

寿绍文 杜秉玉 肖稳安
励申申 温市耕

中尺度 对流系统 及其预报

气象出版社

中尺度对流系统及其预报

寿绍文 杜秉玉 肖稳安

励申申 温市耕 编 著



气象出版社

(京)新登字046号

内 容 简 介

本书前三章分别讨论了在中纬度地区常见的中尺度对流系统如孤立对流系统、带状对流系统及中尺度对流复合体的结构特征和发生发展规律,后几章则讨论了中尺度对流系统的分析、预报原理和方法,包括概念模式和经验规则的应用、中尺度数值模式和动力-统计预报方法的应用、多卜勒雷达及地球静止卫星资料的应用等。本书可作为气象院校教材和科研业务人员的参考书。

中尺度对流系统及其预报

寿绍文 杜秉玉 肖稳安
励申申 温市耕 编著
责任编辑 俞卫平

*

气象出版社

(北京西郊白石桥路46号)

北京市昌平环球印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行 全国各地新华书店经销

*

开本: 850×1168 32 印张: 7.125 字数: 182千字

1993年2月第一版 1993年2月第一印刷

印数: 1-800

ISBN7-5029-1212-6/P·0554

定价: 6.70元

前 言

中尺度对流系统是指水平尺度为10几千米至2000千米左右的具有旺盛对流运动的天气系统。许多严重的灾害性天气,如雷暴、雷暴大风、冰雹、龙卷和暴雨等都与中尺度对流系统相联系。本书的目的是对中尺度对流系统的观测特征、发生发展和移动规律以及中尺度对流系统的甚短期预报和临近预报方法作一概要的介绍。全书共六章,前三章介绍几种中尺度对流系统的观测特征和一般规律。第四章介绍中尺度对流系统的预报,第五章和第六章分别介绍了雷达和卫星资料在中尺度分析和预报中的应用。一至四章由寿绍文编写,励申申参加第二、四章的编写,温市耕参加第四章编写,第五章由杜秉玉编写,第六章由肖稳安编写,全书由寿绍文统编。

由于作者水平有限,书中可能存在不少错误和不足,敬请读者提出宝贵意见。

本工作由国家自然科学基金项目、气象科学基金项目及八·五攻关项目等联合资助。

编著者

1992年10月10日

目 录

前言

第一章 孤立对流系统	(1)
§1.1 孤立对流系统的基本模式及观测特征.....	(1)
§1.2 环境热力和动力结构对孤立对流系统的综 合影响.....	(16)
§1.3 风垂直切变对雷暴的组织 and 分裂作用.....	(21)
参考文献	(30)
第二章 带状对流系统	(32)
§2.1 飕线.....	(32)
§2.2 锋面气旋附近的中尺度雨带.....	(45)
§2.3 地形对锋面降水的影响.....	(68)
§2.4 台风中的中尺度雨带.....	(76)
参考文献	(81)
第三章 中尺度对流复合体	(83)
§3.1 MCC的结构和特征	(83)
§3.2 MCC的天气尺度环境	(91)
§3.3 对流复合体的运动.....	(99)
§3.4 准静止对流系统的发展和类型.....	(105)
参考文献	(110)
第四章 中尺度对流系统的预报	(112)
§4.1 中尺度预报方法概论.....	(112)
§4.2 概念模式和经验规则在预报中的应用.....	(119)
§4.3 中尺度数值模式及动力-统计预报方法的 应用.....	(141)
参考文献	(153)

第五章 雷达探测强风暴和暴雨	(157)
§5.1 原理.....	(157)
§5.2 雷暴结构.....	(158)
§5.3 飚线的雷达回波特征.....	(162)
§5.4 梅雨期降水的雷达回波特征.....	(163)
参考文献	(173)
第六章 卫星探测资料在中尺度天气分析和预报中的应用	(175)
§6.1 卫星云图资料在中尺度天气分析中的应用.....	(175)
§6.2 气象卫星定量观测资料及其应用.....	(194)
§6.3 用卫星资料估计对流性云的降水量.....	(203)
§6.4 对流降水短期预报方法.....	(208)
参考文献	(217)

