

主讲：周任君 博士（[zrj@ustc.edu.cn](mailto:zrj@ustc.edu.cn)）

## 第六章 天气预报的原理和方法



天气变化与人们的生产活动、社会活动、军事活动以及日常生活都有着十分密切的关系。

自古以来，人们总是想方设法去预测未来的天气变化，利用有利的天气，避开不利的天气，以减少不必要的损失。



天气预报是根据气象观(探)测资料，应用天气学、动力学、统计学的原理和方法，对某区域或某地点未来一定时段的天气状况作出定性或定量的预测。准确地预报天气一直是大气科学研究的一个重要目标。



# 天气预报的历史沿革

看云识天气→根据物像来推测天气→  
→单站预报→天气图预报→应用气象卫星、天气雷达→用计算机进行天气预报。

伴随着科技的不断进步，天气预报得到了快速的发展。



# 天气预报的种类:

按预报时效可大致分为:

临近预报(1~2 小时)

甚短期预报(2~12 小时)

短期预报(12~48 小时)

中期预报(3~10 天)

长期预报(10 天以上)等;



# 目前制作天气预报的方法：

天气学预报方法

统计学预报方法

动力学预报方法

及这三种基本预报方法的结合：

天气—统计预报方法

动力—统计预报方法

天气—动力预报方法等。



# 天气学预报方法

(或称天气图方法):

以天气图为主要工具，配合卫星云图、雷达图等，用天气学的原理来分析和研究天气的变化规律，从而制作天气预报的方法。这种方法主要用于制作短期预报。



# 数值预报方法

(又称动力学预报方法):

利用大型、快速的电子计算机求解描述大气运动的动力学方程组来制作天气预报的方法。这种方法可用于制作短期预报，也可做中、长期预报。近几年还开始用来做气候预报。



## 统计预报方法：

采用大量的、长期的气象观测资料，根据概率统计学的原理，寻找出天气变化的统计规律，建立天气变化的统计学模型来制作天气预报的方法。这种方法主要用于制作中、长期预报和气象要素预报。



## 三种天气预报方法的主导思想:

### 统计预报方法的主导思想:

从天气现象（或天气过程）具有偶然性出发，认为天气变化是一种随机过程，在相同条件下不一定出现同样的天气变化，只能求出某种天气出现的可能性或概率。



# 天气学方法和数值预报方法 的主导思想:

从天气现象（或天气过程）具有**必然性**出发，认为天气变化**不是随机的**，它满足一定的规律（如动量守恒、能量守恒、质量守恒等等），在相同的条件下应该发生相同的变化，根据大气某一时刻的状态，可以推算出其下一时刻的**确定的状态**。



