

# 第三章 大型降水天气过程

## 章节概述

本章主要分析降水特别是暴雨形成的物理过程及其诊断方法，影响我国大范围降水（天气尺度 1000~3000km）的环流形势及天气过程，形成暴雨的各种天气尺度系统等。本章重点在于降水和暴雨形成机制、我国大型降水过程的环流特征、低空急流对暴雨形成的作用。本章难点在于华南前汛期降水、江淮梅雨、华北与东北雨季降水环流特征及其产生暴雨的关键系统解释。

## 3.1 降水概述

### 3.1.1 降水概念与分级

**降水含义** 大型降水主要是指范围广大的降水，降水区可达**天气尺度大小**（1000~3000km），包括连续性和阵性的大范围雨雪及夏季暴雨。

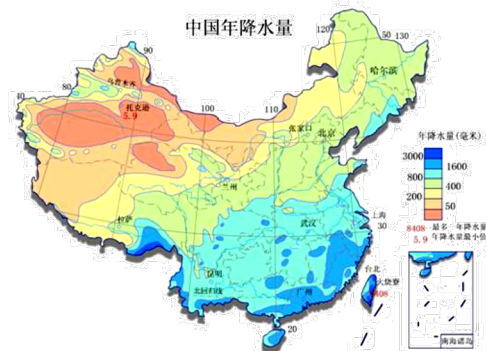
**24h 时效性** 微量：0.1      小雨：0.1~10      中雨：10~25      大雨：25~50  
**暴雨：50~100      大暴雨：100~250      特大暴雨：>250**      （所有单位均为毫米 mm）  
近期台风外围暖湿气流输送，和北方南下的冷空气交汇产生盐城超 300mm 的降水，属于特大暴雨。

国家气象局降水强度等级划分标准			
项目	24 小时降水总量	12 小时降水总量	
小雨、阵雨	0. 1-9.9	≤4.9	
小雨—中雨	5.0-16.9	3.0-9.9	
中雨	10.0-24.9	5.0-14.9	
中雨—大雨	17.0-37.9	10. 0-22.9	
大雨	25. 0-49.9	15. 0-29.9	
大雨—暴雨	33.0-74.9	23. 0-49.9	
暴雨	<b>50.0-99. 9</b>	<b>30.0-69. 9</b>	
暴雨—大暴雨	75.0-174.9	50.0-104. 9	
大暴雨	100.0-249.9	70.0-139.9	
大暴雨—特大暴雨	175. 0-299.9	105. 0-169. 9	
特大暴雨	≥250.0	140	
国家气象局降雪强度等级划分标准			
项目	12 小时内降雪量	24 小时内降雪量	积雪深度
小雪	≤1.0	≤2.5	/
中雪	1.0-3.0	2.5-5.0	3
大雪	3.0-6.0	5.0-10.0	5
暴雪	≥6.0	≥10	8
大暴雪	≥12	≥20	16
特大暴雪	≥24	≥40	32

**降水利弊**      ① 提供淡水资源，维持生命。      ② 促进农业灌溉，增加产量。      ③ 调节气候，降低温度。  
④ 补充地下水，防止干旱。      ⑤ 引发洪水，淹没地区。      ⑥ 导致地质灾害  
⑦ 中断交通，影响经济。      ⑧ 损坏基础设施，增加成本。

### 3.1.2 我国各地降水气候概况

各地雨量	年雨量分布 <b>极不均匀</b> ，从东南沿海向西部内陆递减。		
干湿区分界	即 <b>400mm 年等降水线</b> ，为 <b>大兴安岭、阴山、贺兰山、巴颜喀拉山、冈底斯山</b> 一线，同时也是 <b>季风区和非季风区</b> 分界。		
南北方分界	即 <b>800mm 年等降水线</b> ，为 <b>秦岭淮河</b> 一线。		
雨季	即 <b>连阴雨期</b> ，夏季水汽充沛，降水量多，故夏季的连阴雨期一般称为雨季。我国绝大多数雨量集中在 <b>夏季</b> ，有明显的雨季、干季之分（季风区雨热同期）。		
华南沿海	<b>4月中旬</b>	<b>10月中旬</b>	雨季最长，具有 <b>双峰型</b> 结构
云贵高原	<b>5月下旬</b>	<b>10月下旬</b>	
青藏高原北	<b>6月中旬</b>	<b>10月下旬</b>	
长江流域	<b>6月上旬</b>	<b>9月初</b>	
华北东北	<b>7月中旬</b>	<b>8月底</b>	雨季最短
特点	雨季一般出现在夏半年，降水分布不均匀，东南部雨季出现早，结束晚， <b>雨季中有相对干期</b> 。		

