

冰雹形成机制的研究并论人工雹胚与自然雹胚的“利益竞争”防雹假说*

许焕斌** 段英

(河北省人工影响天气办公室, 石家庄 050021)

摘要 在播撒防雹中, 如何实现人工雹胚与自然雹胚的增长竞争是决定防雹效果的关键, 这实质上也是雹云物理的关键课题。经过对强对流(雹)云的流场特征和相应的过冷水场配置的综合分析和数值模拟研究, 发现: (1) 由于雹云流场的对流性, 其中必然存在着一个主上升气流区和相对于云体的水平风速零的区域, 它在垂直剖面上, 可呈现出一条零线, 可长大成冰雹的水凝物粒子是绕零线循环运行增长的, 并逐步进入主上升气流区; (2) 在雹云中存在着冰雹“穴道”, 它位于主上升气流区边侧及零线下的入流区, 其体积约为雹云总体的6%或更小, 不论自然雹胚或是人工雹胚, 只要进入“穴道”都经历着循环运行增长, 其轨迹是相互交叉的, 因而可以实现平等“竞争”; (3) “穴道”的存在和位置由流场特征决定, 运行轨迹的基本形态也由流场决定, 而粒子增长率及运行路径的长短由“穴道”内的过冷水场(过冷度和量)决定。

关键词: 冰雹; 形成机制; 防雹原理

1 引言

1995年11月世界气象组织(WMO)在南非召开了回顾防雹现状的专家会议, 虽距上次类似的会议达15年之久, 但会议认为在防雹原理上没有什么变化, 防雹和雹云物理的研究在多数国家处于低点。笔者认为, 要摆脱这种局面, 科学工作者的行动应当着重放在冰雹形成机制和防雹原理的进展上。

在业已提出的几种播撒防雹的科学假说中, 防雹专家会议仍认为“利益竞争”(Beneficial competition)是最有希望的^[1]。所谓“利益竞争”, 即向云中播撒人工冰核, 它们引起的冰化作用产生出毫米级大小的人工雹胚, 去与自然雹胚“争食”云中的过冷水, 从而抑制大冰雹的形成。但如何实现这一假说存在两个关键问题。

第一个关键问题是播撒可否迅速形成毫米级大小的人工雹胚? 迅速是相对于自然冰雹形成时间而言, 一般冰雹云从初始回波出现到地面降雹有时只需十几分钟, 而雹胚长大成2~3 cm的冰雹, 又约需5 min^[2], 因此人工雹胚的形成时间在10 min内才有利于及时参与自然雹胚的增长“竞争”。人工雹胚的形成可分为两类, 一是冻滴胚的形成, 二是人工雹胚的形成。对于人工冻滴胚, 如已存在毫米级过冷雨滴, 人工播撒使它们冻结

1999-12-21收到, 2000-04-20收到再改稿

* 河北省“九五”重大科技攻关项目(96-95-12-3)资助

** 客座研究员, 原工作单位: 北京应用气象研究所

成冻滴胚的时间会短于 1 min, 但这种条件并不经常存在。因为 NHRE (美国国家冰雹研究试验) 观测表明, 雹云中并不存在大量的过冷雨滴, 降水粒子是由冰相过程形成的, 过冷水几乎完全是由云滴组成, 且这种情况在世界一些地区占优势^[3], 若缺乏毫米级大小的过冷雨滴, 那么从小云滴靠凝结和并合长大成毫米级雨滴, 就需要长达几十分钟的时间了, 不满足大量迅速形成人工胚的要求。对于人工雹胚, 根据文献[4]的结果, 认为通过播撒人工冰核可以在 6~10 min 形成毫米级大小的雹胚, 这是由于在雹云中的强上升气流可保持着过冷云水的存在, 它们在欠饱和时的蒸发, 可大体上维持水面饱和。在 -16°C 环境条件下, 单凝华增长在 5 min 内冰晶就可以长大到 $500\ \mu\text{m}$ ^[5], 足以启动淞附增长过程迅速长大成毫米级的雹。当存在着尺度比毫米级雨滴小但比云粒子大的百微米级大云滴时, 据文献[6]的结果, 它可在 24 min 内靠凝结长大成毫米尺度; 至于在人工播撒冰核引起冻结后, 由于它的增长起点尺度比云滴冻结的大, 会减少雹胚形成的时间。看来雹的形成的难点, 是粒子可否在雹云上升气流中含有过冷云水的地域滞留一段时间 (6~10 min) 而不被吹出云外。雹云中是否存在这种地域吗?

第二个关键问题是人工雹胚如何去与自然雹胚进行增长竞争? 很多学者对实现“利益竞争”假说提出了疑问^[3,7,8], 这些疑问可以归纳为如下几点:

(1)“利益竞争”假说, 所依据的物理模型过于简单, 它基本上是一个垂直的一维模型。随着雹云物理研究的进展, 应该进行与真实的雹云流场结构、成胚过程相近的运行增长轨迹的一般规律性研究, 进一步考查假说的合理性。

(2) 当缺乏现成的过冷雨滴时, 靠播撒冰核去迅速形成冻滴胚就失去了前提; 形成雹胚, 要有充裕的时间, 在强上升气流中施行播撒是不利的, 为此需要在另一处上升气流比较弱的地方播撒, 小粒子可以存在较长的时间。然而这又造成雹胚形成区与冰雹长大区 (主上升气流) 的分离, 出现了另一个疑问, 即雹胚形成后, 气流能把它们带入主上升气流区吗? 为了保证这一点, 播撒区应当在自然雹胚形成区, 不然, 人工雹胚难以实现与自然雹胚的平等竞争。

(3) 要找到雹胚形成区, 以及形成后如何进入冰雹形成区, 就需要了解从雹胚形成到长大成冰雹的粒子增长运行轨迹。由于对实际雹云中粒子运行增长轨迹的了解甚少, 从而难以确定雹胚形成区和注入冰雹形成区的规律, 也不能回答人工雹胚是如何实现与自然雹胚的增长竞争的。

本文力求建立一个能反映雹云流场结构特征, 包含成胚过程和完善的粒子增长运行轨迹的数值模式, 用数值模拟方法找出粒子增长运行轨迹的规律性, 只有找出规律性的结果, 才有可能回答上述的两个关键问题。

2 冰雹云模式和粒子增长运行模式

粒子的增长运行轨迹实质上是雹云宏观流场、温度场、过冷水场与粒子的微观增长过程相互作用的产物。以往的粒子增长运行的研究, 除了因模型简单不能反映雹云的流场特征和粒子增长过程不完善外, 一个重要的因素是没有充分注意与垂直运动相对应的水平风的作用。雹云流场是对流式的, 任何一个垂直风场必然会有一个相应的水平流场。粒子在从胚生长区进入主上升气流中的雹形成区, 不仅有垂直向的移动, 还有水平

向的移动, 从上升气流的边区进入主上升气流区, 除在主上升区垂直顶区外, 皆靠水平风来决定其吹入或吹出。可能这是早期的轨迹研究者^[9,10], 虽曾给出一些轨迹模拟的结果, 却未能提炼出与流场结构相关联的动力性规律的因素之一。

我们曾用二维模式模拟研究了不同流型雹云中雹增长运行轨迹^[11]和单体、多单体及超级单体雹云中雹的形成^[12], 得出了一些规律性的结果。为了进一步了解这些规律的可靠性, 本文用三维雹云模式 (GF)^[11]和三维粒子增长运行模式来进行模拟研究, 希望更明确地提炼出规律性的结果。