目前制作天气预报常常是将这三种方法配合起来使用，将天气图、卫星和雷达图像、动力分析和统计分析、数值预报产品等进行综合分析，最后做出天气预报。



# § 1. 天气学预报方法

- 工具：天气图、卫星云图、雷达图
- 理论：天气学原理

分析和研究天气的变化规律，  
制作天气预报。



# 一. 天气图

分为：

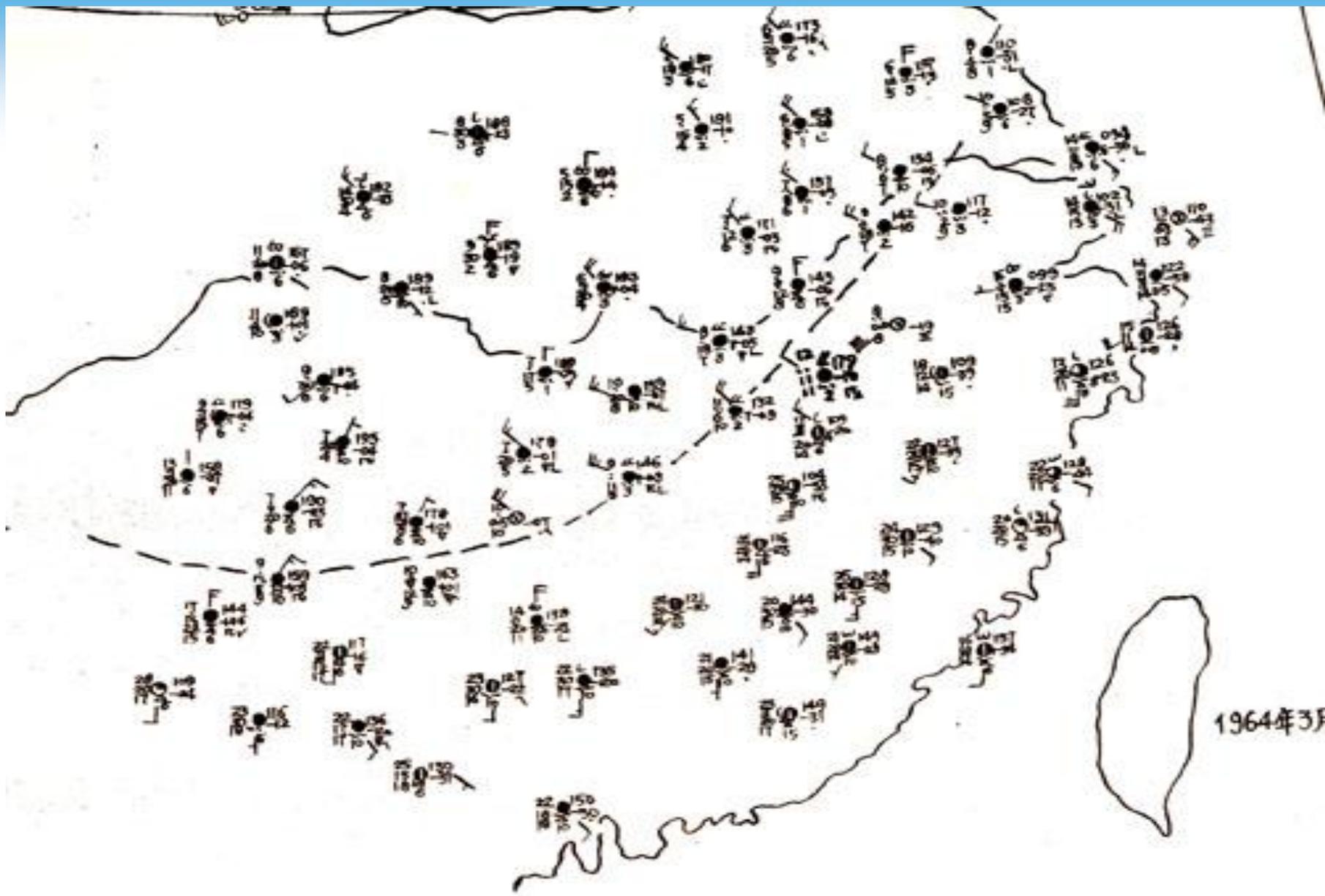
地面天气图

高空天气图

辅助图表







1964年3月







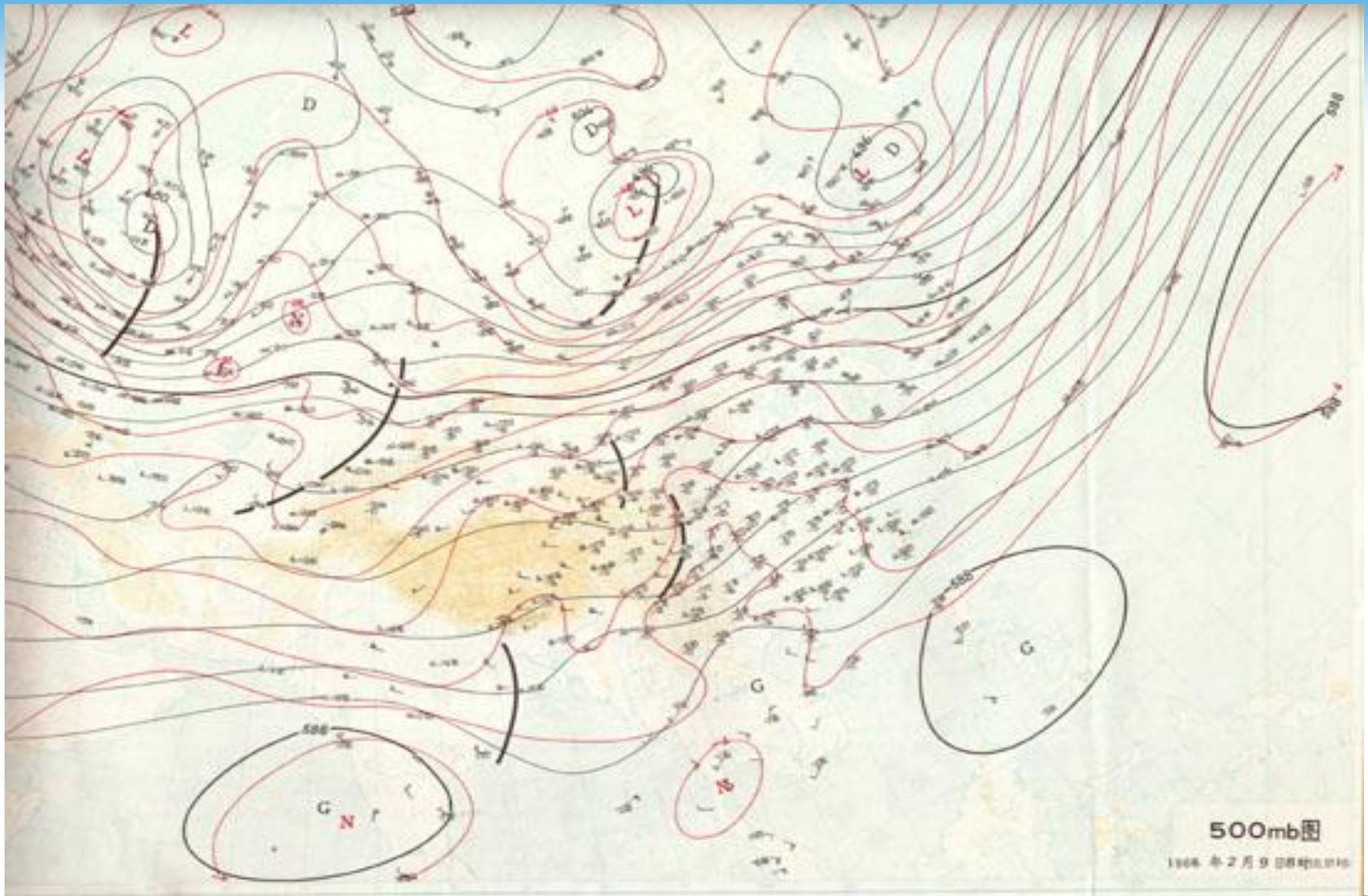
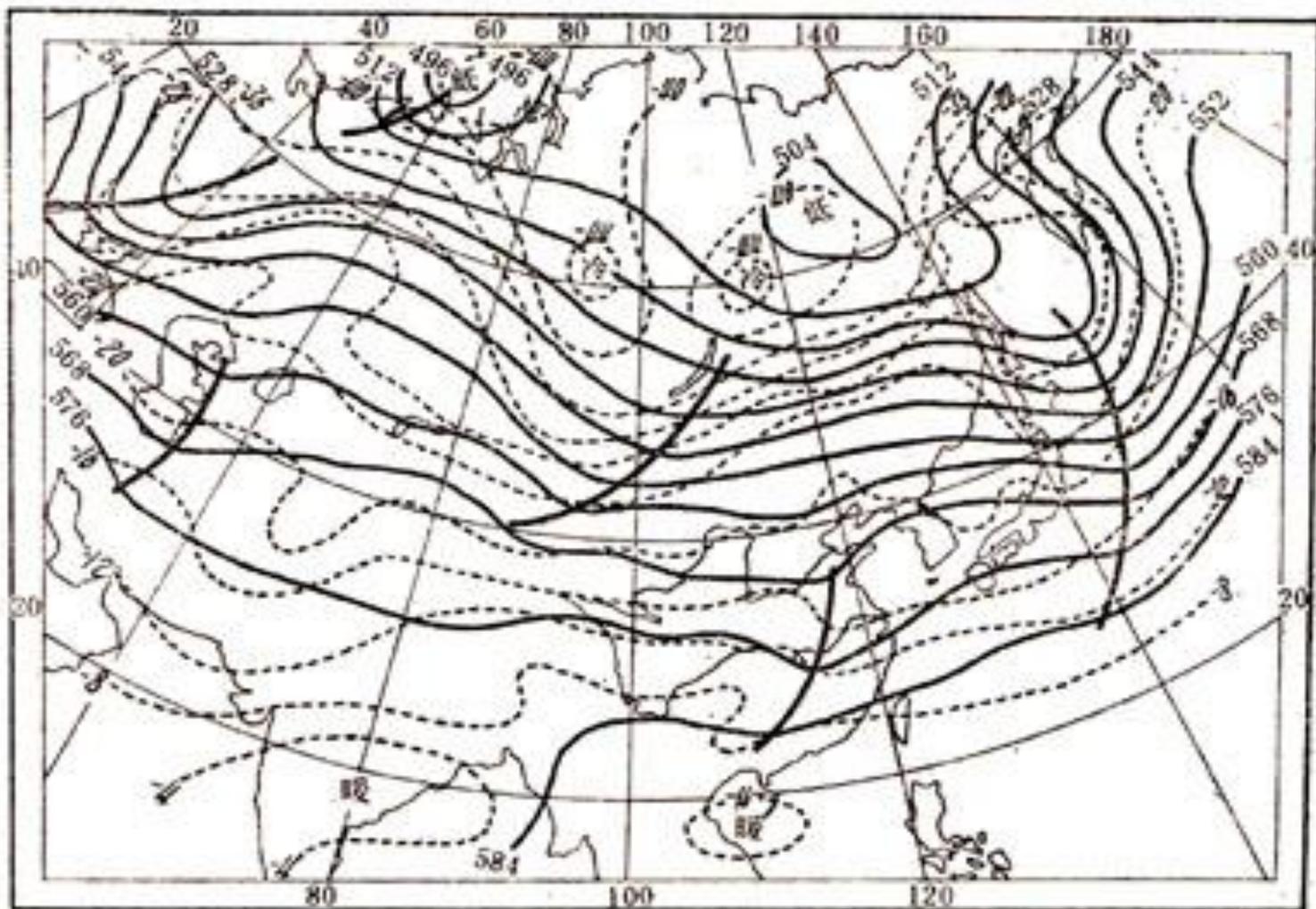