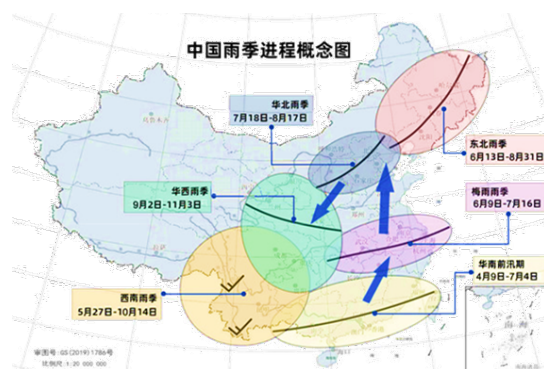


最大值火烧寮 8408，最低值托克逊 5.9

### 3.1.3 东亚环流的季节变化与我国雨带活动

#### 3.1.3.1 雨带

雨带	一次降水过程中，降水量 <b>相对集中</b> 的地带， <b>侯(旬)内</b> 平均降水量相对集中的地区（ <b>5天的平均</b> ）。	
影响系统	雨带活动与大尺度系统密切相关，有 <b>西太平洋副热带高压脊线</b> （8-10°N）、 <b>100hPa 青藏高压</b> （北侧）、 <b>副热带西风急流</b> （南侧）、 <b>东亚季风</b> 季节变化等。	
雨带过程	5月中旬~8月下旬	雨带从南往北移
	<b>5月中旬~6月上旬</b>	<b>华南前汛期</b>
	<b>6月中旬~7月上旬</b>	<b>江淮梅雨</b>
	<b>7月中旬~8月下旬</b>	<b>华北东北雨季</b> ，华南进入 <b>后汛期</b>
	总计 <b>两次北跳三次停滞</b>	
	8月下旬~10月上旬	雨带从北往南移，撤退快
	9月中旬~10月上旬	淮河秋雨期，雨量小



#### 3.1.3.2 中国暴雨的分布特征

主要特征	① 不仅发生在 <b>沿海</b> ，而且出现在 <b>内陆</b> （分布很不均匀，影响系统不一致）
	② <b>华南沿海和东南沿海</b> 的降水量极值多数由 <b>台风</b> 引起
	③ <b>长江中下游和淮河流域</b> 暴雨主要由6~7月 <b>梅雨锋上西南涡</b> 所引起
	④ <b>黄河中下游和淮河流域</b> 的暴雨主要是西部移出的四川移出的 <b>西南涡</b> 和青海移出的 <b>西北涡</b> 造成
	⑤ 暴雨极值与 <b>地形</b> 有关，多发于暖季。

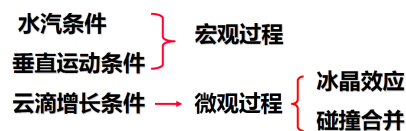
## 3.2 降水的形成与诊断

章节概述 包含**水汽条件的诊断**和**垂直运动的诊断**。

### 3.2.1 降水形成过程

#### 3.2.1.1 一般降水的形成过程

宏观过程	<b>水汽条件</b> （充足的水汽，达到饱和水汽压）、 <b>垂直运动条件</b> （具有垂直上升运动，便于凝结成云）
微观过程	<b>云滴增长条件</b> （ <b>冰晶效应</b> 、 <b>碰撞合并</b> ）
	云滴增长取决于云层厚度，云层厚度取决于水汽条件和垂直运动条件，因此降水分析就是对 <b>水汽条件</b> 和 <b>垂直运动条件</b> 进行分析。



一般降水的形成过程

### 3.2.1.2 暴雨形成条件

**主要条件** 充分的水汽供应、强烈的上升运动、较长的持续时间

**必要前提** 因此要研究环流形势：连续暴雨的**必要前提**是副高脊，长波槽，切变线、静止锋、大型冷涡等长期稳定。还有天气尺度系统：短波槽、低涡、气旋等的相互配合。

#### 上升运动的速度

假设达到暴雨量级(50mm)，如果在 24h 内均匀降水，则可达到 10cm/s；如果在 5 小时落下，可达 54cm/s；如果在 1 小时内降下来，则上升运动可达惊人的 260cm/s，只有**中小尺度系统**可提供。

## 3.2.2 水汽方程和降水率

### 3.2.2.1 水汽方程

**表征意义** 表示水汽输送和变化的基本方程

**四个因子** 在不考虑液态水和固态水向体积内输送的情况下，水分质量守恒可知水汽变化量决定于四个因子：**水平、垂直方向净流入、蒸发凝结和湍流扩散。**

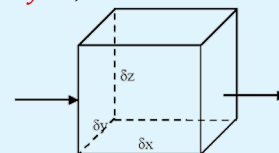
**水汽方程**  $\frac{dq}{dt} = -c + K_q \frac{\partial^2 q}{\partial z^2}$  如果没有凝结或蒸发，且湍流扩散也很小，可以忽略不计，则  $\frac{dq}{dt} = 0$

这表示空气质块的比湿保持不变。蒸发  $c < 0$ ,  $\frac{dq}{dt} > 0$  水汽增加；凝结  $c > 0$ ,  $\frac{dq}{dt} < 0$  水汽减少

#### 方程推导

使用比湿  $q$  表征单位质量湿空气块中水汽的含量，假设体积  $\delta x \delta y \delta z$  的微元，所含水汽含量为  $\rho q \delta x \delta y \delta z$ ，则单位时间内该体积所含水汽变化量为： $\frac{\partial(\rho q \delta x \delta y \delta z)}{\partial t}$ 。接下来，我们逐个考虑四个因子。