三维雹云模式是一个可压缩大气中的全弹性模式, 包括有冰雹形成的云物理过程; 三维粒子增长运行模式是由二维模式改变而成的, 考虑了冰粒子与过冷云水、雨水的干湿并合并冻过程, 考虑了淞附、融化对粒子体密度的影响, 也考虑了多余水分的渗入、剥离和蒸发, 相当完善地描述了粒子的增长及密度和落速的变化, 具体方案可参见文献 [11,13]。

模拟研究分二类, 一是对理想环境场的模拟, 二是对实例环境场的模拟。前者又分为二种, 即静态场的模拟和动态场的模拟。所谓静态场是利用 GF 先模拟雹云的发展, 当出现超级单体流型和微物理场结构时, 输出这些场, 以此场为背景来模拟播撒粒子的运行增长轨迹。静态模拟中, 流场和微物理场不变, 突出粒子增长运行轨迹的规律性, 避免因流场和微物理场随时间变化而造成的难以看清楚复杂局面。在找到一些规律性认识以后, 再进行动态场的模拟, 察看静态场模拟的结果在动态场中是否仍然起规律性的作用。

3 理想环境场的静态模拟和动态模拟

三维云模式, 计算区垂直 12.5 km, 水平 40.0 km, 垂直格距 0.5 km, 水平格距 1.0 km, 共计格点数为 $40 \times 40 \times 25 = 40\,000$ 。格点编号, X 向 $I=1 \sim 40$; Y 向 $J=1 \sim 40$; Z 向 $K=1 \sim 25$ 。根据文献 [14,15] 给出的强对流天气发生时的典型大气温度、湿度和风场结构, 即下湿上干的不稳定层结, 大多数雹云发生的环境风场, 具有相当明显的二维性, 即西风风速强切变大, 南风风速弱切变小, 风的垂直切变值介于 $1.11 \times 10^{-3} \sim 4.0 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 之间。据此给出了层结和湿度分布, 对 GF 和 XGL 算例具体的条件为

温度:

$$T_K = T_{K-1} - a \times \Delta Z,$$

其中 $T_1 = 285 \text{ K}$, $K=2 \sim 8$, $a=0.8$; $K=9 \sim 20$, $a=0.7$; $K=21 \sim 25$, $a=0.01$, ΔZ 的单位为 hm。

露点:

$$T_{d,k} = \begin{cases} T_K - 5.0 + 0.5K, & K < 5, \\ T_K - 3.0, & 5 \leq K \leq 20, \\ T_K - 15.0, & K > 20. \end{cases}$$

风 (单位 cm/s):

对 GF 算例: $u_K = -800.0 \cos(0.5\pi \cdot K/12)$, $v_K = 0.0$;

对 XGL 算例: 当 $K \leq 9$, $u_K = -800.0 + (K-1) \times 100.0$, $v_K = (K-1) \times 50.0$,
当 $K > 9$, $u_K = u_{K-1} + 150.0$, $v_K = v_{K-1} - 150.0$.

由于粒子是相对于雹云运行的, 所以这里的风场是用了相对风场, 即环境风与雹云移速的差。

3.1 静态模拟的结果

图 1 给出的是 GF 模拟到 30 min 时的流场, 图 2 给出了凝结物(云)场的二维剖面。可见在 $J=19$ 处显现出类似超级单体的流场和水凝物场的结构特征, 最大上升气流速度达到 32 m/s , 液水比含量达到 7.6 g/kg 。这与文献[9]使用的值相当, 也与 Knight^[16]的观测值相当。