图 9.2 高空天气图





高空天气图



利用天气图并根据天气学原理可以分析这些天气系统和天气区的变化趋势，移动方向和速度。进而预报各天气系统未来的位置，强度以及对各地天气变化的影响。



过去天气图的填图、等值线的绘制和分析是由预报员手工完成的，现在从资料收集、检查、填图直到等值线的绘制和分析已全部由计算机完成，实现了天气分析的自动化。



## 二. 天气系统

中纬度地区：锋面  
温带气旋和反气旋  
西风带的长波槽和脊。

低纬度地区：热带气旋  
西太平洋副热带高压  
南亚高压  
热带辐合带和东风波



# 1. 锋面和锋:

## 锋面定义:

- (1) 在热力学场和风场具有显著变化的狭窄倾斜带。
- (2) 冷、暖两种不同性质气团之间的过渡带

这种倾斜过渡带有时称为锋区。它具有较大的水平温度梯度、静力稳定度、绝对涡度和风速切变等特征。

锋面与地面相交的线，叫锋线，习惯上又把锋面和锋线统称为锋。



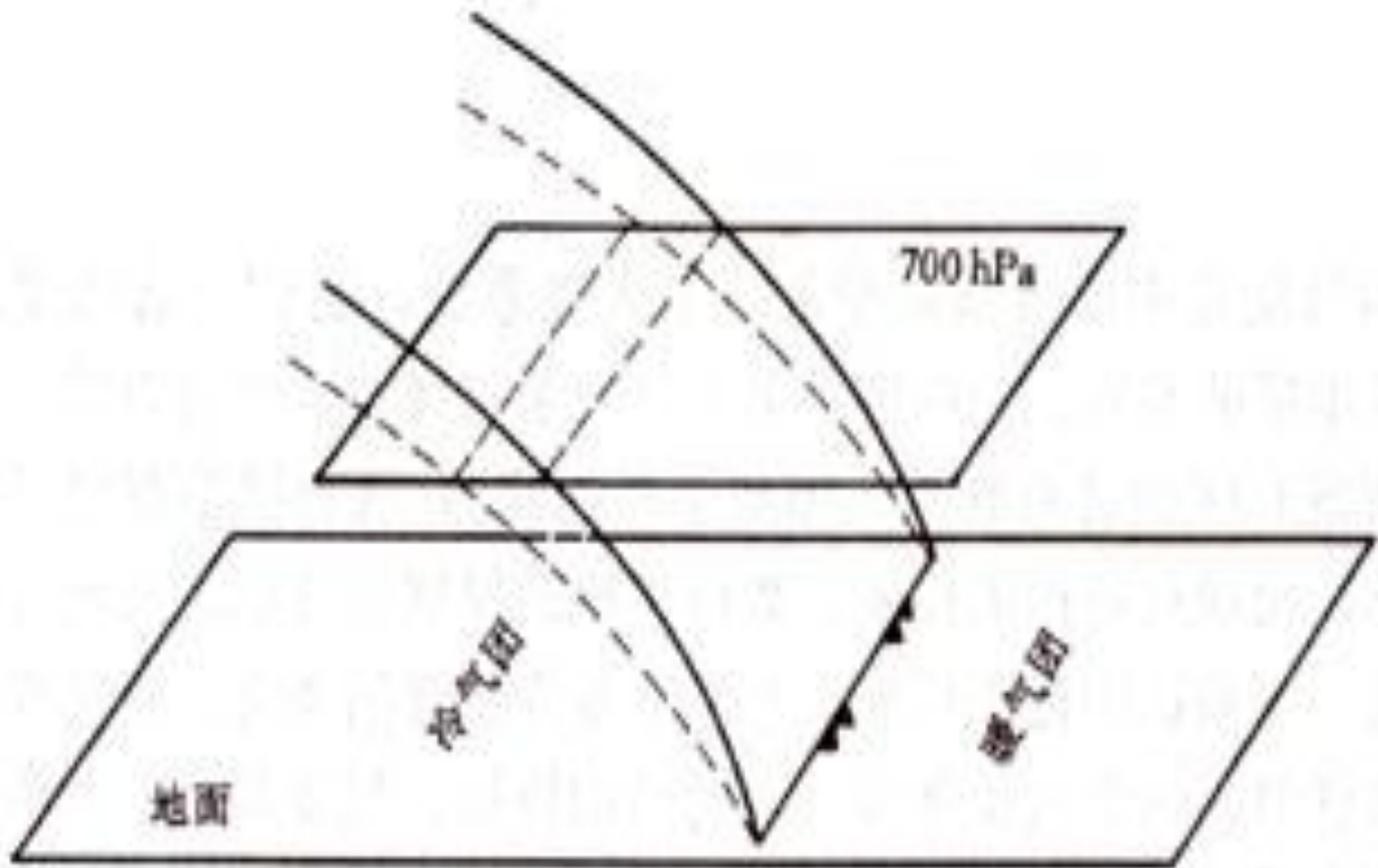


图 9.3 锋面三维空间结构的概念模型

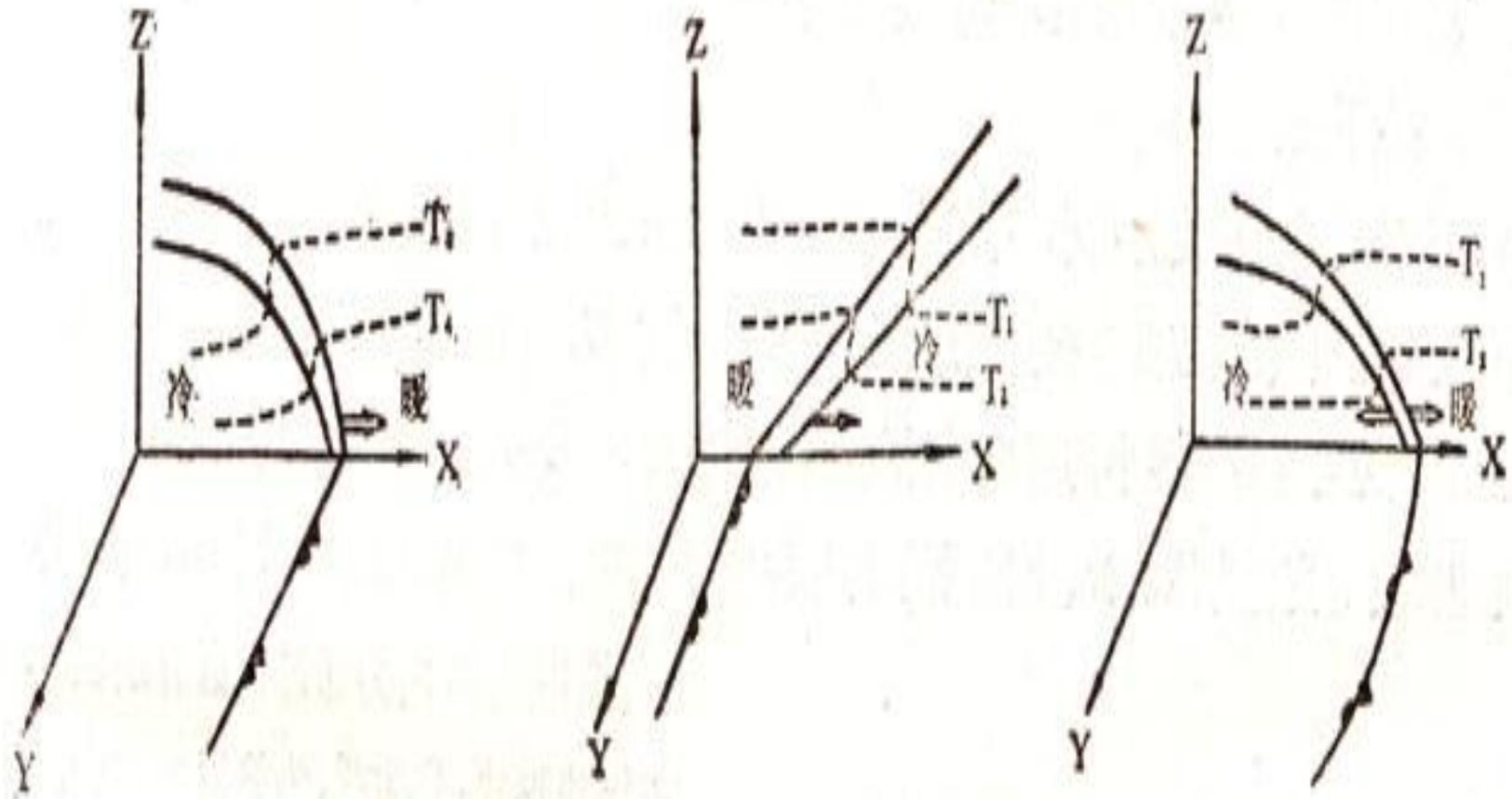


## 锋的分类:

根据锋在移动过程中冷、暖气团所占有的主次地位, 可将锋分为:

冷锋、暖锋、  
准静止锋和锢囚锋。





(a)

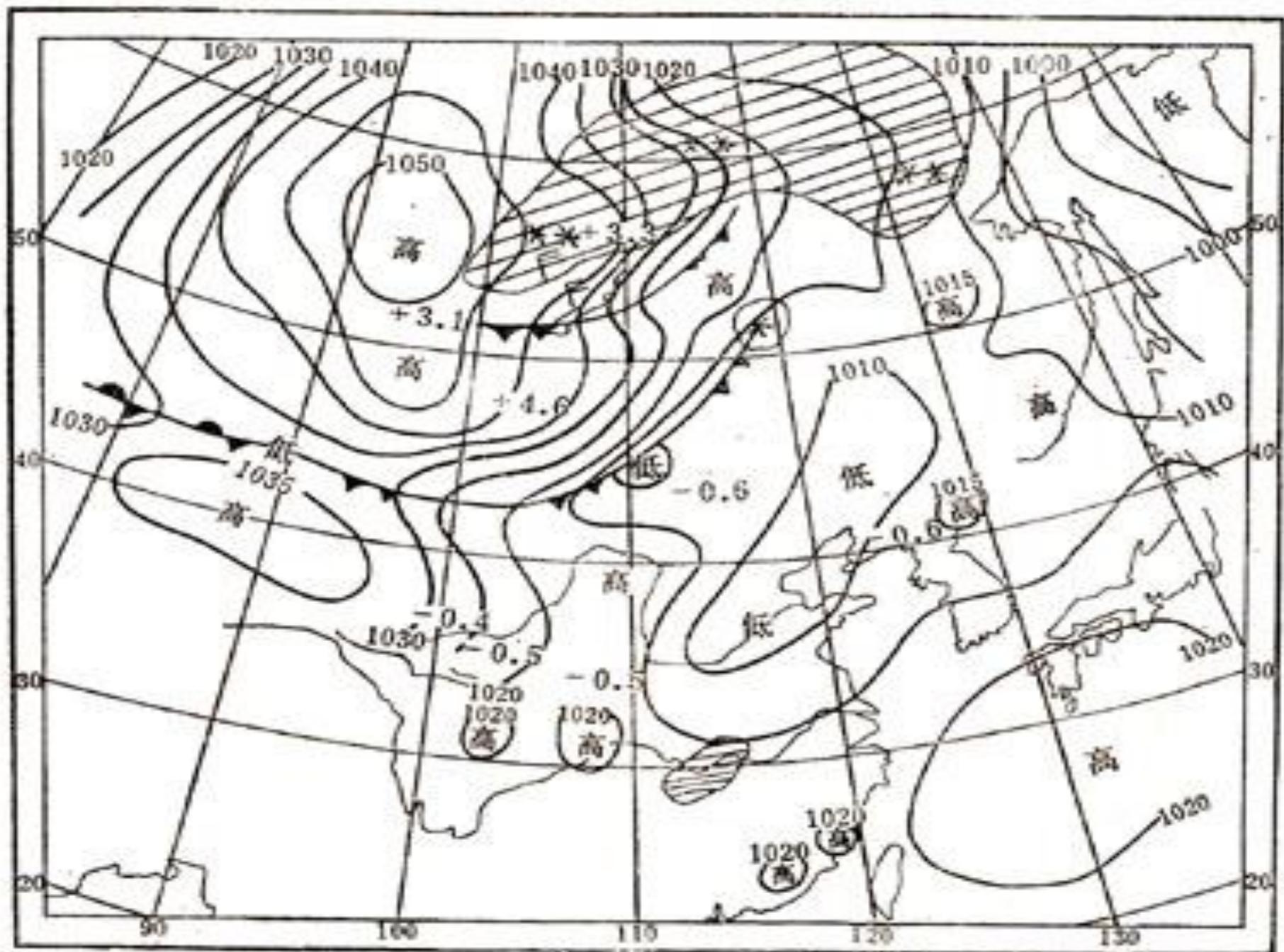
(b)

