多单体) 025, 多 050, 多 100, 多 200;

单(表示单体) 025, 单 050, 单 100, 单 200。

数字编号 025 是代表播撒雹胚的直径为 0.025 cm , 是以 cm 为单位的直径值在小数点后的 3 位数的值。

3 模拟计算结果

3.1 雹云的数值模拟

(1) 用 TDHM-89 给出了超级单体的雹云结构(见图 1)。由图 1 可见, 模拟结果与实际超级单体雹云结构十分相似, 只有一个主上升气流区, 具有非闭合对流环流圈, 水凝结物场的分布具有有界弱回波结构。

(2) 用 TDHM-97 给出的多单体雹云结构, 模拟结果在图 2 中给出。主单体在中间, 右侧是一个子单体。

(3) 用 TDHM-97 给出的单体雹云结构, 模拟结果在图 3 中给出。单体雹云流场具有明显的左右两个对流环, 由于环境风场有切变, 右侧的环流强, 主入流区在右侧, 次入流区在左侧。

3.2 冰雹增长运行模拟

3.2.1 超级单体组

图 4 是算例超 200 的模拟结果。图 4a 给出了二组曲线, 一组闭合等值线, 表示直径与等值线值同值的大雹的胚胎的初始位置的分布, 目的是说明能长成大雹的雹胚出发位置, 以及这些位置与流场的关系; 另一组穿过闭合等值线的曲线是水平风的零值线(简称零

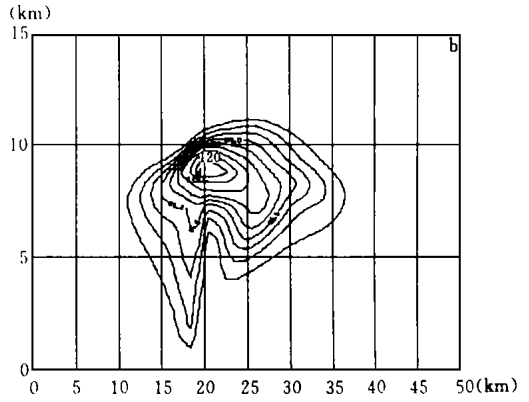
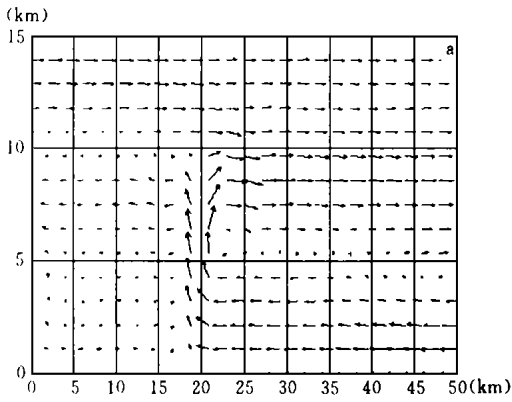


图1 超级单体雷云结构

(a. 流场; b. 降水粒子比含量)

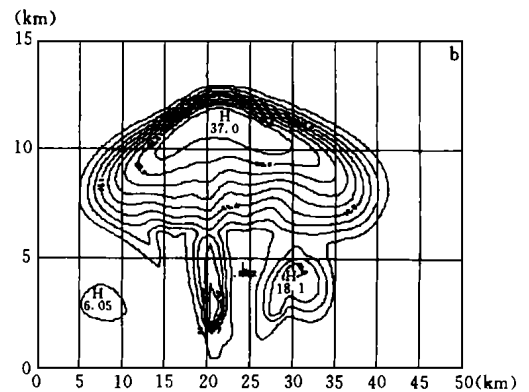
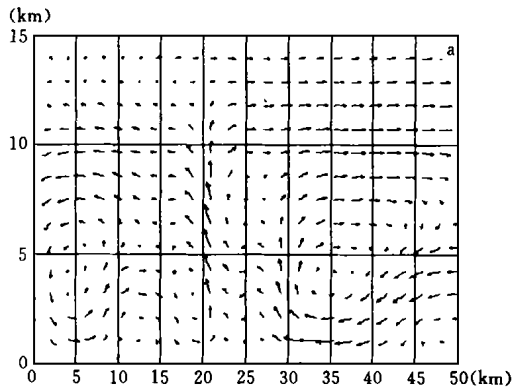