一个强对流场, 是深对流环流与环境风相互作用的产物。它的特征是, 下层水平气流辐合, 上层水平气流辐散, 上升气流贯穿上下, 因而在上下层之间会存在一个水平气

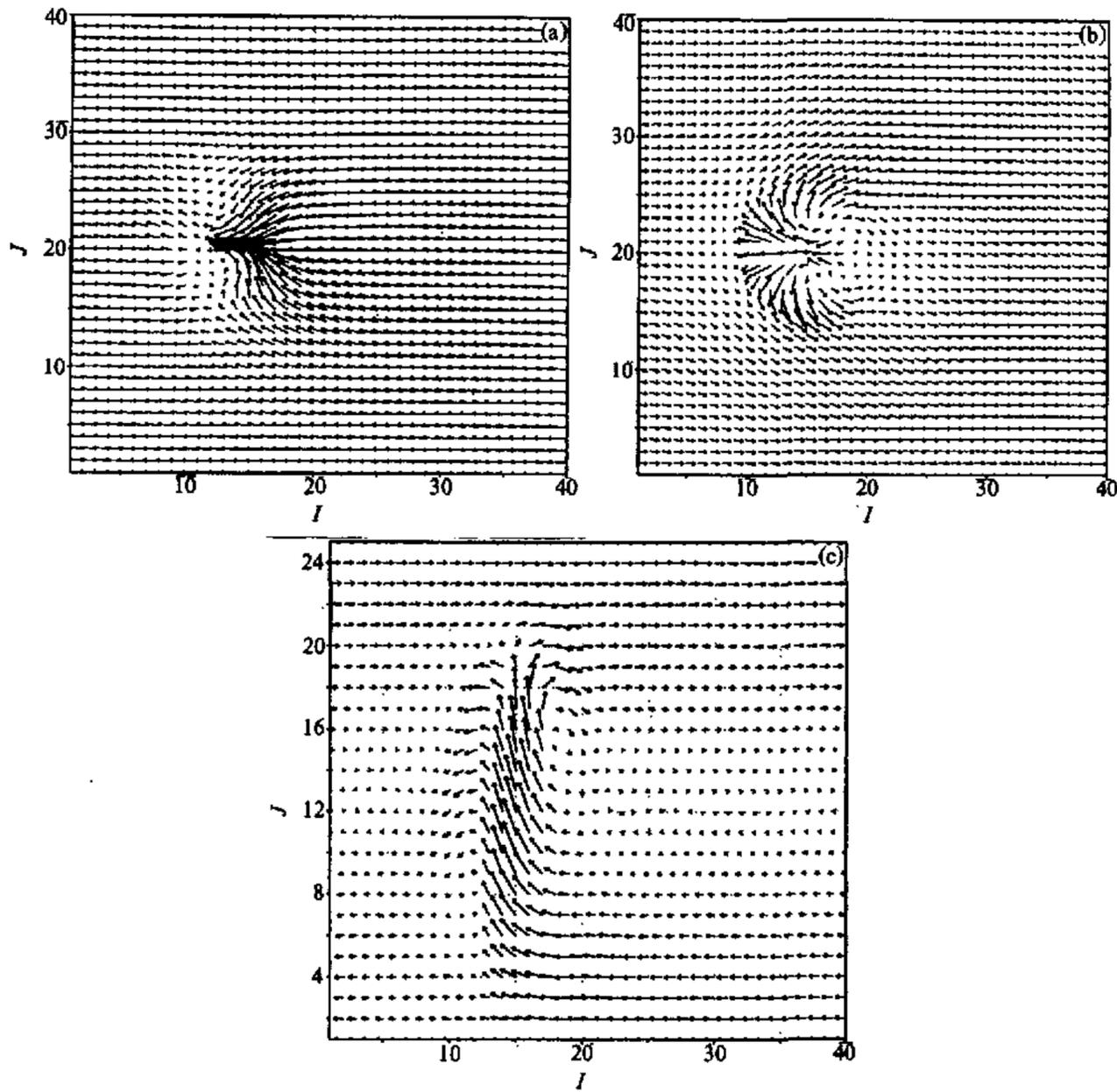


图 1 GF 模拟到 30 min 时的流场
(a) $K=7$ 和 (b) $K=15$ 水平剖面上的风矢图; (c) $J=19$ 垂直剖面上的风矢图

流等于零的区域。为了看清水平气流等于零的区域所在, 先给出 u 等于零的面 (图 3a), 再给出这个面上 v 的分布 (图 3b), 这样一来, $u=0$ 曲面上 $v=0$ 的地方, 就是水平气流为零的区域。由图 3c 可见, 穿过水平速度零域 ($u=v \approx 0$) 又靠近主上升气流的位置应是“0” (零) 线中的一部分。比较图 3a、b、c 可见它处于 $I=15 \sim 20$ 区段和 $J=19$ 、 $K=15$ 附近, 这里是主上升气流区边侧, 区域下方是主入流区。这是一个对冰雹形成来说有着重要动力意义的区域。

在给定背景场后, 在主要涵盖云区的范围 [$I(J)=11 \sim 30, K=6 \sim 20$] 内每个格点上播撒了一个胚胎粒子 (相当于浓度为 1 个/g 或 1 个/L, 即 1000 个/m³), 观

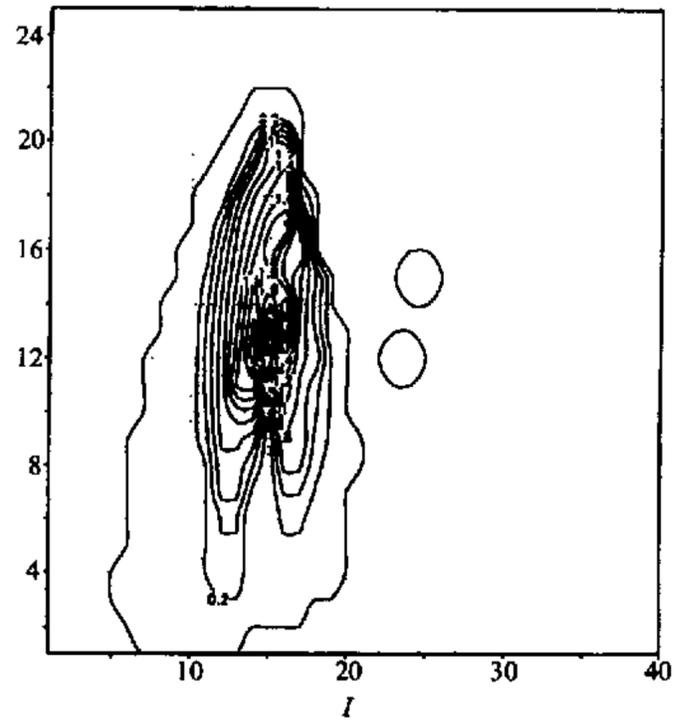


图 2 GF 模拟到 30 min 时 $J=19$ 的 XZ 剖面上的水凝物 (云水) 场分布图
等值线间隔为 0.28 g/kg

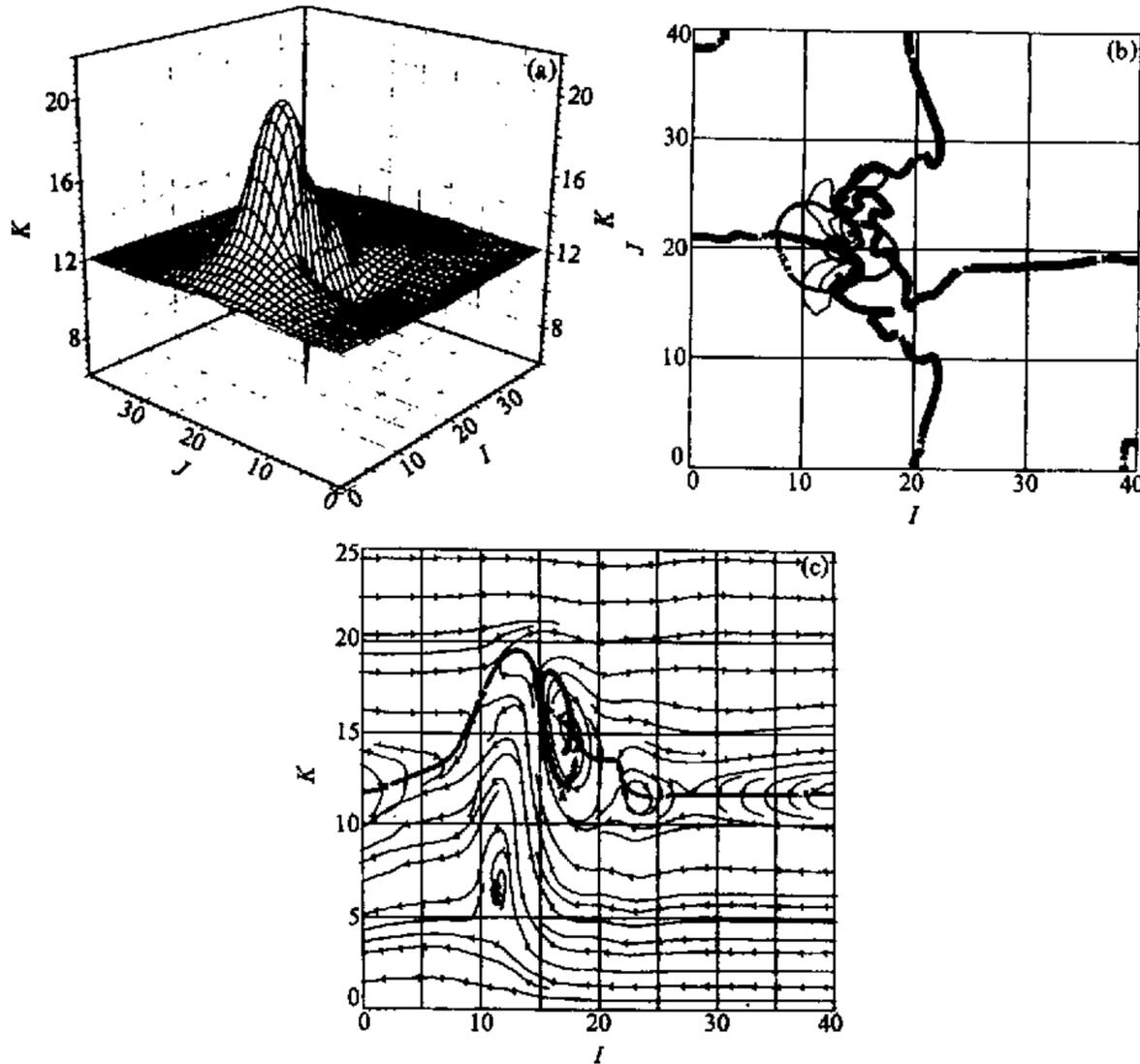


图 3 (a) GF 算例的 $u=0$ 曲面; (b) 细线: 曲面上的 v 值分布 (单位: cm/s), 粗线: $v=0$, 中粗线: 曲面的等高线 (单位: 垂直格点数); (c) $J=19$ 垂直剖面上的流线, 细线: 上升气流等值线 (单位: cm/s), 粗线: $u=0$