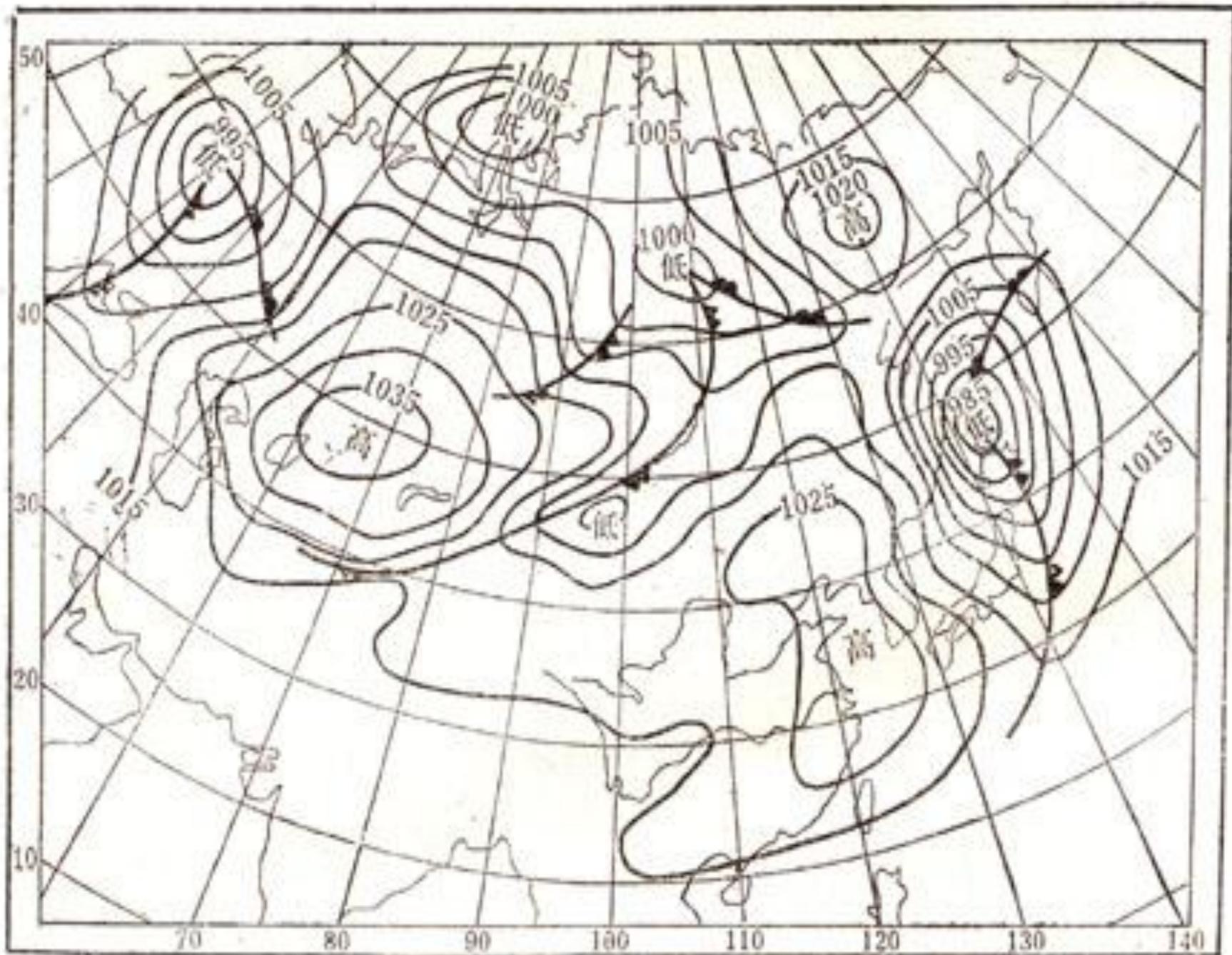
(c)

图 9.4 锋的分类

(a) 冷锋 (b) 暖锋 (c) 准静止锋







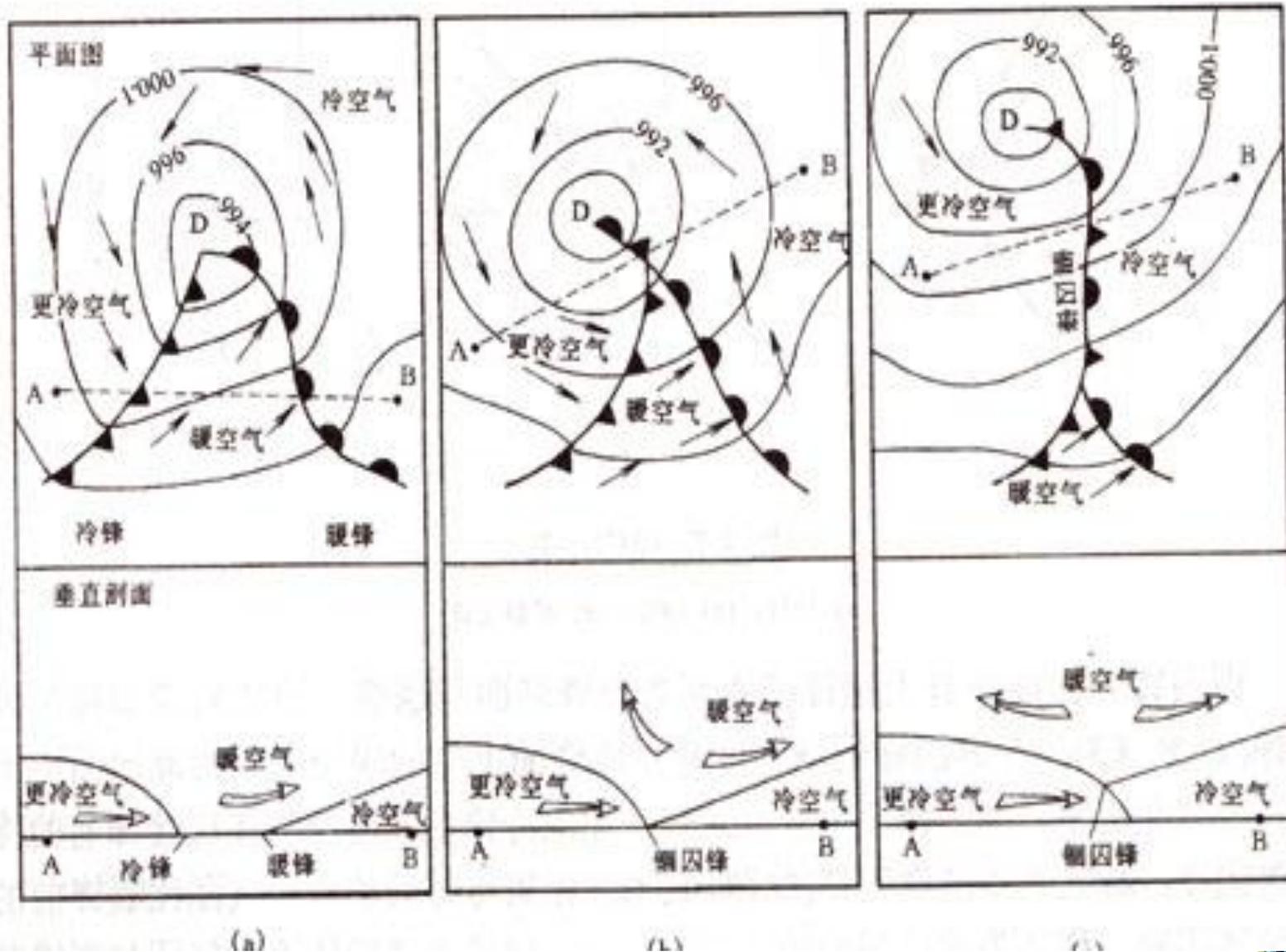


图 9.5 锢囚锋



在我国，冷锋全年都有，尤其在冬半年更为常见。暖锋主要分布在我国东北和长江中下游地区，且大多数与冷锋相伴随。准静止锋大多数在我国的华南、云贵、天山和江淮地区出现，它们的出现大多数与地形有关。



## 2. 锋面和气旋:

在实际大气中，锋面和温带气旋常常在一起出现。早在 20 世纪 20 年代初，卑尔根 (Bergen) 学派的气象学家就提出了中纬度天气尺度气旋结构和演变的概念模型，其中最著名的模型就是气旋—锋面模型。(Bjerknes (1919) 等提出) **温带气旋形成于一条锋面上。**