图2 多单体雷云结构

(a. 流场; b. 降水粒子比含量)

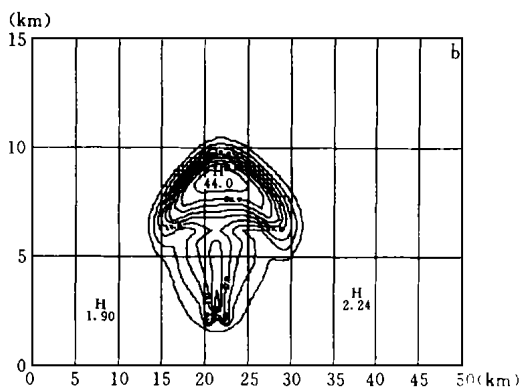
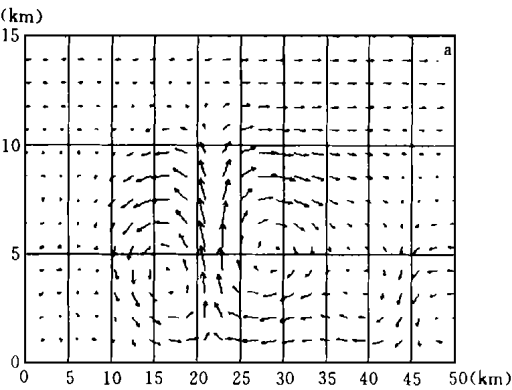


图3 单体雷云结构

(a. 流场; b. 降水粒子比含量)

线), 零线的垂直部位往往对应上升气流轴线。图 4b 是直径大于 2 cm 的冰雹增长运行轨迹。图 4c 是直径小于 2 cm 而大于 1 cm 的冰雹增长运行轨迹。图 4d 是直径介于 0.5 ~ 0.6 cm 间的小冰雹增长运行轨迹。由图 4a 可以看出, 可形成大雹的雹胚初始出发区是在上升气流主入流区的零线附近, 越靠近主上升气流轴线和零线, 可长成的冰雹越大。与图 4b, c, d 比较可以看出, 直径大于 2.0 cm 的大雹的雹胚初始出发区最靠近主上升气流轴线处的零线, 其增长运行轨迹也最靠近零线。