察哪些粒子可以长大成雹, 以及它们的增长运行轨迹。

图 4 给出了初始粒子直径 $d=0.1$ cm, 最终长大成 $d=4.62$ cm 的编号为 2168 的增长运行轨迹。由图 4a 和图 3b、c 可以看出, 2168 号粒子的轨迹是在水平速度近于零的零域内作循环运行的 ($I=15\sim 20$, $J=18.4\sim 19.6$ 和 $K=15$)。由图 4b 可以看出粒子的循环轨迹区处于上升气流轴附近的水平风零线 (0) 附近 ($I=15\sim 20$, $J=19$, $K=15$), 在循环中不断接近 0 线, 并逐步进入主上升气流区, 然后平缓地沿 0 线的主上升气流区长大, 最后穿越主上升气流离开 0 线下落。这种绕 0 线循环, 接近 0 线进入主上升气流的图像在图 4c 中看得更清楚, 粒子在主上升气流边沿在较窄的 Y 范围和较宽的 X 范围内 ($I=15\sim 20$, $J=19$) 的水平速度为零的区域内往返, 在粒子的长大中逐步进入主上升气流区。清楚地看到: 粒子在主上升气流边沿 (上升气流弱区) 绕 0 线循环增长, 在增长中缩小循环圈半径, 接近 0 线后平稳进入主上升气流区长成大雹, 呈现出一个互相联结的完整的成雹过程。

为了观察最终可长成大雹的粒子直径 d_{\max} 与初始出发地的关系, 给出了图 5。从图 5a 看到最大终极冰雹的出发地位于主上升气流的边沿主入流区和 0 线附近的上下侧,

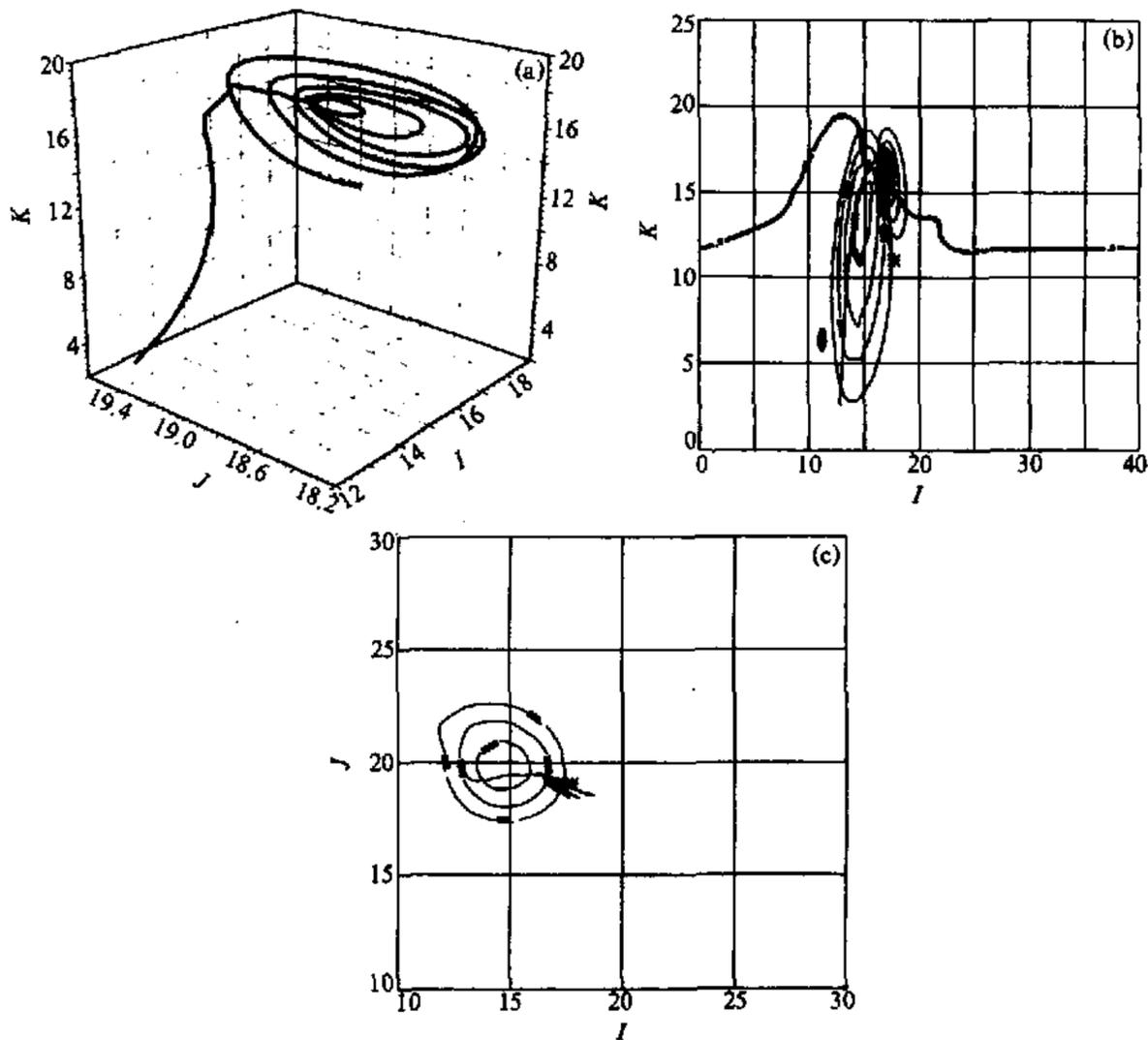


图 4 2168 号粒子的三维增长运行轨迹

- (a) 初始大小 $d=0.1$ cm, 初始位置为 (18, 19, 11) 的三维增长运行轨迹, 最终大小 $d=4.62$ cm;
 (b) 粒子在 $J=19$ 的 XZ 剖面上的轨迹投影, 粗线为 $u=0$, 标值的细线为上升气流等速度线 (单位: cm/s), 未标值的细线为轨迹;
 (c) 粒子在 $K=16$ 的 XY 剖面上的轨迹投影, 标值曲线为上升气流等速度线 (单位: cm/s), 未标值的曲线为轨迹

