

# 第四章 对流性天气过程

## 引入

本章属于中小尺度天气过程，以往的很多近似（地转近似、静力平衡等）都不再适用。在暖季，当大气层结处于不稳定状态、空中有充沛水汽、并有足够对流冲击力的条件下，大气中对流运动得到强劲发展，其所形成的天气系统称对流性天气系统，如雷暴、龙卷、飚线、冰雹等。

## 4.1 概述

- 对流性天气特征** 由大气中的**对流不稳定层结**造成的，并伴有**阵雨、大风、冰雹、龙卷**等天气现象。
- ① 对流性天气都是对流旺盛的**积雨云 Cb**的产物。
  - ② 对流性天气具有**范围小，发展快**的特点。
  - ③ 对流性天气发展剧烈，**易形成灾害**。
  - ④ **要素场梯度大**，天气现象非常激烈，典型大尺度散度为 $10^{-5}/s$ ，中尺度雷暴中散度为 $10^{-3}\sim 10^{-4}/s$ ，通常观测为 $50\sim 100\times 10^{-5}/s$ ，而龙卷的散度为 $10^{-2}/s$ 。
  - ⑤ **不满足地转风平衡和静力平衡**。在对流旺盛的Cb中，浮力可以使气块产生很大的垂直加速度。龙卷的直径很小，旋转取决于离心力和气压梯度力的平衡，可以是气旋或反气旋式的。

## 尺度

称2~20km的尺度为 $\gamma$ 尺度，20~200km的为 $\beta$ 尺度，200~2000km的为 $\alpha$ 尺度。

- 动力条件**
- ① **热对流**：局地下垫面热力不均匀，午后容易形成热对流，水平尺度可达几公里。
  - ② **山脉迎风面对流**：气流跨越小的山脉时，潮湿气流迎风面上升形成对流云。
  - ③ **锋面系统的动力抬升对流**：暖锋抬升，冷锋强迫的动力抬升造成对流发展。
  - ④ **低压系统中的对流**。

**雷暴** 积雨云中所发生的**雷电交作**的激烈放电现象，同时指产生这种天气现象的天气系统。  
雷暴是由旺盛积雨云所引起的伴有闪电、雷鸣和强阵雨的局地风暴。

**干雷暴** 没有降水的闪电、雷鸣现象。 **雷暴云**：指产生雷暴的积雨云Cb

**一般雷暴** 通常把只伴有**阵风、阵雨**的雷暴称为**一般雷暴**。

**强雷暴** 伴有**暴雨、大风、冰雹、龙卷**等严重的灾害性天气现象之一的雷暴称为**强雷暴**。

## 4.2 雷暴的结构及成因

### 4.2.1 一般雷暴的结构

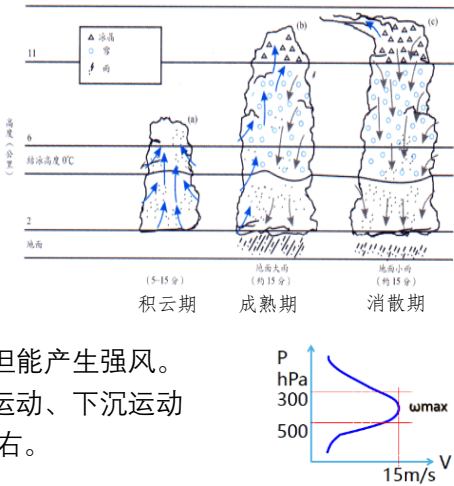
- 生命阶段**
- ① **积云阶段(发展阶段)**：塔状积云形成，具有上升气流，通常没有降水，持续约10分钟，有时有闪电。
  - ② **成熟阶段**：常见冰雹、暴雨、频繁闪电、强风、龙卷等，风暴形态灰暗，通常持续10~20分钟。
  - ③ **消散阶段**：整体下沉运动，可见下击暴流，降雨强度降低，但能产生强风。