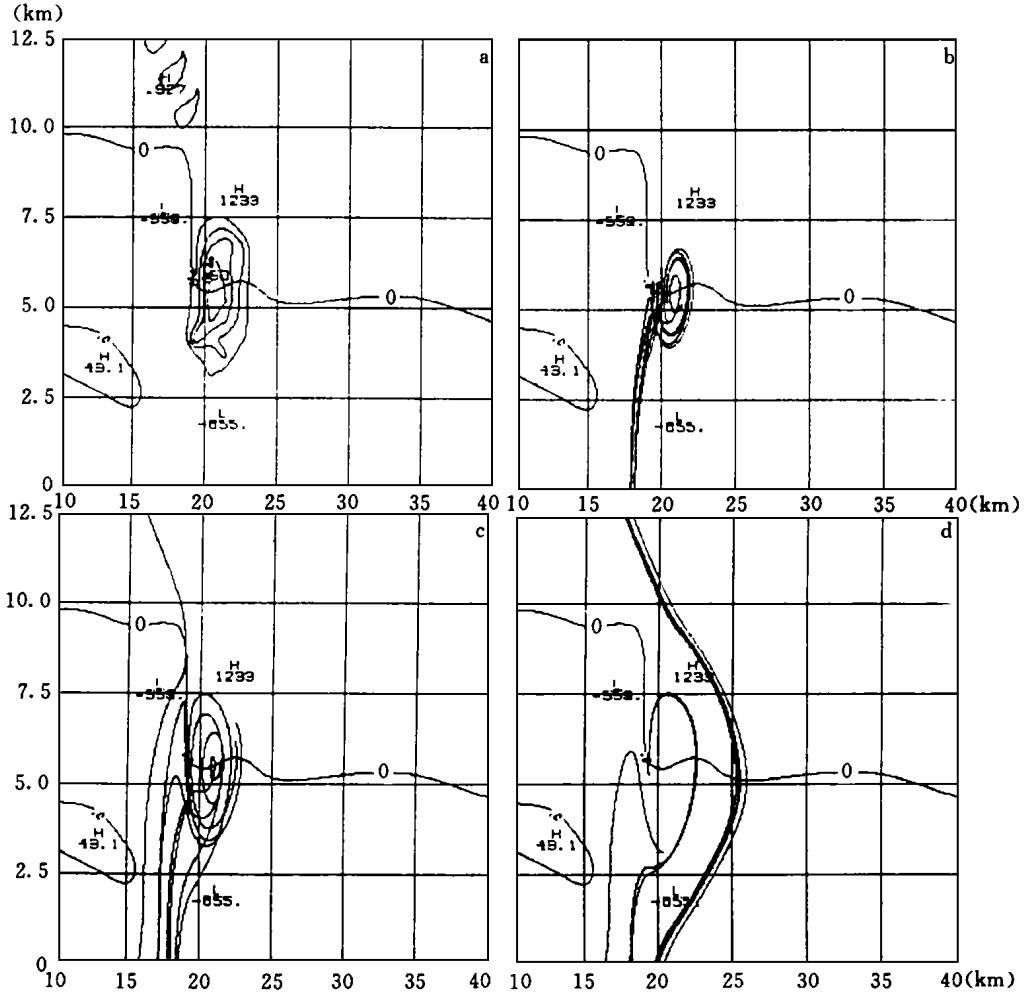


图 4 冰雹增长运行轨迹(超 200)

(a. 闭合等值线表示直径与等值线同值大雹胚胎的初始位置分布, 曲线是水平风的零值线, 等值线间隔为 0.5 cm, 最外圈值为 0.5 cm; b. 直径 > 2 cm 的冰雹增长运行轨迹; c. 1 cm < 直径 < 2 cm 的冰雹增长运行轨迹; d. 直径介于 0.5 ~ 0.6 cm 之间的小冰雹增长运行轨迹)