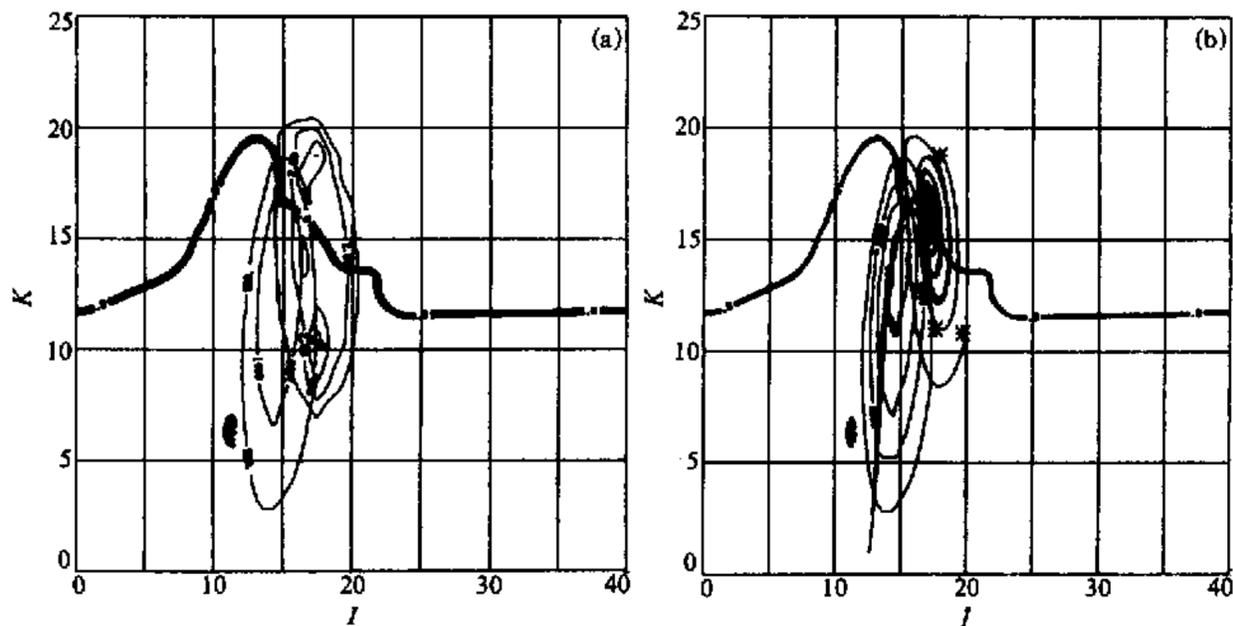


图 5 最终冰雹大小所对应的初始出发位置分布在 $J=19$ 的剖面图

(a) 标“0”粗线为 $u=0$, 标值为 500.0 以上的曲线为上升气流等速度线 (单位: cm/s), 标值为 2 的中粗曲线是最终冰雹的直径值 (单位: cm , 线间距: 1 cm); (b) 三个最大终极直径为 4.62 cm (2168)、4.21 cm (5368) 和 4.09 cm (2150) 的轨迹在 $J=19$ 的剖面图上的投影, 其初始位置用 * 表示, 其他说明同图 3b

下侧为水平风吹入区, 上侧为吹出区。大值轴在上升气流等值线 500 cm/s 到 1000 cm/s 之间。位置偏离这个轴的, 冰雹大小迅速减少, 在 3~5 个格点外, 冰雹已长不到 1 cm 。大雹粒子出发地虽然有集中地域, 但吹入区和吹出区皆有中心, 特别是垂直向比水平向宽。考虑到出发区不一定是大雹的汇集入口区, 进一步给出了三个不同出发地的最大冰雹在 $J=19$ 的 XZ 面上的轨迹投影图 5b。三个粒子的出发地对应着图 5a 中的上下二个大雹粒子出发地, 观察它们的轨迹可以发现, 上大雹出发区所以成大冰雹是它从此出发后又经过了下大雹出发区, 而三个大雹的轨迹汇集区则在靠近 0 线的中位大雹出发区。由此可见, 真正的可成大雹的粒子汇集入口区是相对来说很小的中位区, 它处于主上升气流边沿的 0 线下侧吹入区附近。这又一次表明这是一个关键性地域, 具有重要的意义。

在文献[12]中, 用二维模式已得出大雹的形成依靠于初始出发位置, 而对播撒粒子初始大小不敏感, 用三维模式进行的研究结果表明仍是如此。这意味着, 当播撒直径小时, 可以在离主上升气流中心远一点的地方, 找到进一步增长并进入冰雹形成区的位置。

XGL 算例与 GF 算例的区别是初始环境风场中 v 不等于零, 其模拟结果与 GF 算例的结果在物理上是一致的。

3.2 动态模拟的结果

为了考察静态模拟的结果在动态情况下的表现, 进行了动态模拟, 即在轨迹模拟中, 云在发展着, 云中气流、温度、湿度和过冷水比含量场都在随时间变。在这种变化着的宏微观场中, 粒子增长轨迹的规律性是否与静态模拟中相近呢? 图 6 给出了动态模拟的结果, 为了与静态的图 4b 相比较, 图中给出的是 $J=19$ 的 XZ 剖面图。可以看出, 从时次 1 到时次 3, 云处于发展中, 时次 1 的最大上升气流速度不到 10 m/s , 时

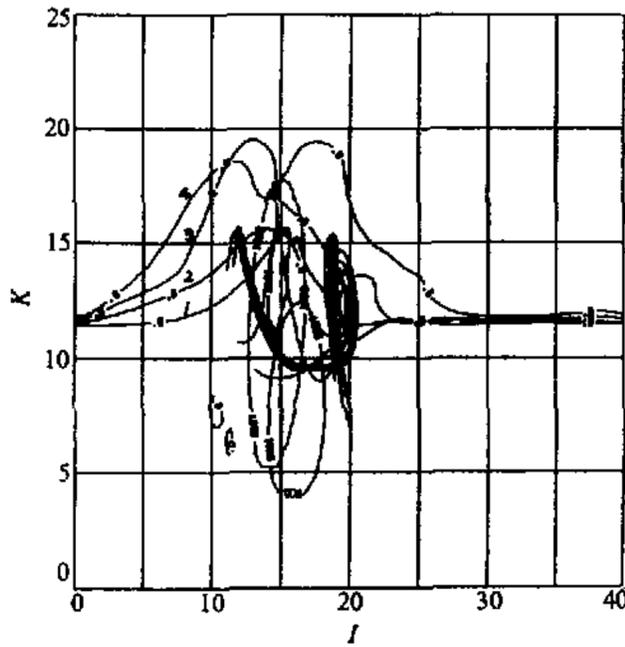


图 6 动态模拟中在 XZ 剖面上四个时次 (10、20、30、40 min) 的 $u=0$ 的零线 (标 0 的实线), 9 条长成冰雹的轨迹分布 (未标值的曲线) 和二个时次 (20、30 min) 的上升气流等值线 (细闭合曲线), 线上的标数代表时次, 其他说明同图 3b

结果见图 7~9。

表 1 平凉 1999 年 7 月 18 日 07 时 30 分的探空资料

p / hPa	867.8	850	700	500	400	300	200	100
H / m	1277	1458	3123	5840	7550	9630	12350	16730
$t / ^\circ\text{C}$	20.9	18.3	12.2	-7.1	-17.9	-33.9	-50.1	-63.1
$T_d / ^\circ\text{C}$	17.1	13.9	5.2	-14.1	-23.9	-40.9	-56.1	-65.0
$D / (^\circ)$	000	290	065	041	285	315	315	330
$v / (\text{m/s})$	00	07	03	04	03	07	09	10

对比图 8a 和 b 可见。在 $I=17\sim 20$ 、 $J=20$ 和 $K=15\sim 20$ 区域是靠近主上升气流中心的水平速度接近于零的零域; 在图 8b 中, 处于 $u=0$ 的零线上的 $I=17\sim 20$ 、 $K=15$ 的区段是 $u=v\approx 0$ 的零域。从图 7a 和图 8b 来看, 这个区段的下方也是主入流区所在的地方。