**组成部分** ① 云砧、突起、乳状云、云体主体 ② 入流、出流、上升运动、下沉运动

**时间尺度** 每个阶段持续**十几分钟至半小时**左右。整体生命期在**1.5小时**左右。

**水平尺度** 约**十几公里至中 $\gamma$ 尺度**

**垂直运动** 垂直速度 $W_{max} < 15m/s$ （一般雷暴），垂直运动在**对流层中层最强** 300hpa-500hpa（5km左右）



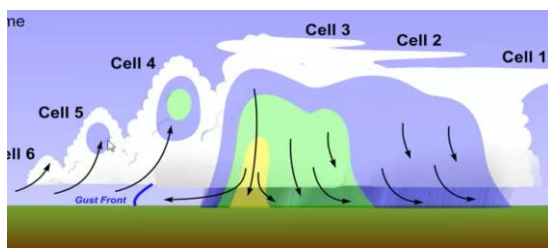
**降水物分布** 云中物态特征  $0^{\circ}\text{C} \sim -20^{\circ}\text{C}$ 等温线之间的区域主要由**过冷水滴、雪花及冰晶**组成，而**冰晶**是从 $-10^{\circ}\text{C}$ 附近开始出现，并随高度逐渐增多。到**冻结高度**，云顶突然向上发展，至对流层顶附近后形成云砧。

## 4.2.2 雷暴群/雷暴带

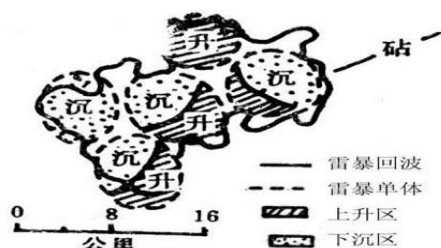
**含义** 有**许多雷暴单体**随机**聚集成群或带**（各单体处于不同阶段），每个单体都具有**独立的云内环流**，都经历发展阶段、成熟阶段和消散阶段，并处于不断新生和消失的新陈代谢过程中。

**生命史** 几个小时、中 $\beta$ 尺度

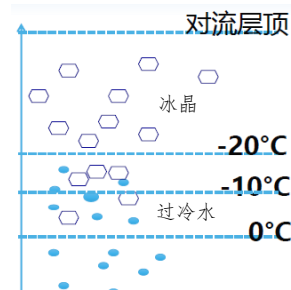
**水平尺度** 可达几百公里。每个单体处于不同的发展阶段。



具有组织的雷暴群



强不规则的雷暴群



降水物分布情况

## 4.2.3 一般雷暴天气的成因

**雷电** 雷电是由积雨云中**冰晶温差起电**以及其它起电作用(**摩擦起电、碰撞起电**)所造成的云与地之间或云与云之间的放电现象。一般当云顶发展到 $-20^{\circ}\text{C}$ 等温线高度以上时，云中便有了足够多的冰晶，因此就会出现闪电和雷鸣。

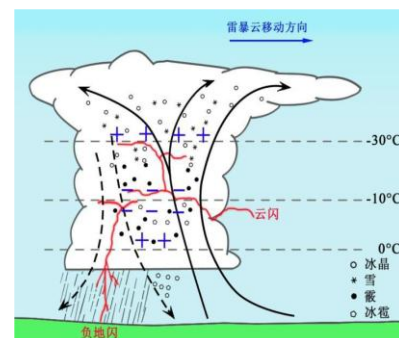
### 温差起电

较暖的冰粒与较冷的冰晶在碰撞摩擦时，受到温度差这一电荷转移的驱动力，暖端失去电子带正电，冷端得到电子带负电；随后，较轻的带正电冰晶随气流上升至云顶，较重的带负电霰粒下沉至云中下部，从而在云内形成**上正下负**的强大电场。这与摩擦起电（谁更容易失去电子是材料本身的性质决定的，与温度无关）不同。

### 雷电的结构与机制

实际情况中，积雨云内部多为三极性电荷分布，云中和云顶为温差起电，云底主要由降水粒子（雨、霰、雹）的捕获起电机产生负电。此外，还有偶极性、多极性、反极性等多种分布。