图 5 是超 100, 图 6 是超 050, 图 7 是超 025 算例的模拟结果。

比较图 4 ~ 7 可以看出, 可形成大雹的雹胚出发区与胚胎大小有关, 有胚胎越大其出

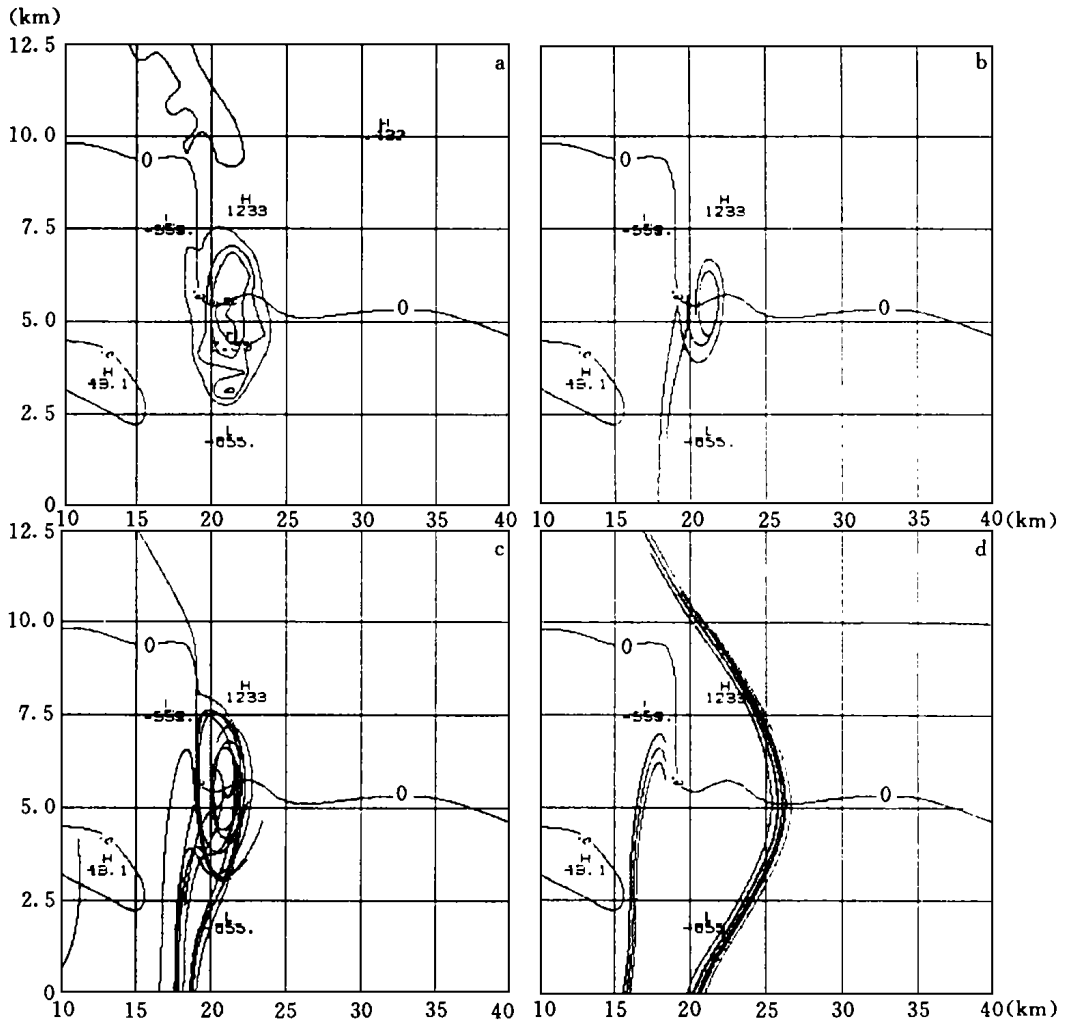


图 5 冰雹增长运行轨迹(超 100)

(说明同图 4)

发区域越接近零线, 并且其区域有缩小的趋势, 但这并不敏感。这表明要形成大雹, 胚胎出发位置比胚胎大小更重要。还可以看出, 大雹运行轨迹最靠近零线; 零线总是穿越大雹的出发区中心, 总是穿过主上升气流中轴线; 大雹胚胎出发区总是位于雹云主上升气流区的入流区零线附近, 这就是大雹胚胎区与雹云流场的关系。

零线何以与大雹的形成关系如此密切, 从冰雹的运行增长轨迹可以看到, 冰雹长大的过程是它进入、离开、再进入主上升气流区的循环过程, 上升气流只能作用于冰雹的垂直向运动, 对吹入吹出主上升气流区的水平向运动不起作用。循环就要有水平运动与垂直运动的结合, 何况零线又是云上升气流的中轴线, 沿零线的循环运动随着冰雹的长大是向主上升气流中轴线旋进的, 所以零线与大雹的增长运行关系密切, 可生成大雹的胚胎从水平零线进入主上升气流区, 循环增长运行轨迹越接近零线其增长条件和在主上升气流区滞