由图 9 可见, 所有长成大雹的增长运行轨迹, 都是在 $u=v\approx 0$ 的区域循环交叉增长运行的, 在增长中进入主上升气流区, 长成大雹后从主上升气流区落下。

平凉实例的模拟结果, 和理想场算例的结果一样, 在主上升气流区边侧存在着 $u=v\approx 0$ 的水平气流零域, 在其下是主入流区, 存在和具有同样的动力性能。

5 模拟结果的讨论

(1) 从第 3、4 节的模拟中, 不论是具有雹暴特征的理想环境场算例, 还是实况个例, 在主上升气流区边侧都存在着水平速度为零的区域。因为对流流场的基本特征是在垂直向滚翻, 低层气流辐合, 上层气流辐散, 对流中心气流垂直上升; 低层气流吹入,

次 3 超过了 20 m/s , 到时次 4 时最大上升气流又小于 10 m/s 。虽然图面上不及图 4b 那么简明, 但还是可以看出这些轨迹仍然绕着 0 线在循环增长, 且每个粒子在长大以后, 都是从 0 线处落下的规律与静态模拟的结果一致。

4 实例模拟

为了进一步考查上述结果的规律性, 对一批发生了冰雹的云实例进行了模拟, 查看这些规律在实例中是如何表现的。本文仅介绍平凉实例的模拟结果 (表 1)。

从表 1 列出的温度、湿度、气压值作初始场, 以所列出的风向的风速值为基础, 参照回波单体的移向移速, 求出其相对于风暴的风场作初始风场。数值模拟的

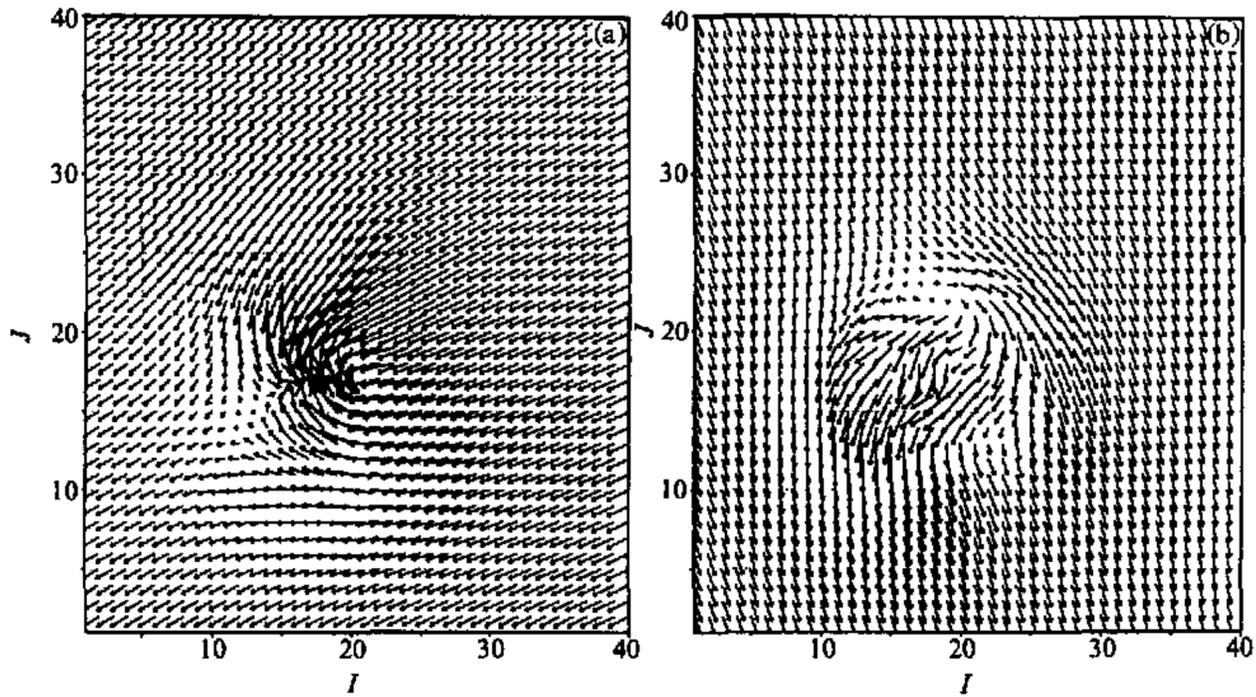


图 7 PL 算例模拟到 25 min 的流场, (a) $K=5$ 水平剖面; (b) $K=15$ 水平剖面

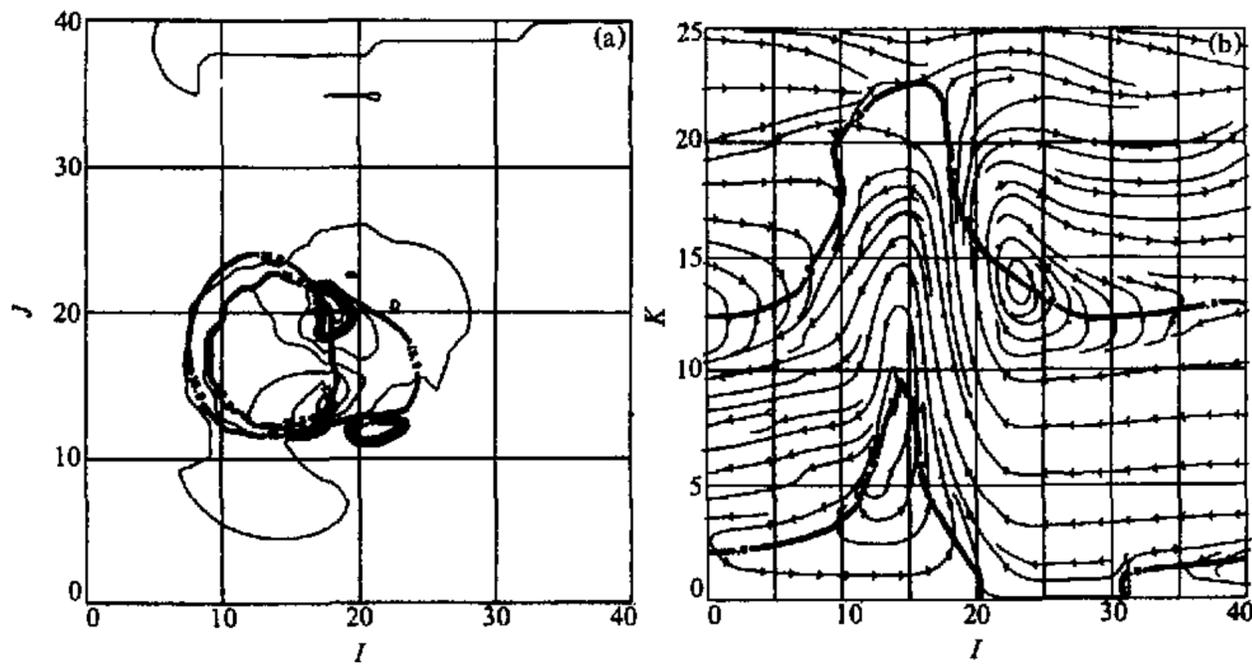


图 8 PL 算例的 $u=0$ 曲面中的 v 分布 (a); $J=20$ 的垂直剖面上的流场 (b), 其他说明同图 3

高层气流吹出, 中间会有一个水平速度为零的转折区。

(2) 在对流流型中垂直气流与水平气流的配置, 决定了进入流场中水平速度零域的粒子具有独特的运行轨迹。以图 3c 型为例, 处于 A 点的粒子如何运行可分三种情况。第一种情况, 粒子的落速大于当地的上升气流, 它在水平上是向(对流轴)心运行, 在垂直上是向下运行, 随粒子的如此运动, 上升气流在增强, 向心水平运行也变大, 逐渐改变了粒子垂直向的运行方向, 由落下变成上升。在穿过 0 线后, 向心运动变成了离心运动, 在这种运动中, 粒子环境的上升速度在逐渐变小, 导致粒子又由上升转为下落, 在下落中水平风速逐渐变弱, 使粒子垂直地落过 0 线, 回到了与出发地 A 点相当的状态, 完成一次循环运行。如果粒子在运行中不增长, 模拟结果表明, 粒子只循环不旋进向主上升气流, 也吹不出去。第二种情况, 如果粒子落速小于当地上升气流, 这相当于