第一章 孤立对流系统

中尺度对流系统指水平尺度为10几千米至2000千米左右的具有旺盛对流运动的天气系统。在中纬度常见的中尺度对流系统有三类：孤立对流系统、带状对流系统以及中尺度对流复合体。从本章至第三章我们将分别讨论这些系统。

孤立对流系统指以个别单体雷暴、小的雷暴单体群以及某些简单的飑线等形式存在的对流系统。较大、较复杂的对流系统，如飑线、中尺度对流复合体（MCC）等都是由个别孤立对流系统组成的。因此，了解孤立对流系统的特性是了解更复杂的对流系统的基础。本章将讨论孤立对流系统的基本模型、观测特征以及控制孤立对流发展和演变的物理机制。

§1.1 孤立对流系统的基本模式及观测特征

根据Chisholm和Renick (1972) 分类，孤立对流系统有三种基本类型，即普通单体雷暴、多单体风暴以及超级单体风暴。下面我们来分别讨论它们的观测特征。

1. 普通单体雷暴

通常把一个强上升区（其垂直速度 ≥ 10 米/秒，水平范围十至数十千米，垂直伸展几乎达整个对流层）称为一个对流单体。只由一个对流单体构成的雷暴系统叫做单体雷暴。不同的雷暴，其所伴随的天气现象的激烈程度差别很大。以一般常见的闪电、雷鸣、阵风、阵雨为基本天气特征的雷暴称为“普通雷暴”，而伴以强风、大雹、龙卷等激烈灾害性天气现象的雷暴则称为“强雷暴”。普通雷暴又有单体雷暴和雷暴群之分。其中的单体雷暴即称为普通单体雷暴。

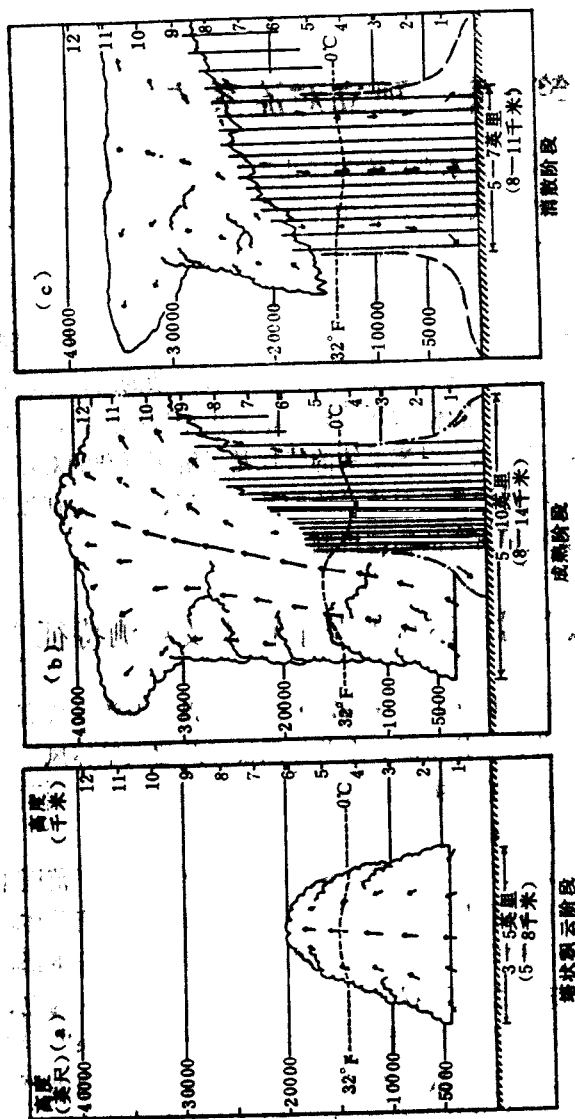


图1.1 单体雷暴生命史及各发展阶段的结构特征
(a) 塔状积云阶段; (b) 成熟阶段;
(c) 消散阶段。(Doswell, 1984)