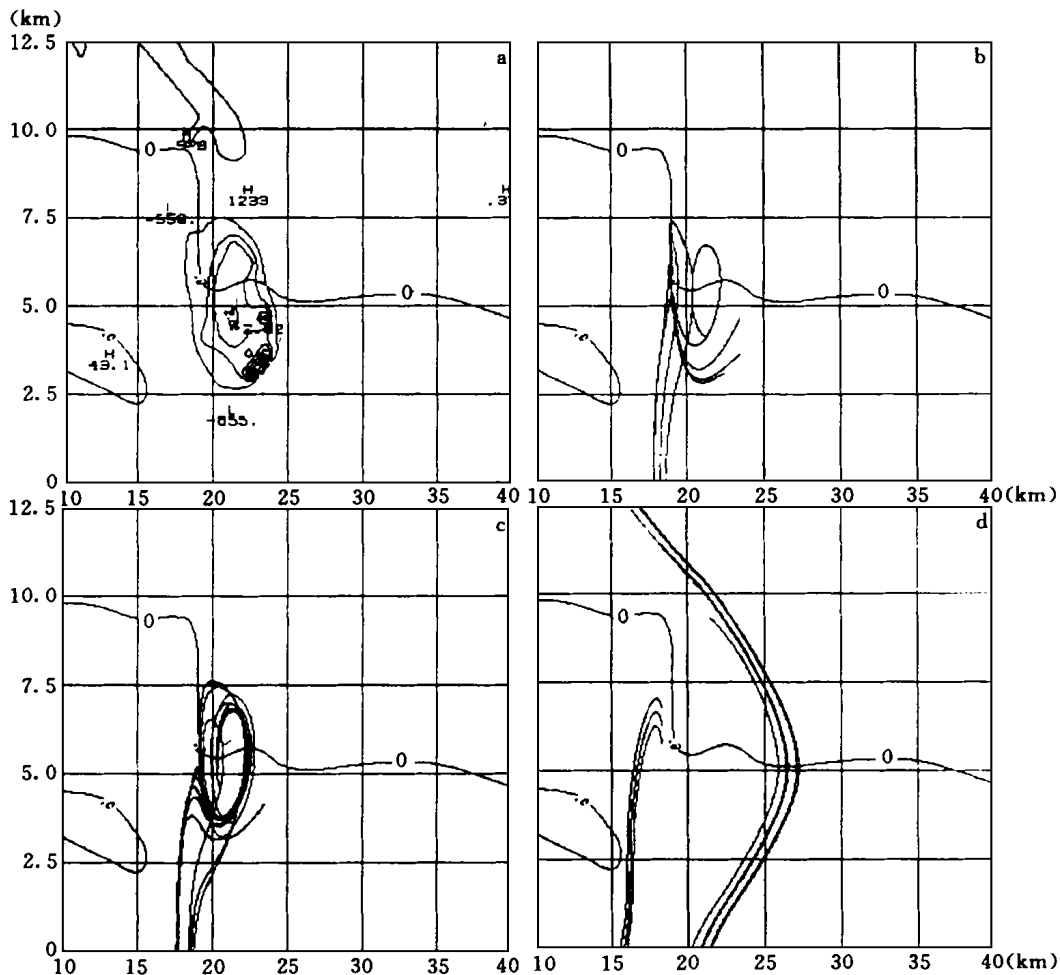
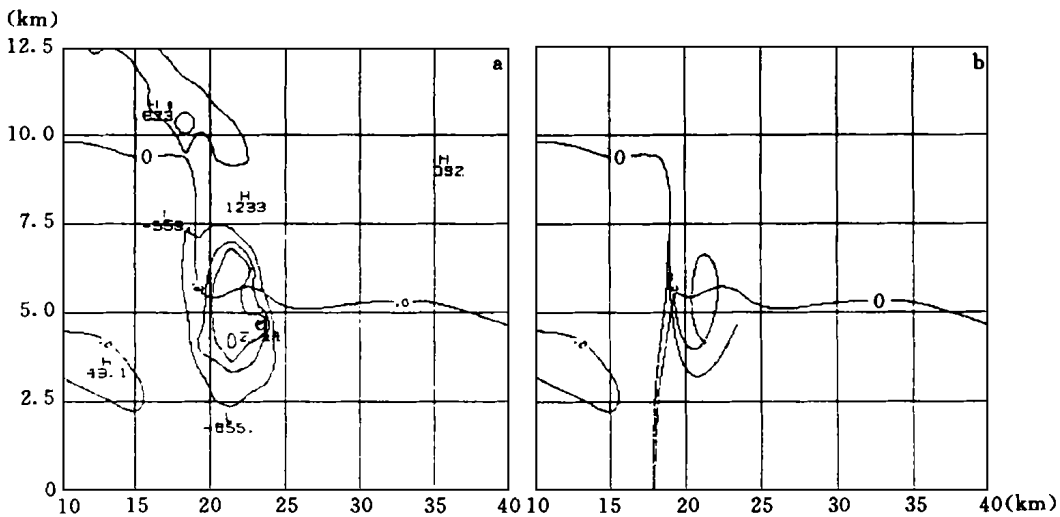