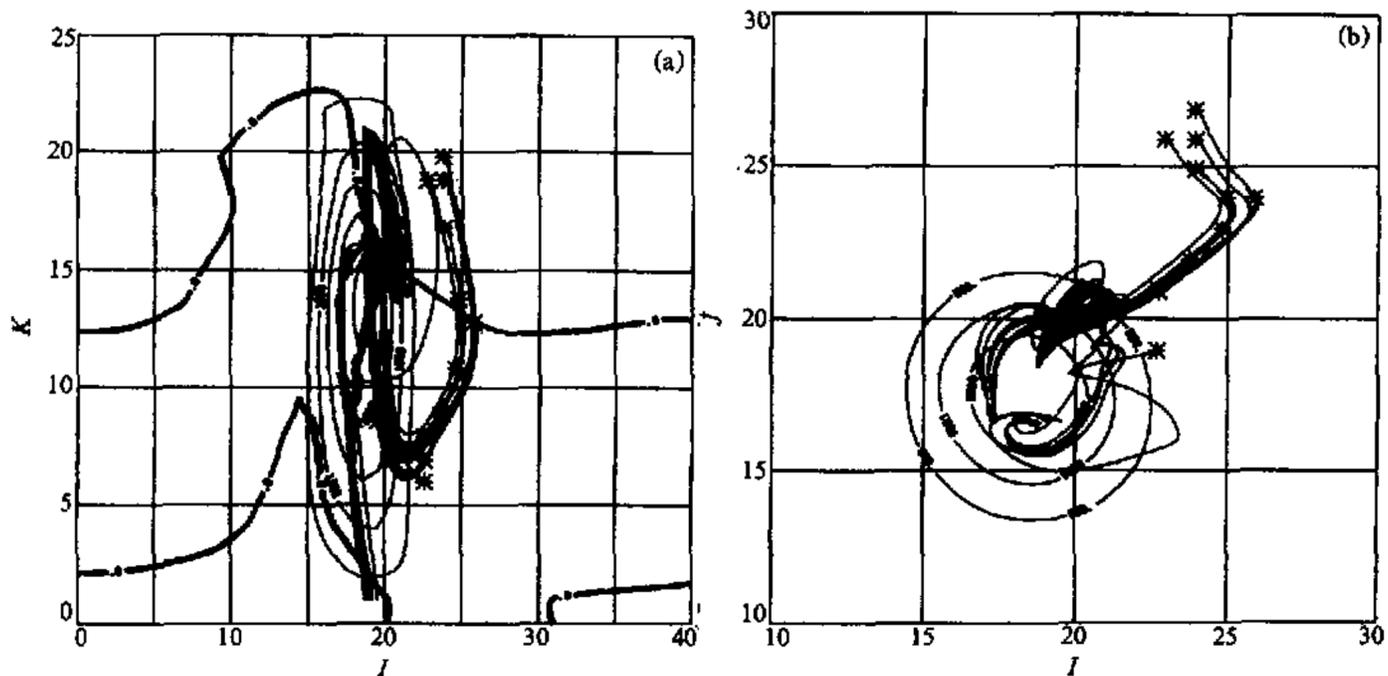


图9 PL算例中12条大雹 ($d > 3.86$ cm) 增长运行轨迹

- (a) $J=20$ 垂直剖面上的投影, 粗实线: $u=0$ 的等值线, 细实线为上升气流速度等值线, 单位: cm/s ;
 (b) 在 $K=15$ 水平剖面上的投影, 起点坐标为 (10, 10), 带“*”的为轨迹线, *处为出发地, 闭合实线为上升气流速度等值线, 单位: cm/s

第一种情况下的运行轨迹从 A' 点开始, 循环运行轨迹与第一种情况相似。第三种情况, 如果粒子处于 0 线上, 且落速与当地上升气流相等, 则原地不动。同理, 处于 0 线以上位置的粒子也应有如此的运行轨迹。当这些粒子在运行中增长时, 它们的落速在增加, 它们在吹入区会深入更长的距离, 而在出流区会运行得更短, 从而使循环轨迹圈一边贴近 0 区域一边向主上升气流中心旋进。

(3) 从以上的讨论中, 已看出水平气流的重要性。过去人们只强调在主上升气流区, 由于上升气流速度大, 小粒子存留时间短, 长不成毫米大小; 而在主上升气流的边沿, 由于上升气流弱可以有时间来得及长大。但是也应该注意到, 在上升气流弱的地方, 如果水平速度大, 也会使粒子长不大而吹出。所以适合于粒子长时间留存的地方是在上升气流边侧的水平速度上下反向的零域, 这里即使垂直速度大些或小些, 由于粒子的运动与对流流场会自动调节适应, 会找到合适的存留地点, 这为霰胚的形成创造了条件。粒子进入这个地域, 只能随着它的长大逐步由人流带它进入主上升气流区, 而难以从别处吹离。零域的弱上升气流端是胚胎生长区, 零域的主上升气流端是大雹成长区, 中间的零域下方入流区是粒子增长旋进进入主上升气流区的通道, 构成一个冰雹生长的“穴道”, “穴”是指粒子进入这个地域就出不去了, “道”是指大雹形成的必由之路, 粒子在长大成雹后才能落出。冰雹形成“穴道”的存在和位置是由流场决定的, 而过冷水场 (过冷量和比含量) 决定着增长率, 即影响冰雹在“穴道”内的旋进的路径长短和速度。

(4) 前面已经指出, 在雹云的条件下, 播撒造成的小尺度冰粒子, 通过凝华、淞附和攀附长成毫米级的雹胚, 需要有 10 min 左右的时间, 而就是在这个“穴道”中最有利于它的滞留。因而可以得出结论, 只要播撒在“穴道”区, 就有条件形成人工雹胚, 而且它们的运行增长轨迹会与自然雹胚运行增长轨迹相交叉, 因而达到平等地去争食路径中的过冷水, 实现了人工雹胚与自然雹胚的平等“竞争”。