1946年及1947年夏季, Byers 和 Braham等在美国组织了雷暴的野外观测研究。他们利用雷达和站距为1英里(约1609.3米)的测站网以及1—5分钟间隔的连续的观测记录,对雷暴的结构和发展过程作了细致的研究,建立了普通单体雷暴生命史模式。图1.1是经过Doswell修改后的Byers-Braham雷暴生命史模式。

由图1.1可见,单体雷暴的发展经历塔状积云、成熟和消散三个阶段。在塔状积云阶段,云内为一致的上升运动。到成熟阶段,上升气流变得更强盛,云顶出现上冲峰突,同时,降水开始发生,并由于降水质点对空气产生拖曳作用,在对流单体的下部产生下沉气流。雨滴蒸发使空气冷却,下沉气流受负浮力作用而被加速。当下沉气流到达地面时,形成冷丘和水平外流,其前沿形成阵风锋。到消散阶段,云内下沉气流逐渐占有优势。最后下沉气流完全替换了上升气流。完成上列发展序列,通常需经历30—50分钟。在此期间,雷暴系统一般随最低5—8千米高度的环境平均风移动。所伴随的强天气有阵风、阵雨、小雹,时间一般十分短暂。

2. 多单体风暴

多单体风暴是由一些处于不同发展阶段的生命期短暂的对流单体所组成的,是具有统一环流的雷暴系统。在多单体风暴中虽然包含很多对流单体,每个单体可能都有冷的外流,但这些外流结合起来形成了大的阵风锋。沿阵风锋的前沿有气流辐合。通常在风暴移动方向上辐合最强。这种辐合促使沿阵风锋附近新的上升气流发展。然后每个新生对流单体又经历其自身的发展过程。这样一来,虽然每个单体的生命期不长,但通过单体的连续更替过程,可以使风暴整体的生命期很长。图1.2是一个多单体风暴结构的示意图。图中的多单体风暴由4个处于不同发展阶段的单体构成。其中最南面的是最年青的单体。箭头表示发展单体中的一个气块的轨迹。在多单体风暴中有一对明显的有组织的上升和下沉气流。这和普通的雷暴群不同。后者也是由许多对流单体集合而形成的,但这些对流单体之间相互独立,并不构成统一环流。

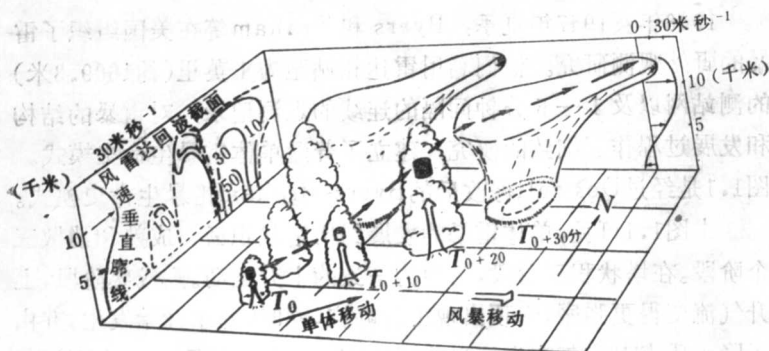


图1.2 多单体风暴结构的示意图

图1.3是一个发生在美国Colorado地区的多单体风暴的垂直剖面图。可以看到在风暴中有一对上升、下沉气流，而整个风暴则由4个处于不同发展阶段的单体组成。其中单体 $n+1$ 处于初生阶段， n 处于发展阶段， $n-1$ 处于成熟阶段，而 $n-2$ 则处于消散阶段。