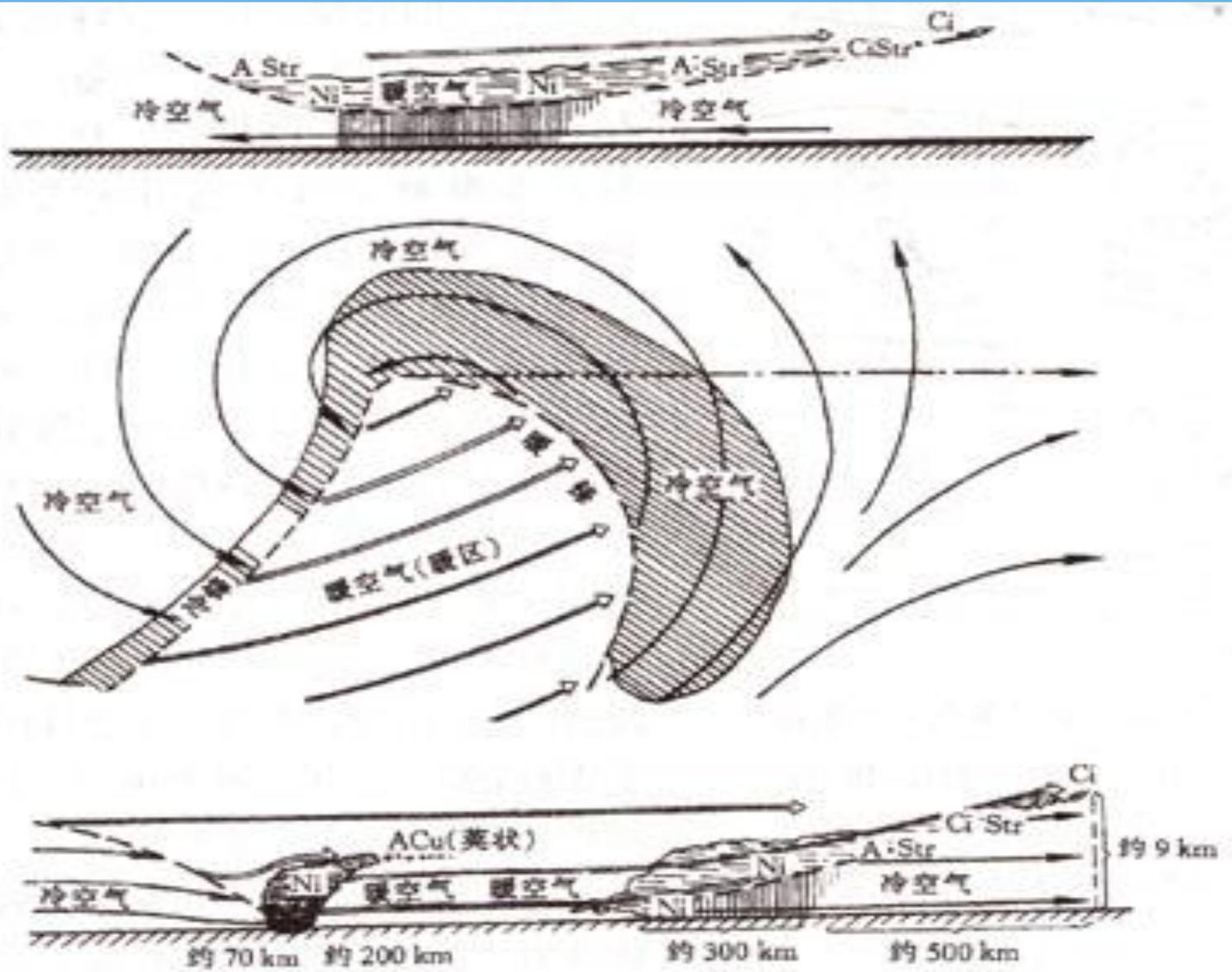


图 9.6 气旋理想模型



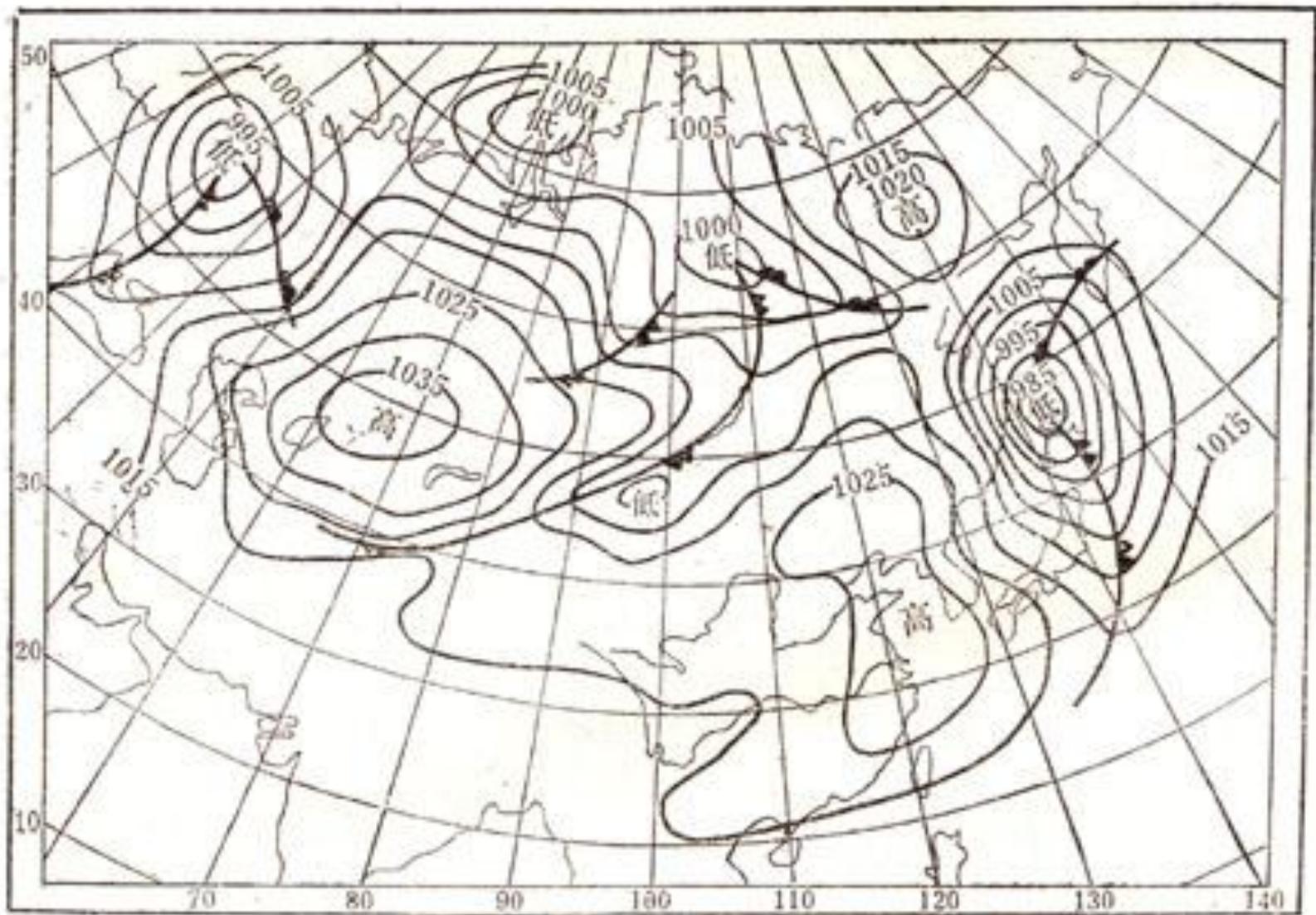


图 9.7 1970 年 11 月 11 日 08 时地面天气图



### 3. 锋面和天气:

在锋面附近，大气的温度、湿度和风的变化都很激烈，暖湿空气沿着锋面的斜坡爬升到较冷空气的上方，使气层的稳定度变小，容易生成各种云和降水。