雷电放电的基本过程包括先导放电、主放电、余辉放电三个阶段。



雷暴云的电荷分布情况

**阵雨** 在雷暴云中**上升气流最强区**附近，一般有大水滴累积区，当累积量**超过上升气流承托能力时**，便开始降雨。由于累积区中的水倾盆而下，因而造成阵雨或暴雨。阵雨持续时间为几分钟到一小时不等，视雷暴云的强弱及含水量多少而定。

**阵风** 在雷暴云的**成熟阶段**，云中产生的**下沉气流冲到地表面向四周散开**造成阵风。**阵风发生时**：风力较弱，多偏南风。

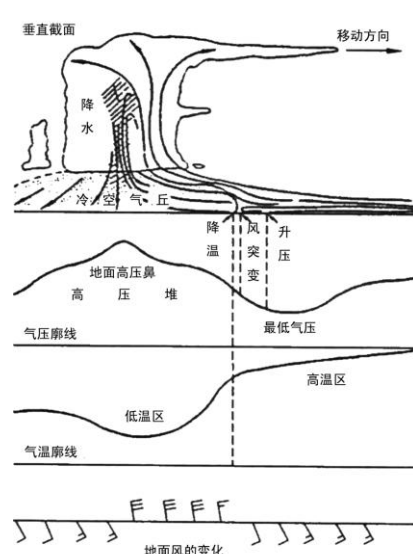
**阵风发生时**：风常呈气旋式旋转，然后又呈反气旋式旋转。

**移动缓慢的雷暴**：云下流出气流几乎是径向（向四面八方铺开）的，然而多数情况下，在雷暴移向的下风方的风速要大于上风方。

**温压湿变化** 由于下沉气流中水滴蒸发吸热冷却，使下沉气流几乎保持饱和状态，因此在雷暴云下形成一个**近乎饱和的冷空气堆**，因其密度较大所以气压较高，这个高压叫**雷暴高压**。

当雷暴云向前移动时，云下的雷暴高压也随之向前移动，使得测站**气压先下降、后上升**，**温度下降**（冷空气堆），**相对湿度上升**，**绝对湿度下降**（与温度有关，近与饱和）。

**雷暴过境**：**风向突变、风速急增、气压猛升、气温骤降**



在弱的垂直风切变中的孤立雷暴模型

## 4.2.4 稳定状态的强雷暴结构

### 4.2.4.1 基本概念

**基本概念** **飏暴**：以**强烈阵风**为主的强雷暴 **雹暴**：以**严重降雹**为主的强雷暴

**生命史** 较长，几小时至十几小时，是在强垂直风切变环境下发展起来的。

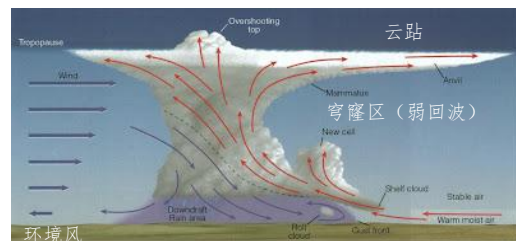
**常见情况** 超级单体风暴、多单体风暴、龙卷风暴、飏线等。

**强雷暴特征**

- ① 有一支**倾斜的上升气流**。
- ② 有一支**下沉气流**从中层进入风暴，从低层流出。  
下沉气流与入流气流辐合，使上升运动更强。
- ③ 上升气流和下沉气流构成**不对称**环流和天气系统。

**主要差异**

- ① 具有特定环流场，即**强的垂直切变**和**强的不稳定**。
- ② 和一般雷暴比，具有特定的垂直环流，雷暴沿高底层平均风速移动。



### 4.2.4.2 超级单体风暴

**含义** 具有**单一的**特大的**垂直环流**的巨大的强风暴云，是所有对流风暴云中最壮观和最强烈的一类风暴云。

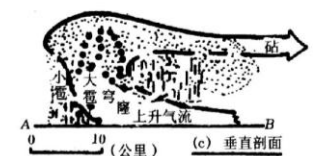
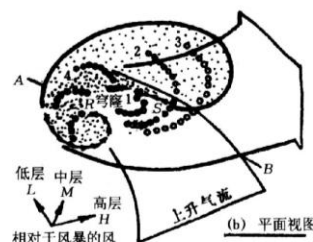
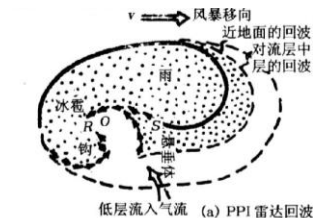
**水平尺度** 20-40km **垂直尺度**：18km