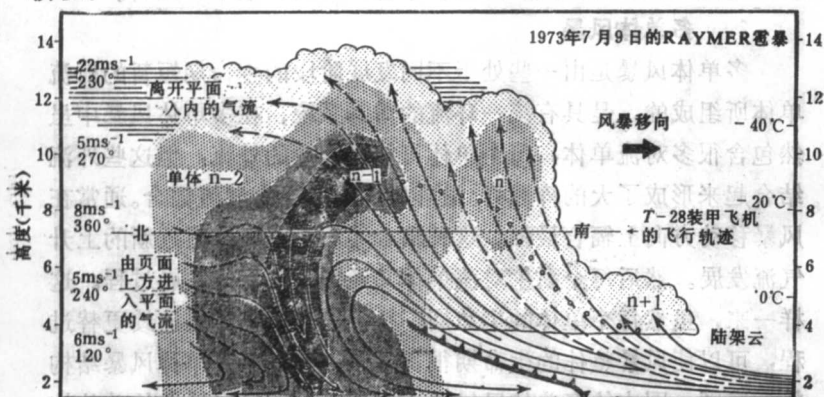


图1.3 一个多单体风暴的垂直剖面图(剖面沿风暴移动方向, 依次穿过处于不同发展阶段的单体, 实线箭头表示相对于移动系统的气流流线。在图左的破折流线表示流进和流出平面的气流)

(Browning, 1976)

多单体风暴中的单体呈有组织的状态，这和新单体仅出现在一定的方向上有关。如果新单体可以出现在各个方向上，则便会呈现无组织的形态。

在这种有组织的多单体风暴中，每个个别单体大致沿平均风方向移动，但是由于风暴中的每个单体都有自己的发展过程，因此风暴整体的移动则可能偏离平均风方向。这种风暴移动和传播的特性可由图1.4表示。由图1.4可见，在多单体风暴中，个别单体的传播可以有三种不同的方式：（1）个别单体向平均风左侧传播；（2）个别单体向平均风右侧传播；（3）个别单体随环境风而移动；

多单体风暴在其阵风锋附近可能产生生命期短暂的龙卷，在其强上升气流中心地区可能产生冰雹。当风暴移动缓慢时，则可能形成局地暴雨和洪水（参见第三章）。

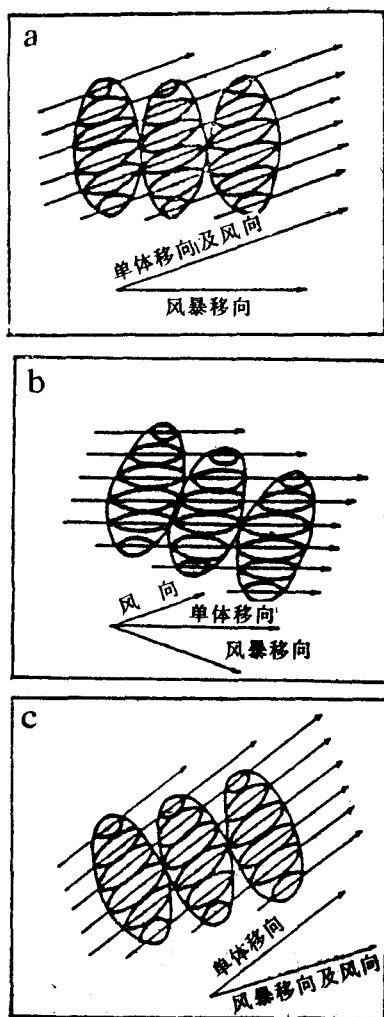


图1.4 根据多单体风暴实例总结出的多单体风暴整体运动和单体运动的概念模型图

(Marwitz, 1972)

3. 超级单体风暴

超级单体风暴是指直径达20—40千米以上，生命期达数小时以上，即比普通的成熟单体雷暴更巨大、更持久、天气更猛烈的单体强雷暴系统。它具有一个近于稳态的、高度有组织的内部环流。并且连续地向前传播，其移动路程可达数百千米。在雷达观测上超级单体有下列明显特征：（1）在RHI（距离—高度显示器）上有穹窿（无或弱回波区）、前悬回波和回波墙等特征；（2）在PPI（平面位置显示器）上有“钩”状回波（图1.5）。