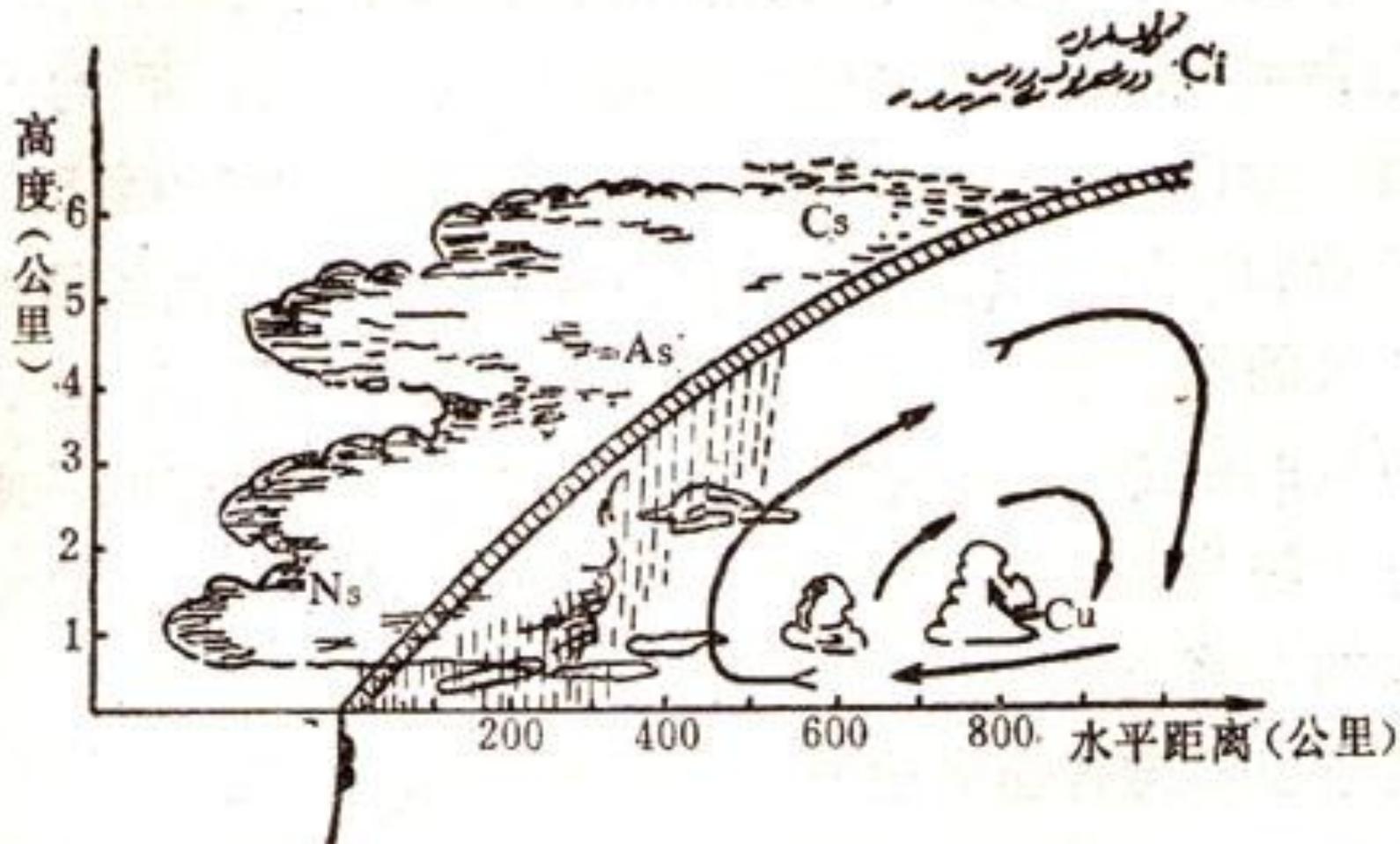


图 9.8 暖锋附近的云系



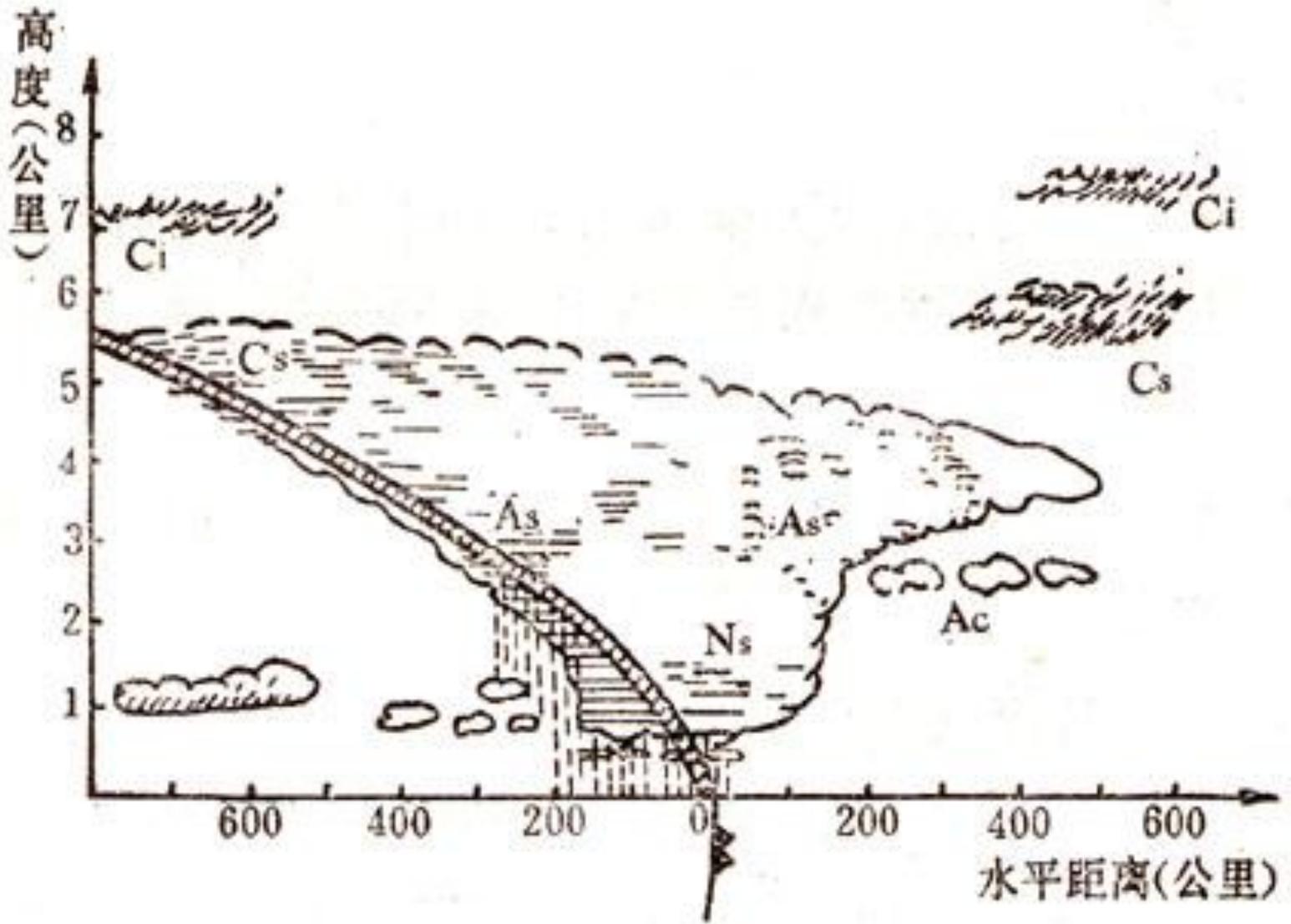


图 9.9 冷锋附近的云系



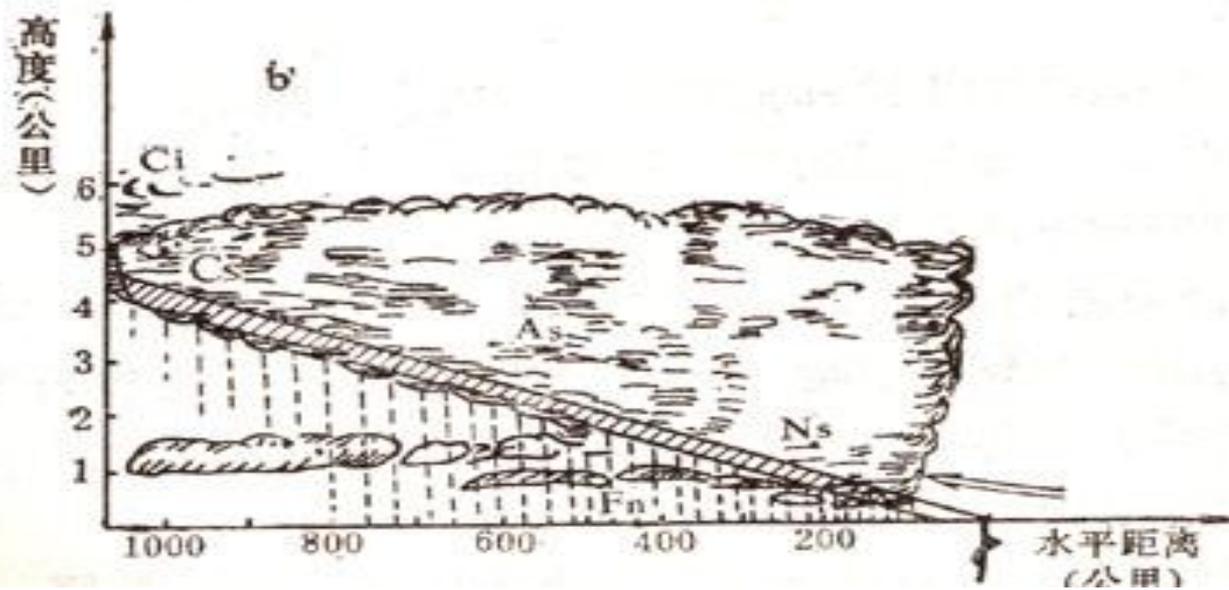
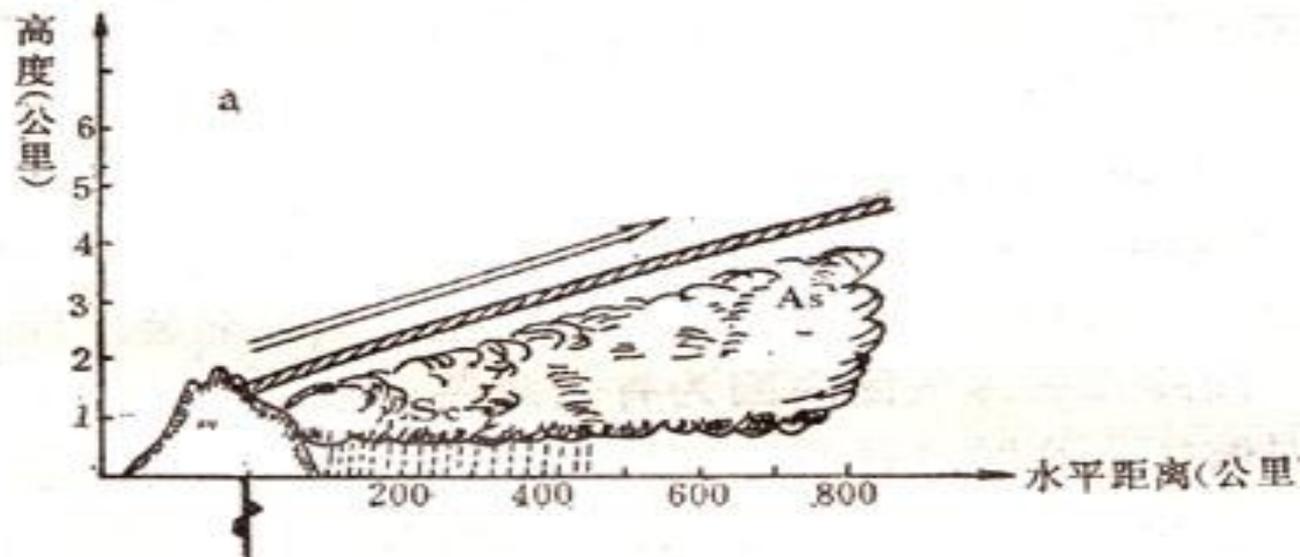