(1) 水平方向上水汽的净流入量：在  $y$  方向上，有  $\rho q v \delta x \delta z - [\rho q v \delta x \delta z + \frac{\partial}{\partial y}(\rho q v) \delta x \delta y \delta z] = -\frac{\partial}{\partial y}(\rho q v) \delta x \delta y \delta z$   
同理， $x$  方向有  $-\frac{\partial}{\partial x}(\rho q u) \delta x \delta y \delta z$ ，因此水平方向水汽净流入量为  $-\left[\frac{\partial}{\partial x}(\rho q u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho q v)\right] \delta x \delta y \delta z$ ，  
其中  $\frac{\partial}{\partial x}(\rho q u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho q v)$  为**水汽通量散度**。



(2) 垂直方向上水汽的净流入量为  $-\frac{\partial}{\partial z}(\rho q w) \delta x \delta y \delta z$

(3) 单位时间内，单位质量空气凝结率为  $C$ ，则在单位时间内，体积  $\delta x \delta y \delta z$  的凝结量为  $C \rho \delta x \delta y \delta z$ ，**此值凝结时为正，蒸发时为负。**

(4) 湍流扩散假定湍流扩散率：即单位时间，单位质量空气块由湍流扩散引起的水汽输送量  $d$ ，则单位时间内体积内湍流扩散所引起的水汽输送量为  $\rho d \delta x \delta y \delta z$ 。

$$\text{故有 } \frac{\partial}{\partial t}(\rho q \delta x \delta y \delta z) = -\frac{\partial}{\partial x}(\rho q u) \delta x \delta y \delta z - \frac{\partial}{\partial y}(\rho q v) \delta x \delta y \delta z - \frac{\partial}{\partial z}(\rho q w) \delta x \delta y \delta z - \rho c \delta x \delta y \delta z + \rho K_q \frac{\partial^2 q}{\partial z^2} \delta x \delta y \delta z$$

简化后得到水汽方程： $\frac{\partial}{\partial t}(\rho q) = -\frac{\partial}{\partial x}(\rho q u) - \frac{\partial}{\partial y}(\rho q v) - \frac{\partial}{\partial z}(\rho q w) - \rho c + \rho K_q \frac{\partial^2 q}{\partial z^2}$ ，以连续方程代入：

$$\frac{dq}{dt} + \rho \nabla \cdot \vec{V} = 0, \text{ 得到水汽方程的最终形式: } \frac{dq}{dt} = -c + K_q \frac{\partial^2 q}{\partial z^2}$$

### 3.2.2.2 降水率

**降水强度** 设  $I$  是单位时间内降落在地面单位面积上的总降水量，称为**降水强度**或**降水率**。

**公式**  $I = -\int_0^\infty \rho \frac{dq}{dt} dz$  当降水发生  $\frac{dq}{dt} \leq 0$  时， $q = q_{s\text{饱和}}$  实际上就是单位气柱上比湿变化的积分

$$\text{故有: } I = -\int_0^\infty \rho \frac{dq_s}{dt} dz \Rightarrow I = -\frac{1}{g} \int_0^{p_0} \frac{dq_s}{dt} dp \quad \text{降水量 } W = -\frac{1}{g} \int_{t_1}^{t_2} \int_0^{p_0} \frac{dq_s}{dt} dp dt \quad \text{积分到 } 300\text{hPa}$$

### 3.2.2.3 凝结函数

**引入** 我们想要知道饱和比湿随时间的变化量，不好实际观测，故引入凝结函数。

**凝结函数** 
$$F = \frac{q_s T}{p} \left( \frac{LR - c_p R_w T}{c_p R_w T^2 + q_s L^2} \right) \quad \frac{dq_s}{dt} = F \omega$$

$F$  为凝结函数，且  $F$  恒大于零，当有上升运动时有凝结。

#### 公式推导

从  $q_s = 0.622 \frac{E}{p}$  出发，有：  $\ln q_s = \ln 0.622 + \ln E - \ln p \Rightarrow \frac{1}{q_s} \frac{dq_s}{dt} = \frac{1}{E} \frac{dE}{dt} - \frac{1}{p} \frac{dp}{dt} \Rightarrow \frac{1}{q_s} \frac{dq_s}{dt} = \frac{1}{E} \frac{dE}{dt} - \frac{\omega}{p}$ ,

同时有克劳修斯-克拉珀龙方程：  $\frac{1}{E} \frac{dE}{dt} = \frac{L}{R_w T^2} \frac{dT}{dt}$ ，代入得：  $\frac{1}{q_s} \frac{dq_s}{dt} = \frac{L}{R_w T^2} \frac{dT}{dt} - \frac{\omega}{p}$ ，又考虑到热力学第一定律：

$$-L \frac{dq_s}{dt} = c_p \frac{dT}{dt} - \frac{RT}{p} \omega \Rightarrow \frac{dq_s}{dt} = \frac{q_s T}{p} \left( \frac{LR - c_p R_w T}{c_p R_w T^2 + q_s L^2} \right) \omega$$
 红色部分即为凝结函数。