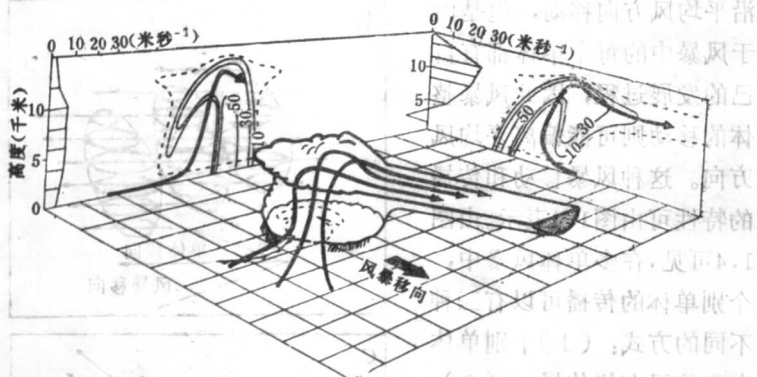


图1.5 一个超级单体的三维结构示意图

(Chisholm和Renick, 1972)

穹窿是风暴中强上升气流之所在处。在这里上升气流速度可达25—40米/秒以上。由于上升速度强，水滴常常尚未来得及增长便被携出上升气流，因此而形成弱（或无）回波区。穹窿有时呈现为圆锥形的弱回波区，称为有界弱回波区（BWER），它可以伸展到整个风暴的一半到三分之二的厚度。当出现BWER结构时，一般指示在强上升气流中有围绕垂直轴的强烈旋转存在。弱回波区附近的强回波柱是强下沉气流所在处。这里下沉气流的强度可达与上升气流相同的量级。强降水（雨、雹）都发生在这里。在弱回波区与强回波柱之间反射率梯度很大的地区称为回波墙。在弱回波区上方的向前伸展的强回波区称为前悬回波，即风暴云的

砧部。它包含有大量的雹胚，所以也称为胚胎帘，它可以为冰雹的生长提供丰富的雹胚。超级单体风暴的外观呈圆或椭圆形，云体高大，水平尺度 20—40 千米以上，垂直伸展 12—15 千米以上，云顶表现为庞大而平滑的圆顶状，这是活跃稳态风暴的特征，说明云中上升气流随时间变化不明显。图 1.6 是一个超级单体的垂直剖面图，超级单体风暴的所有典型特征在其中都有清楚的表现。

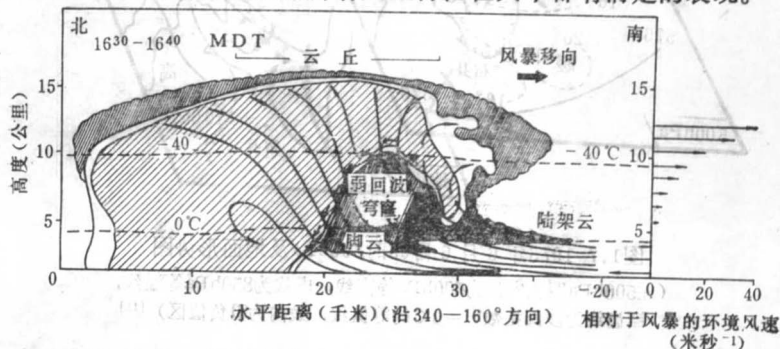


图 1.6 一个超级单体的垂直剖面图
(Browning, 1976)

在我国夏季也常发生超级单体风暴，并引起雹灾。例如 1975 年 6 月 6 日发生在安徽省宿县地区的一个雹暴就是一个超级单体风暴^[15]。该日 08 时，500 百帕等压面上北方为一冷涡，中心位于蒙古。皖北处于高空西北气流控制之下，天气晴朗，气团不稳定，河北、山东为沙氏指数负值区，徐州的沙氏指数为 0°C。由于高层有弱冷平流、低空有暖平流，加上晴空区地面非绝热加热作用明显，又有盖帽逆温层阻挡对流的发展，因此低层结趋于更不稳定。地面图上，皖北地区当天没有明显锋面影响，处于单一变性气团之中，但在鲁南至皖北一带，地面有一“V”字形低槽，槽中有近于南北向辐合线。14 时，辐合线移至山东菏泽至河南光化一带，宿县北部正处在 V 形槽的气旋性曲率最大部位的前部（图 1.7）。