图 6 冰雹增长运行轨迹(超 050)(说明同图 4)



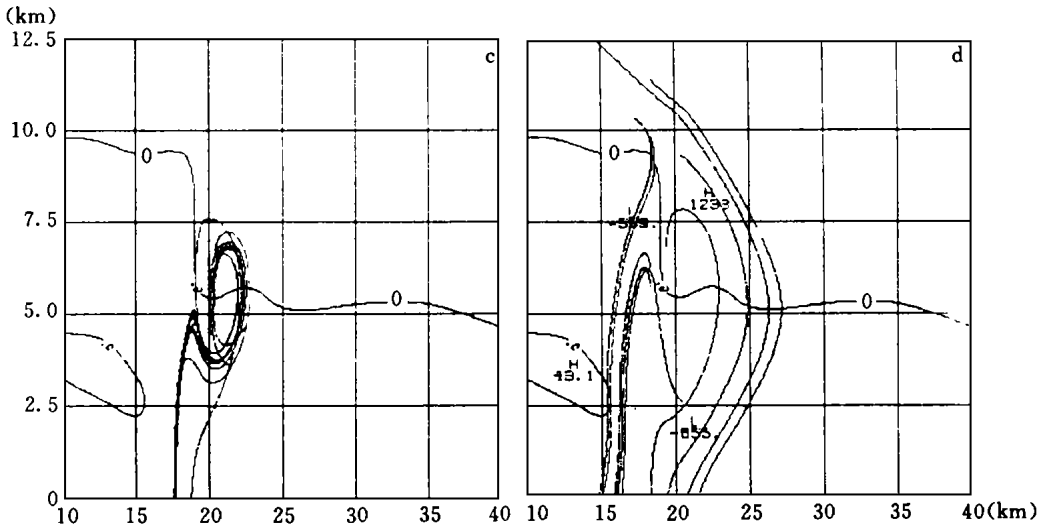


图7 冰雹增长运行轨迹(超 025)