(5)“穴道”是对应着对流单体的, 在多单体雹云会有一个以上的“穴道”, 这在文献[11]中已有体现。当然随着雹云流场的发展,“穴道”的位置和空域会变化, 在发展阶段, 它会抬升和扩大, 而在雹云维持阶段会少变。根据文献[16, 17], 超级单体持续时间的典型值是 30 min 到 1 h, 偶而可达几小时。最大雷达回波顶波动也是相当小的, 通常不超过 1 km, 最大反射率结构, 如穹窿(有界弱回波区)可以有起伏, 但不消失。这都表现超级单体的结构特征在维持期保持稳定, 这类似于静态模拟的情况。“穴道”的稳定存在时空上有利于大雹的形成, 这也是超级单体雹暴常带来灾害性降雹的原因。如果流场的变动很大,“穴道”时现时消, 在时空上不利于大雹的形成, 集聚的大粒子在“穴道”消失时就会骤然下落, 形成阵雨或阵雹。但可以想像, 在对流云中都会存在这种“穴道”, 强者有利于冰雹的产生, 弱者有利于大降水粒子的形成。

综合以上的讨论, 得到的结果是有规律性的, 不是个例的特殊表现。

6 结语

(1) 强对流(雹)云的流场的特征, 以及相应的过冷水凝结物场的配置, 决定了雹云中存在着一个成雹“穴道”, 它位于主上升气流旁侧的相对(于雹云)水平风速近于零的主人流区下侧, 出口端是主上升气流中心, 这里适合于大雹形成; 入口端是主上升气流的边沿, 这里适合于雹胚形成。“穴道”的动力特点是, 粒子一旦进入很难被吹出, 自然地进行循环增长旋转进入主上升气流区长成大雹, 在上升气流托不住时下落。这个“穴道”的存在和位置是由对流流场的特征决定的, 在“穴道”中粒子的增长率的快慢和进入主上升气流中心的路途长短是由过冷水场(过冷度和量)来决定的。

(2) 在雹云的宏微观场随时间演变中, 上述规律仍然存在, 只不过随着流态的变化,“穴道”的位置在变化, 但对于一个发展和维持的云体, 其位置大体上也是稳定的, 这也是长生命史、结构稳定的超级单体雹云产生灾害性冰雹的原因。

(3) 只要把人工粒子播撒到“穴道”之中, 它们就有条件去形成雹胚。在“穴道”内部, 不论是自然粒子, 或是播撒的人工粒子, 都具有三维空间的旋转轨迹, 由于它们是相互交叉的, 从而是平等地在耗用过冷水, 可以实现人工粒子与自然粒子的平等“竞争”。播撒只需在“穴道”内进行, 甚至只需耗尽穴道中的局部过冷水量, 就可以中断向主上升气流的粒子输送, 尽管主上升气流区其他地方存在着大量过冷水, 也难有“食”用者光顾。

(4)“穴道”的体积, 依据各算例的多条轨迹在XY面上的投影来估计, 再考虑到它处于云体的移向靠近水平风为 0 的下方, 位置在云体的中下部, 即占云体空间 8 个象限中下部四个象限中的 1/8 (总体 1/16) 或更小。

参 考 文 献

- 1 WMO Meeting of experts to review the present status of hail suppression, WMO / TD-NO, 1995, 746.
- 2 章澄昌, 人工影响天气概论, 北京: 气象出版社, 1992, 184~185.
- 3 Foote, G. B., Future aspects of the hail suppression problem, Seventh Conference on Inadvertent and Planned Weather Modification, October 8~12, 1979, Banff, Alta, Canada, 180~181.
- 4 Kartsvedge, A. I. et al., Modification of hail processes, Proceedings of international conference on cloud physics.

- August, 26~30, 1968, 778~780.
- 5 王昂生、N. Fukuta, 在新的模形冰面热力扩散云室里冰晶性能演变的研究, 中国科学(B), 1984, 12, 1155~1162.
 - 6 Gokhale N. R. and K. M. Rao, Theory of hail growth, *J. Rech. Atmos.*, 1969, 4, 153.
 - 7 Young, K. K., Weather modification—A Theoretician's point, *Bull. Amer. Meteor. soc.*, 1996, 77(11), 2701~2710.
 - 8 Gokhale, N. R., 雹暴和雹块生长(中译本), 北京: 科学出版社, 1981, 96~97.
 - 9 Paluch, I. R., Micro-physical Modeling, Chapter 8, Hailstorms of The Central High Plains I: The National Hail Research Experiment, Colorado Associated University Press, Boulder, Colorado, 1982, 201~206.
 - 10 Xu Jia-Liu, Hail growth in a three-dimensional cloud model, *J. Atmos. Sci.*, 1983, 50, 185~203.
 - 11 王思微, 许焕斌, 不同流型雹云中雹增长运行轨迹的数值模拟, 气象科学研究院院刊, 1989, 4(2), 171~177.
 - 12 段英, 刘静波, 单体、多单体和超级单体雹云中雹形成的数值模拟, 气象学报, 1998, 56(5), 529~539.
 - 13 许焕斌, 王思微, 三维可压缩大气中的云尺度模式, 气象学报, 1990, 48(1), 80~90.
 - 14 丁一汇, 高等天气学, 北京: 气象出版社, 1991, 401~404.
 - 15 李吉顺, 田生春, 北京地区强对流天气环境风垂直分布的一些统计特征, 强对流天气文集, 北京: 气象出版社, 1983, 149~152.
 - 16 Knight, C. A., W. A. Cooper et al., *Microphysics, Hail Storms of the Central High Plains. I: The National Hail Research Experiment*, Colorado Associated University Press, Boulder, Colorado, 1982, Chapter 7, 151~171.
 - 17 Knight C. A., P. Smith et al., *Storm Types and Some Radar Reflectivity Characteristics*, Colorado Associated University Press, Boulder, Colorado, 1982, Chapter 5, 85.

The Mechanism of Hailstone's Formation and the Hail-Suppression Hypothesis: "Beneficial Competition"

Xu Huanbin and Duan Ying

(Weather Modification Office of Hebei Province, Shijiazhuang 050021)

Abstract In the "beneficial competition" hypotheses, which is most promising for the hail-suppression, there is a key problem: how to realize the competition between the natural embryo and artificial one in growth of them by depletion of super-cold liquid water existed in cloud. In fact, it is not only a key to the principle of hail-suppression but also to the physics of hailstorm. With the analysis of the airflow pattern and the studies of simulation for hailstorm and hailstone's growth-travel trajectories, it is found that: (1) Due to the strong convective airflow of hailstorm there must be a core of main-updraft (MUD) and an area by the core of MUD in which the horizontal wind-speed relative to hailstorm equals zero. In the vertical section, there is a zero-line from the edge to core of MUD. Below this line wind blows towards the core, and upon this line wind blows away. The growth-travel trajectories of cloud particles are rotating by this line and can enter the core of MUD circle by circle while forming hailstones. (2) In hailstorm there is a "cave channel" (CC), whose location is close to the core of MUD and below the zero area. Its volume is about 6% or even smaller of total of hailstorms. The region of embryo formation is in the entrance-end of CC, and the region of hail formation is in the exit-end of CC close to or in the core. Once the particle enters CC, it cannot escape the attraction of CC, just like a trap, until it becomes large stone and falls down from exit-end. As long as the artificial particles are seeded in CC and their trajectories may cross with natural ones, the "beneficial competition" between the natural and the artificial embryos can be realized equally. (3) The existence of CC and its location depend on the airflow, and the rate of hailstone's growth and the length of trajectories depend on the field of super-cold hydrometeor.

Key words: hail; formation mechanism; hail suppression