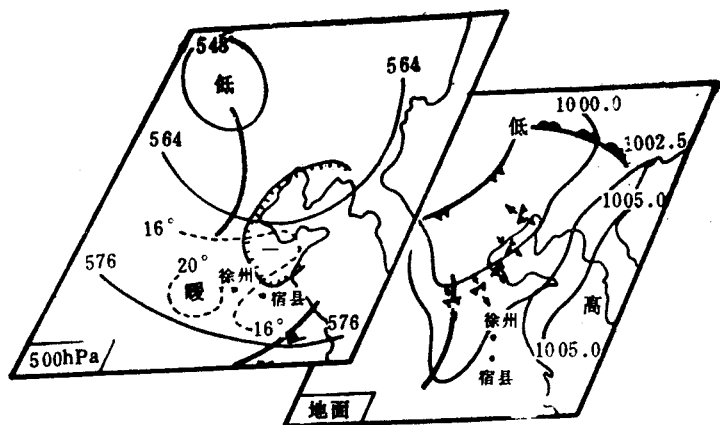


图1.7 1975年6月6日08时500hPa及地面形势图

(在500hPa图上实线为500hPa等高线，虚线为850hPa等温线，锯齿线为沙氏指数 $SI=0^{\circ}\text{C}$ 的等值线，线内为 SI 负值区) [15]

宿县地区北部由于受地面V形槽和辐合线的影响，当天17时左右开始在宿县与肖县交界的符离集一带出现对流云，并且发展十分迅速。18时15分左右形成一个大的回波，18时43分至19时23分这个孤立回波移动缓慢，随后则较快地向东南方向的泗县一带移去（图1.8）。整个过程经历了约四、五个小时以上，云体移动上百千米。其间，在19时前后，云体发展最为旺盛，回波中心强度达30dBz以上，最高回波顶高度达12千米，风暴经过之处，不少地方下了冰雹，最大雹块直径约为2.5厘米。19时03至08分，增益分别衰减0、5、10、20及30dBz，摄下5张RHI回波照片，据此绘成一张回波强度分布图（图1.9）。由图可见，有三个重要的回波特征，即（1）有一个前伸悬垂体回波；（2）有一个有界弱回波区；（3）有一个强回波柱。

超级单体风暴是天气最猛烈的一类对流性风暴，地面强风、大雹和龙卷等灾害性天气现象常常由这种风暴产生。下面我们对产生龙卷的超级单体风暴再作较详细的讨论。

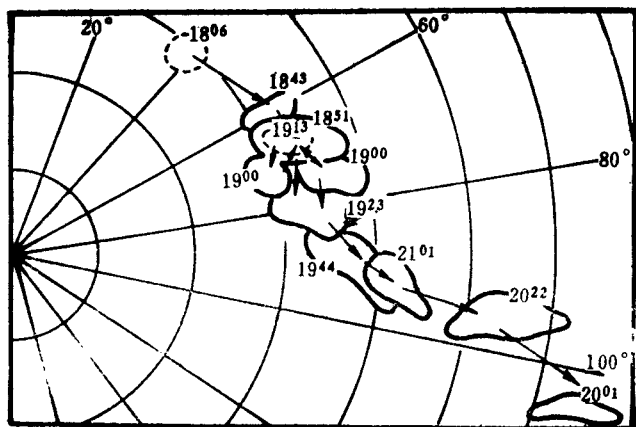


图1.8 1975年6月6日18—21时的强回波动态图。

(宿县雷达站观测, 距离: 每圈10千米) [12]

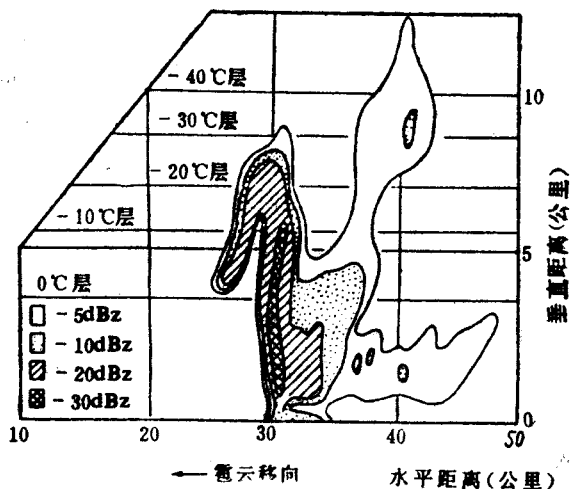


图1.9 1975年6月6日19时03—08分雷达RHI回波图

(宿县雷达站观测, 方位65°) [12]