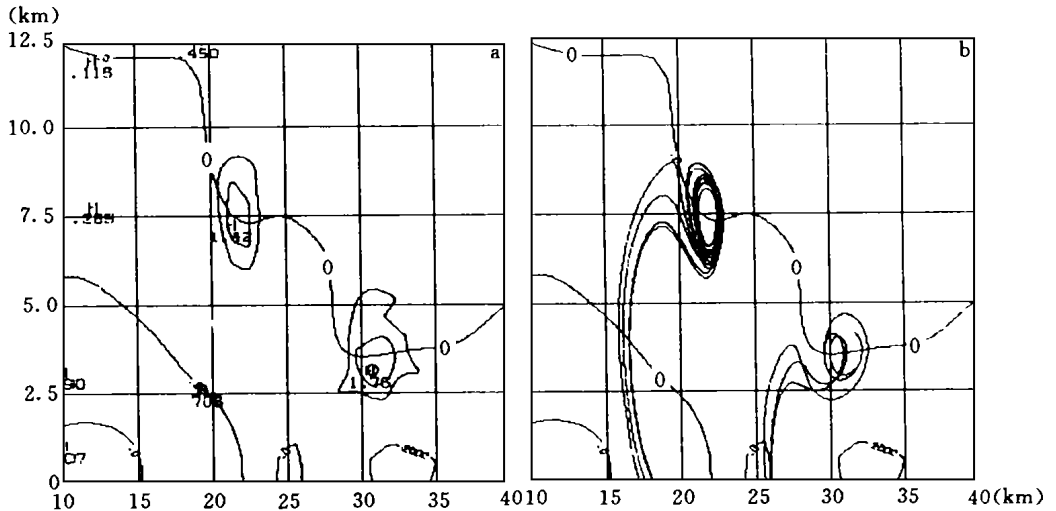
(说明同图4)

留的时间越长,越能长成大雹。

从图4,5,6,7中还可以看到,在远离零线处的上升气流上方也有一个可形成小雹的雹胚初始出发区,从其中的d图可见,从这里出发的雹胚是通过垂直下落中在主上升气流区边缘长大的,只能生成小的冰雹。这进一步说明,绕零线循环增长的才能形成大雹,而其他方式也可生成雹,但是只能生成小雹。

3.2.2 多单体雹云组

这组模拟算例分别是多200,多100,多050,多025算例的模拟结果。由于多单体雹云尺度和强度较弱,没有长成2.0 cm直径以上的冰雹。仅给出多200的结果,如图8。分析比较可以看出,对具有二个单体以上的多单体雹云,每个单体都具有相应的大雹胚胎区,以及相应的冰雹增长运行轨迹。就每个单体而言,其分布和轨迹特点与超级单体组模



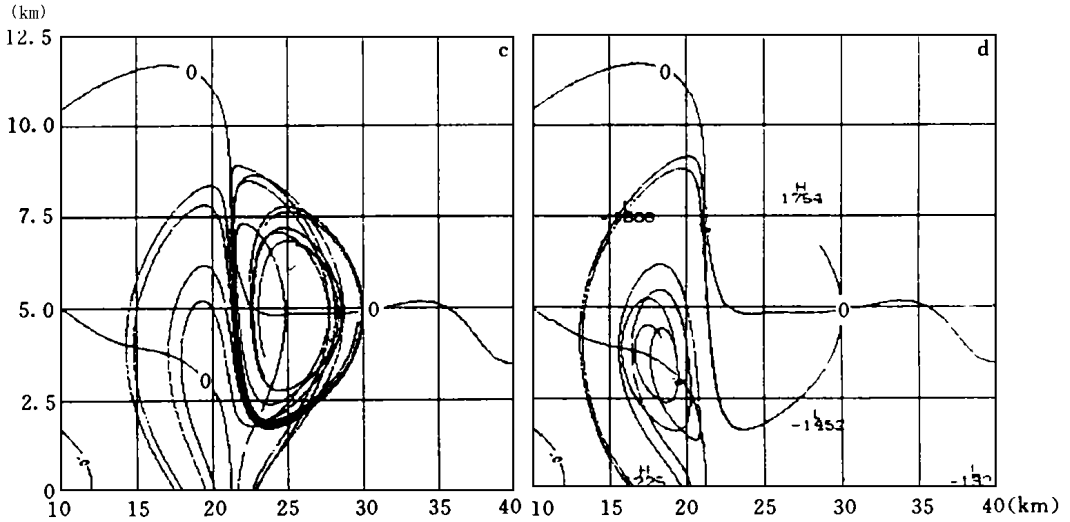


图9 单 200 算例雹云增长轨迹运行图

(说明同图 4)