**生命史** 几个小时，移动路径可达数百公里

**环流** 具有**强大的非对称的有组织的**垂直环流，前部上升气流，后部下沉气流。

**结构特征**

- ① 具有**隆起的风暴云顶**：垂直运动过强，由于惯性继续突破平流层顶。
- ② 垂直气流分两部分：**斜升气流**，**下击暴流**
- ③ **弱回波区(穹窿)**：在**风暴云的右前方**形成一个只有小云滴而很少有大水滴的地区，有时也可能是无云的空穴。在雷达的 RHI 照片上便呈现为一个弱回波区，它从风暴云右翼伸展到风暴云内并存在云中向上突入一段距离，一般称其为**穹窿**。上风侧是云墙，强回波区下风侧是前伸悬体回波。
- ④ 风暴的运动方向一般偏向于**对流云中层的风的右侧**。  
所以这类风暴也叫做右移强风暴，但有的强风暴也可以是左移的。
- ⑤ 环境风因为风暴云十分高大，因此它迫使环境气流分成两股绕云而过，在环境气流与云边界之间会发生涡旋混合作用。



**斜升气流** **下击暴流** **下击暴流的辐散气流**（冲击导致倾斜）与**进入云体的暖湿气流**汇合产生。

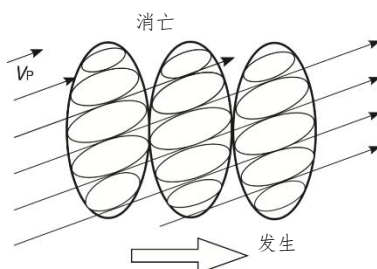
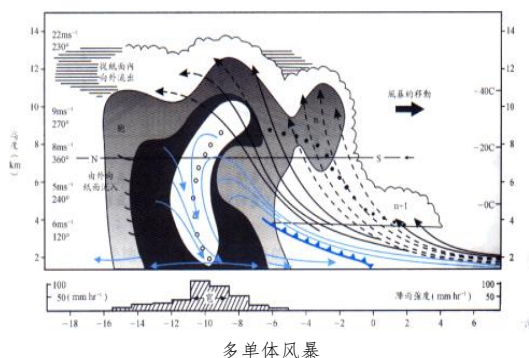
- ① 降水物的**拖拽作用**。
- ② 在中层云外围绕流干冷气流被卷入后，在云体前部逐渐下沉。
- ③ 在中层，从云后部直接进入云中的干空气，降水物通过这种干空气是强烈蒸发冷却，形成很冷的下沉气流。

**气流作用** **斜升气流的作用**：① **供应水汽** ② 促进**云雨发展** ③ **分选**大小不同的降水物，有利于冰雹的生成  
**下击暴流的作用**：① 到地表面后向四周散开，形成**强风** ② **使上升气流倾斜**，产生斜升气流

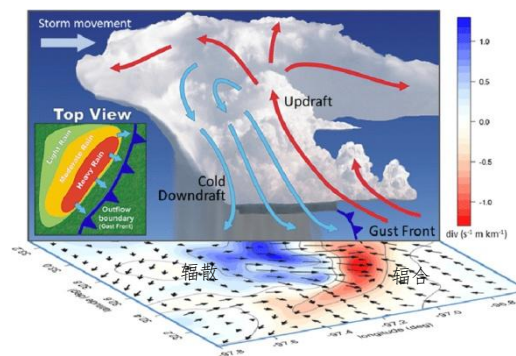
### 4.2.4.3 多单体风暴

**含义** 由许多较小的处于不同发展阶段雷暴单体组成，但有一个统一的垂直环流的风暴。

**空间结构** 多单体风暴中，对流单体**横向排成一行**。他们不断底在雷暴复合体中的**右侧发生**，在**左侧消亡**，看起来风暴就象一个整体在运动。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使整体的生命期很长。



多单体风暴的移动方向

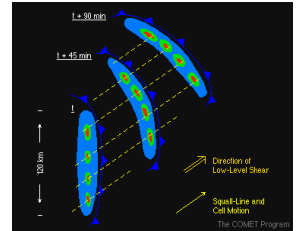


飏线形势与辐合辐散区域



#### 4.2.4.4 飏线

含义	有许多雷暴单体（其中包括若干超级单体） <b>侧向排列</b> 而形成的强对流云带。是风向、风速突变的狭窄的强对流天气带。能够造成很具破坏力的严重灾害性天气。
水平尺度	<b>长约几十至几百公里</b> ，宽约几十公里至二百公里。
生命史	几小时至十几小时
天气现象	<b>大风、冰雹、龙卷</b> 。飏线过境时，风向突变、风速急增、气压骤升、气温剧降，同时伴有雷暴、暴雨。飏线发生之前多属晴好天气，气温较高，风力微弱，风向很乱，湿度较大，天气闷热，具备雷雨条件。
地理分布	飏线多发生在长江流域以北地区。其中内蒙、河北、山西、山东、河南、安徽、江苏和沿海等地每年均有发生。飏线常出现在气团内部或冷锋前，破坏性很大。