图 9.10 静止锋附近的云系



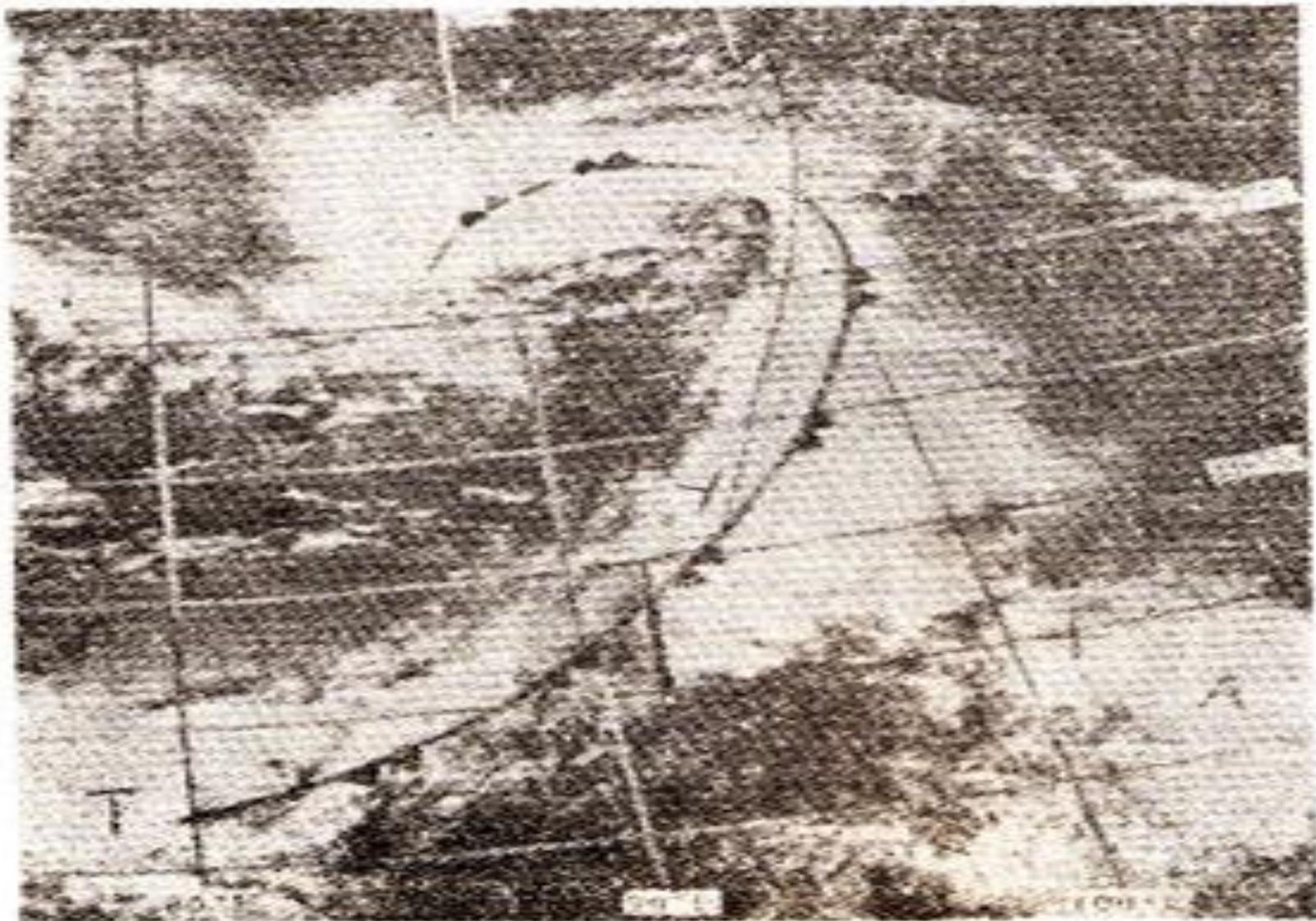


图 9.11 锋面附近的云图



### 三. 天气形势预报和气象要素预报

在天气学方法的预报中，只有对未来天气形势变化作出正确的判断，才能对一地的天气(气象要素和天气现象)变化作出正确的预报。

天气形势预报是天气预报的基础



# 1. 天气形势预报：

大范围环流，高低气压系统（高空的长波槽、脊和地面气旋、反气旋）和锋面等的预报。



## 在中纬度，天气形势预报包括：

- 西风带的强弱，位置的变化；
- 长波槽脊的强度和移动方向、速度；
- 地面气旋、反气旋强度的变化和移动方向、速度；
- 锋的强度，锋生锋消和锋的移动。



# 做天气形势预报的重要理论依据：

- 诊断分析各种物理量场
- 罗斯贝波的移速公式
- 涡度方程
- 锋生动力学



# 诊断分析

诊断分析是天气学与动力气象学逐步结合的产物，其主要任务是利用实测气象资料计算出散度、涡度、垂直速度、水汽通量、热量和能量等物理量场，分析其空间分布和时间演变特征，分析它们与天气系统发生演变的关系。



## 涡度方程：

$$\frac{d\zeta}{dt} = -(f + \zeta) \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) - v \frac{\partial f}{\partial y}$$

是由运动方程演化出来的一个描述涡旋运动强度变化的方程，在大气动力学和天气学中用途非常广泛。



## 2. 气象要素预报：

主要包括**温度、风、云、雾和降水**的预报。

根据天气形势预报的结果和各种天气系统中天气分布的特点，结合各地特殊的自然地理条件，气象要素的统计规律来做出未来气象要素的变化情况的推断。



## 风的预报：

考虑风的变化与气压系统及锋面的关系、地形对风的影响、热力环流的作用（如海陆风、山谷风等）。

一般将平均风速达到 6 级（10.8—13.8 米/秒）以上的风称为大风。它对航运、渔业生产和军事活动影响很大，所以大风预报是风的预报的重点。



# 温度的预报

特别注意灾害性的气温（霜冻、持续性的高温或低温）的预报

考虑因素：

温度平流的作用

垂直运动对局地温度变化的影响

非绝热加热或冷却

（天气状况和下垫面性质对温度的影响）。



## 云、雾和降水的预报

对云雾的预报航空和交通部门要求更高。

降水的预报目前都认为难度很大，特别是中小尺度的降水，其强度和落点都较难报准，通常要配合统计方法进行预报。给出降水的概率。



## § 2. 数值预报方法

20 世纪初，V.Bjerknes 首先把天气  
预报问题提成数学上的初值问题：

根据某时刻实测的气象资料，通过  
描述大气运动的动力方程组，可以计算  
出将来某时刻大气的运动和状态。



# 大气的动力方程组：

$$\frac{du}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + fv + F_{rx} \quad \text{— x 方向运动方程}$$

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} - fu + F_{ry} \quad \text{— y 方向运动方程}$$

$$\frac{dw}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} - g + F_{rz} \quad \text{— z 方向运动方程}$$

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad \text{— 连续方程}$$

$$C_v \frac{dT}{dt} + P \frac{d\alpha}{dt} = \frac{dQ}{dt} \quad \text{— 热通量方程}$$



其中

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} + w \frac{\partial}{\partial z}$$

$\frac{\partial}{\partial t}$  为局地变化项

$$u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y}, \quad w \frac{\partial}{\partial z}$$

分别为水平输送项（平流项）和垂直输送项。



直到目前为止，这套大气动力方程组还没有解析解，只能求它的数值解。于是发展了数值天气预报方法。



把大气动力方程组写成如下形式：

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -u \frac{\partial u}{\partial x} - v \frac{\partial u}{\partial y} - w \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + fv + F_{rx}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -u \frac{\partial v}{\partial x} - v \frac{\partial v}{\partial y} - w \frac{\partial v}{\partial z} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} - fu + F_{ry}$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -u \frac{\partial w}{\partial x} - v \frac{\partial w}{\partial y} - w \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} - g + F_{rz}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -u \frac{\partial \rho}{\partial x} - v \frac{\partial \rho}{\partial y} - w \frac{\partial \rho}{\partial z} - \rho \nabla \cdot \vec{V}$$

$$C_v \frac{\partial T}{\partial t} = -u \frac{\partial T}{\partial x} - v \frac{\partial T}{\partial y} - w \frac{\partial T}{\partial z} - RT \nabla \cdot \vec{V} + \frac{dQ}{dt}$$



上述方程组的方程右边各项只与各气象要素值的空间分布有关，可以从某时刻的观测资料计算出来。也就可以计算出方程左边的各个气象要素的局地变化率，进一步计算出未来各个气象要素值的大小。



# 数值天气预报的两种方法

- (1) 差分法—用差分代替微分求解大气动力方程组，制作天气预报。
- (2) 谱方法—把变量展开成球面调和函数，取有限项，通过积分运算，把偏微分方程变成以展开系数及其对时间的微商的常微分方程组，再求解。



差分法制作数值预报的原理：

我们把上面各方程记作

$$\frac{\partial A}{\partial t} = F$$

其中  $A$  代表  $u, v, w, \rho, T$  等变量， $F$  代表等式右边算出来的值（用空间差分代替微分来计算）。



第一步我们用初始时刻的  $u$ ,  $v$ ,  
 $w$ ,  $\rho$ ,  $T$  和  $p$  (通常记作  $u^0$ ,  $v^0$ ,  $w^0$ ,  
 $\rho^0$ ,  $T^0$  和  $p^0$ ) 计算出初始时刻的  $F^0$ ,  
这时应有:

$$\left. \frac{\partial A}{\partial t} \right|^0 = F^0$$



经过第一个时间步长 $\Delta t$  后

变量值  $A^1$  为:

$$A^1 = A^0 + F^0 \Delta t$$

由计算出的  $A^1$  (即  $u^1, v^1, w^1, \rho^1, T^1$  和  $p^1$ ) 的空间分布又可以计算一个时间步长 $\Delta t$  以后的局地变化值:

$$\left. \frac{\partial A}{\partial t} \right|^1 = F^1$$



接着可求出第二个时间步长的  $A^2$

$$A^2 = A^1 + F^1 \Delta t$$

如此一步一步做下去，就可以求出我们所需要的某个时刻的解。



这种方法看起来简单，但数值预报的实现却经过了大量的气象学家、数学家和计算机专家近半个世纪的奋斗。

要解这套方程的必要条件：

- 从气象学上，要有比较精确的三维的观测资料和处理这些资料的方法
- 从数学上而言，要有求解这套方程组的数值方法，而且要保证其收敛性和稳定性
- 要有高速电子计算机，才能保证每天能按时做出预报。