以在次入流区的零线附近有一个小雹胚胎入口区,这在 c, d 图中看得很清楚。

对比分析超级单体、多单体和单体 3 组算例的模拟结果,可以明显地看出,对应于一定的对流环流,在单体内的冰雹是以相似的规律在增长。由这点来看,超级单体、多单体和单体雹云并没有本质的区别。其区别只是在流型可持续时间的长短上,这自然会影响着不同冰雹云的成雹过程。如果是这样的话,从考虑影响冰雹云微物理过程来进行防雷作业,对 3 类雹云不应存在原则差别。但是雹胚增长成大雹是需要时间的。模拟的一些大雹的生长时间可达 1 h,这就需要有长生命的雹云来支撑。超级单体雹云有较长的生命期,有利于大雹的形成。

4 结 论

应用二维冰雹云模式(TDHM-89-97)及其冰雹增长运行模式(HTRAJ),模拟了超级单体、多单体、单体 3 种雹云的结构及其成雹特点,共 3 组 12 个算例。结果表明:

- 1) 模拟的超级单体、单体、多单体雹云的流场、降水物场与观测结果比较一致。
- 2) 对不同类型雹云的冰雹增长运行轨迹模拟表明,可形成大雹的胚胎的初始出发区是在上升气流入流区的水平风速零线附近;冰雹运行轨迹越靠近主上升气流区轴线处的零线,其可能长成的冰雹直径越大。可形成大雹的雹胚的位置由流场结构决定,与雹胚的直径大小的关系不敏感。不同类型的冰雹云,其冰雹的增长特点具有相似的规律。
- 3) 超级单体雹云可降大雹的原因可能不是其有独特的成雹规律,而是其气流结构的稳定性和长生命期所致。由于流场等雹云宏、微观条件是给定的,不存在因云体生命史所限而中止冰雹增长运行的过程。实际上雹云的宏、微观场在演变着,长寿命的雹云当然就对大雹的形成更有利。

- 4) 这些初步结果对进一步用完全动力学模式研究冰雹增长运行和防雷机理是有意义

的。

参考文献

- 1 Browning K A and Foote G B. Airflow and hail growth in supercell storms and some implications for hail suppression. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1976, 102: 499 ~ 533
- 2 Foote G B and Wade C G. Case study of a hailstorm in Colorado. part I: Radar echo structure and evolution. *J Atmos Sci*, 1982, 39: 2828 ~ 2846
- 3 Foote G B. A Study of hail growth utilizing observed storm condition, *J Clim Appl Meteor*, 1984, 23: 84 ~ 101
- 4 许焕斌, 王思微. 二维冰雹云模式. *气象学报*, 1988, 46(2): 227 ~ 236
- 5 王思微, 许焕斌. 不同流型雹云中大雪增长运行轨迹的数值模拟. *气象科学院院刊*, 1989, 4(2): 171 ~ 177

A NUMERICAL SIMULATION ABOUT THE HAILSTONE GROWING PROCESSES IN SUPER-CELL, MULTI-CELL AND SINGLE-CELL HAIL STORM

Duan Ying Liu Jingbo

(*Weather Modification Office of Hebei Province, Shijiazhuang, 050021*)

Abstract

Hydrometeor field in the super-cell, multi-cell and single-cell hail storm are given using unnumerical modeling. The growing process about the hailstone is analysed based on the simulation. The results show that the starting location of hail embryo which can growth to large hailstone is decided by the streamline field of hail storm, and the effect of hail embryo size on the formation of large hailstone is not remarkable. The generation processses of hailstone in three kinds of hail storm are similer each other. Owing to the stremline field is more stable and last longer time in the super-cell hail storm, the larger hailstone can be generated in the super-cell hail storm.

Key words: Hailcloud, Hail growth, Numerical simulation.