#### 4.2.5 强雷暴天气的成因

##### 4.2.5.1 飏

含义	伴随强风暴云来临，气压涌升，气温急降，相对湿度增大的突然发作的 <b>强烈阵风</b> ，飏是强阵风的意思。
成因	<b>下击暴流到地表面向四周散开</b> 。

##### 4.2.5.2 冰雹

含义	直径 <b>大于 5 毫米</b> 的固体降水物。
形成特点	<ol style="list-style-type: none"><li>① 较强的上升运动 (<math>W_{max} &gt; 20m/s</math>)</li><li>② 水份累积区和最大垂直速度区的高度一般在零度层以上。</li><li>③ 水份累积区的含水量较为丰富，一般都不小于 <math>15-20</math> 克/米<sup>3</sup>，累积厚度不小于 <math>1.5-2.0</math> 公里。</li><li>④ 有宜于形成雹胚的环境。</li><li>⑤ 云内 <math>0^{\circ}C</math>层的高度适当，不太高也不太低。</li></ol>
形成过程	<ol style="list-style-type: none"><li>① 首先雹胚进入<b>斜升气流</b>之中，斜升气流把小冰粒带到中高层，穿过<b>过冷水份累积区</b>。</li><li>② 然后砧状流出气流将小雪粒撒向前方，大的抛得近，小的抛得远。</li><li>③ 通过分选作用，大小雹粒在不同部位下落，重新进入斜升气流，又开始第二次升降。</li><li>④ 如此<b>循环数次</b>，大雹落在回波墙附近或阵风前沿线附近的后方。而小雹可能降落在离阵风前沿线较远的后方或前方。</li></ol>

##### 4.2.5.3 龙卷

含义	从雷暴云底向下伸展并且到达地面的 <b>漏斗状涡旋云柱</b> 叫做 <b>龙卷</b> 。龙卷伸展到地面时会引起强烈的旋风叫做 <b>龙卷风</b> 。龙卷可悬挂空中或伸延地面。出现在陆地上的称 <b>陆龙卷</b> ；出现在海面上的称 <b>海龙卷</b> 。
特征	龙卷风是一种伴随着 <b>高速旋转的漏斗状云柱的强风涡旋</b> 。 <ol style="list-style-type: none"><li>① 龙卷风中心附近风速可达 <math>100-200m/s</math>，最大 <math>300m/s</math>。比台风近中心最大风速大好几倍</li><li>② 由于龙卷风内部空气极为稀薄，故温度急降，使水汽迅速凝结，这是形成漏斗云柱的重要原因。</li><li>③ 漏斗云柱的直径，平均只有 <math>250m</math> 左右。</li></ol>
主要特征	<ol style="list-style-type: none"><li>① <b>外观</b>：漏斗状云柱。水平尺度很小<b>约百米</b>，垂直尺度约 <math>2-3</math> 千米，甚至 <math>10km</math>，垂直范围在 <math>3-15km</math>。</li><li>② <b>生存时间</b>：几分钟到几十分钟</li><li>③ <b>中心气压低</b>：中心气压与外围之间气压梯度可达 <math>200Pa/m</math> 左右。</li><li>④ <b>风速</b>：其中心风力可达 <math>100-200</math> 米/秒以上，具有极大的破坏力。</li><li>⑤ <b>结构</b>：龙卷有时成对出现，且旋转方向相反：气旋式+反气旋，但以气旋式的为常见。</li><li>⑥ 龙卷中心为下沉气流，四壁为极强的上升气流，速度可达 <math>50</math> 米/秒以上。</li><li>⑦ 非静力平衡，且科氏力不起作用，惯性离心力和气压梯度力平衡。</li></ol>
形成过程	<ol style="list-style-type: none"><li>① 大气的<b>不稳定性</b>产生强烈的上升气流，急流中的最大过境气流起到加强作用。</li><li>② 垂直方向风切变，上升气流在对流层中部旋转，形成中尺度气旋。</li><li>③ 中尺度气旋向地面发展。</li></ol>