4. 龙卷风暴

产生龙卷的强风暴系统称为龙卷风暴。这种风暴云十分高大

并有明显的旋转性，通常是一种超级单体风暴。图1.10描绘了这类超级单体风暴的外观形象。



图1.10 一个伴有龙卷的超级单体风暴的外观形象^[18]

从图1.10可见，在超级单体风暴中心上升气流最强处有一个上冲云顶，云砧伸向前方，云底有一个旋转的壁云，龙卷漏斗云由壁云向下伸至地面。图1.11表示龙卷型超级单体风暴的地面特征。由图1.11可见，在钩状回波所在处，地面有一个非常类似于天气尺度锢囚波动的中尺度波动。这是一个与地面中尺度气旋相联系的强烈环流。图中标注FFD处为风暴前侧的下沉气流区，标注RFD处为后侧的下沉气流区，标UD处为上升气流所在位置。龙卷通常形成在“锢囚”点附近（在钩状回波边缘上），在上升和下沉过渡带上（但在上升气流之中）。

有时一个超级单体风暴可以依次形成几个龙卷，造成“龙卷簇”。其原因是由于超级单体中的中尺度气旋在一定的条件下，可能出现多次锢囚和新生过程。图1.12可用来解释这种锢囚和新生过程。从图可见，当第一个中气旋的冷锋赶上暖锋而出现锢囚时，老风暴中心的暖湿空气供应便被切断。这时流入雷暴的上升气流位于锢囚中心的东边而形成一个新的中气旋，而老的中气旋则趋于填塞。这种过程重复进行，便形成了龙卷簇。

如上所述，超级单体风暴钩状回波附近的中尺度气旋是容易

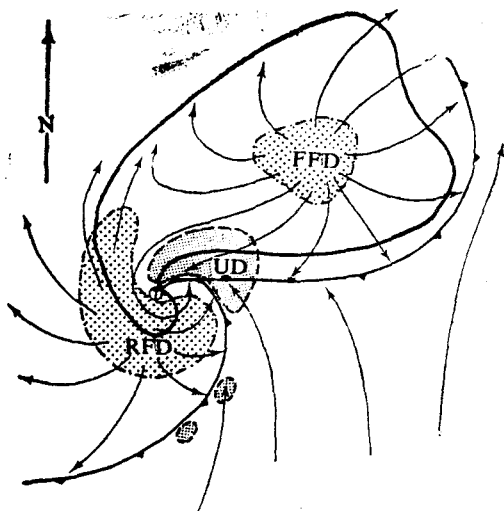


图1.11 龙卷风暴地面结构的平面示意图 (粗实线为雷达回波范围, 箭头线为相对于地面的流线, T表示龙卷的位置 (Tcmon和Doswell, 1979))

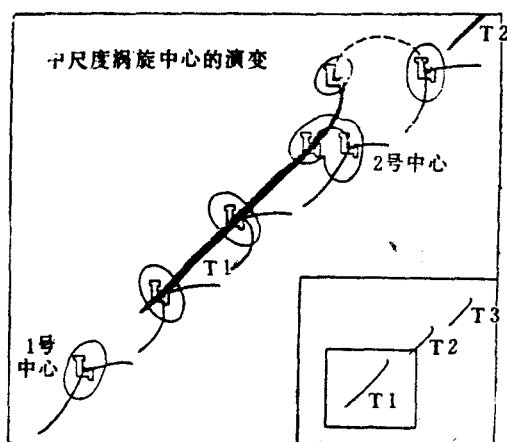


图1.12 锢囚超级单体内中尺度气旋中心演变的概念模型 (粗线表示低层风不连续线及龙卷轨迹, 右下角小图表示龙卷簇的轨迹, 小框表示主图所在的位置。中气旋的锢囚也可以看作是风暴主要上升气流的锢囚。)(Burgess et al., 1982)