# 数值天气预报包含的几部分工作

1. 预报模式的建立。
2. 资料分析和初始化。
3. 业务数值预报。



# 1. 预报模式的建立

进行数值天气预报首先要有预报模式。须将大气动力学方程组的各部分用计算的语言表示出来，存于计算机内，以便每天做预报用。



## 建立数值预报模式的各项工作：

- (1) 根据不同的预报要求，对方程组进行必要的简化；
- (2) 选择坐标系，包括选择垂直坐标系和给定上下边界条件；
- (3) 确定计算范围和垂直分层（如果是区域预报模式，则要确定侧边界条件）；



## 建立数值预报模式的各项工作：

- (4) 对须考虑的影响因子和物理过程（如辐射、感热交换、地形影响、湍流扩散、凝结过程等等）设计其计算方案；
- (5) 选择数值计算方法（如差分法或谱方法），把微分方程写成差分方程或谱方程，求解。
- (6) 编程，输入计算机，再用天气实例经过多次试验，最后形成预报模式。



## 2. 资料分析和初始化

### 对观测资料进行处理形成初值

观测资料与模式不匹配：

- 来源于每天不同时刻
- 来自不规则分布的观测站
- 是标准等压面上的数据，与预报模式的垂直分层不同
- 观测数据可能有误差和与模式不协调



## 资料处理包括以下工作：

- (1) 资料检误
- (2) 客观分析
- (3) 资料初始化
- (4) 四维同化



## (1) 资料检误:

在气象观测和资料传递中有可能出现一些错误，分析判断出这些错误资料并加以订正或删除的过程叫做资料检误。



## (2) 客观分析:

**客观分析**--直接将观测资料输入计算机,由计算机将空间分布不均匀的测站观测资料插值到规则分布的格点上。

采用客观分析方法需要先确定联系格点值与台站值的方程,事先编好程序放在计算机中。每次做数值预报前将观测资料输入,为数值预报模式产生初值。



### (3) 资料初始化:

不同的仪器测得的气象要素有不同的系统误差。如果把仪器的观测误差引入方程组，就等于引入了虚假的作用力。这些虚假的力往往会激发出一些快波，不但使预报结果不正确，还可能使计算出现不稳定。因此对经过客观分析的数据还要做进一步处理，使初始数据与预报模式协调。这工作称为资料的初始化。



## (4) 四维同化:

自从气象卫星升空以后，不定期的非常规的观测资料大量增加。这些卫星资料的利用，对弥补洋面和沙漠地区观测资料的不足以及适时更新预报值很有帮助。于是在初始资料处理上出现了四维同化方法。



**四维同化**就是把不同时刻 ( $t$ ), 不同地区 ( $x, y$ ), 不同高度 ( $z$ ), 不同性质 (常规或非常规) 的、具有不同观测误差的资料源源不断地输入计算机, 通过一定的程序对它们进行分析处理, 把它们协调起来, 融合成常规的、定时的资料。为数值预报提供初值或及时更新预报值。



### 3. 业务数值预报

每天按时将观测资料处理好，输入模式中运行，计算出以后若干天或更长时间的各种气象要素值，推知未来天气的变化，并对外发布预报。



# 我国的两类业务数值预报模式

- 国家级的预报模式
- 区域预报模式



## 国家级的模式(四个):

- (1) 全球业务预报系统: 包含中期和短期预报模式。主要做天气形势预报。目前在国家气象局北京气象中心的Cray-c92计算机上运行。
- (2) 有限区域业务模式: 主要用于我国的降水预报。其空间网格距和时间步长比全球业务预报系统大大减小, 分辨率高。



(3) 台风路径业务预报模式：

每天在世界时 00 点和 12 点做两次 48 小时的台风路径预报。

(4) 环境紧急响应业务系统：

对事故紧急响应，预测核污染物扩散和迁移的路径、浓度和沉降量。  
及时提供给 WMO。

1996 年我国国家气象中心被世界气象组织 (WMO) 确认为亚洲区域的环境紧急响应中心，



## 区域预报模式：

广州，上海，武汉，沈阳，成都和兰州等区域气象中心都建立了他们自己的数值预报模式，分别用于预报他们区域的特殊的天气过程如华南台风，东海台风，长江流域梅雨期的暴雨，东北地区降水，西南地区降水和西北地区的天气预报等。



## § 3. 统计预报方法

气象统计预报方法是用概率统计方法通过对大量历史资料的分析，寻找出天气变化的统计规律以及预报因子与预报量之间的数量关系，建立统计数学模式来预报未来的天气。



# 用统计预报方法预报天气 的主要工作：

1. 选择预报因子。
2. 建立统计预报方程。



# 1. 预报因子的选择:

- ◆ 首先要积累大量的气象观测资料，在大量的气象要素中选择出与预报量有关的预报因子（特别是要注意选择有物理意义的因子）。
- ◆ 分析预报量与预报因子之间的相关性，进行统计检验。



## 2. 建立统计预报方程：

选择一种统计预报方法，找出预报因子与预报量之间的数量关系，建立统计预报方程。



有很多方法用来建立统计预报方程。

以回归法为例：

假定我们要做温度预报，从历史资料中我们已经找到与温度(T)有关的因子若干个，设为  $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, \dots$ 。可以假设它们满足以下的方程：

$$T = a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4 + a_5x_5 + \dots$$

(A)



把历史资料带入方程 (A) 中，求出系数  $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, \dots$ 。（通常是用最小二乘法来求）。

有了系数  $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, \dots$  之后，就可以用实际观测的预报因子的数据带入方程 (A)，求出温度的预报值。



## § 4. 动力—统计预报

### 数值预报的优缺点：

能相当准确地报出 3 天以内的高空、地面形势，预报准确率已超过主观预报。

对气象要素（如降水、温度、风、云、能见度等）的预报，准确率不高，且耗费太多的计算时间，而且有的项目还难以直接用数值预报方法作出预报



## 统计预报的优缺点：

**优点：** 不仅对气象要素预报，而且对形势预报也取得了一定的成效。

**缺点：** 缺乏物理基础，特别是对预报量有时间滞后的预报因子的相关关系的优良性不容易提高统计关系的稳定性也不够好。



1959 年 Klein 等人首先提出了应用数值预报产品制作局地天气预报的方法，从而开创了把客观预报的两大分支——数值预报和统计预报结合起来的动力—统计预报方法。目前在数值预报产品使用中，最常用的方法有完全预报方法和模式输出统计方法。



# 1. 完全预报方法

(1)利用历史观测资料和统计方法来确定局地气象要素的预报方程，

(2)把数值预报模式的输出结果代入统计预报方程中制作预报。

这个方法是假定模式输出值与实测值完全一致的，即它认为数值预报是完全对的，所以称为完全预报方法。



## 2. 模式输出统计方法：

此方法与完全预报方法的差别是其预报因子是从数值预报模式输出的归档资料中选取的，用这些因子确定统计预报方程后，在做预报时，就把数值预报输出结果代入预报方程中。这种方法简称MOS法。优点是在建立预报方程时自动地考虑了数值预报的系统误差，同时大量利用了数值预报的物理量场，效果较好。



## § 5. 卫星、雷达探测资料的应用

### 一. 气象卫星探测资料的应用

卫星自上而下观测地球大气，所拍摄的云图直观、形象，加深了预报人员对天气系统的理解，特别是在资料稀少的高原、沙漠、海洋上，卫星资料起着更为重要的作用。



卫星图像提供了在空间上连续的资料,从而提高了预报员解释常规观测报告的能力。因而卫星资料的应用促进了天气预报准确率的提高。在实际工作中,可以应用卫星探测资料估计降水,分析和预报热带气旋、对流尺度天气和天气尺度系统。



## § 6. 雷达探测资料的应用

雷达能够迅速、准确、细致地测定降水区的位置、范围、强度、性质，以及它们随时间的变化情况，它是一种掌握降水动态和提供降水临近预报的有效工具。自 1950 年代以来，天气雷达在中尺度天气研究中发挥了重要的作用。



S 波段(10cm)和 C 波段(5cm)天气雷达所观测到的回波，绝大多数来自于降水，它能够随时探测到测站周围一定范围内降水的发生、发展、消散以及移动等情况。多普勒雷达可以探测到降水云内和晴空大气中的水平风场和垂直风场，降水滴谱和大气湍流等，可以探测冰雹、龙卷、下击暴流等。



由于雷达提供频繁的、详细的、空间连续的观测资料，它与静止气象卫星一起，成为识别重要的中尺度天气现象的极为有用的工具，在灾害性天气的预报中起着重要的作用。



## § 7. 天气预报业务现代化系统简介：

天气预报作为一种实用技术，其发展离不开大气科学理论和其他相关科学技术的发展与进步。在大气观(探)测技术、数值天气预报和计算机可视化技术迅猛发展的推动下，天气预报业务正向着自动化、客观化、定量化、综合化和智能化方向发展。



# “气象信息综合分析处理系统(MICAPS)”

一个与通讯、数据库配套的，支持天气预报制作的人机交互系统。

其主要用途是为预报员提供一个业务预报工作平台，

它集气象信息显示(包括各类常规天气图表、卫星云图、传真图、指导预报图等)、国家地理数据(诸如行政区域图、地形地貌图、湖泊河流、城市与台站资料、主要铁路和公路等)、历史气象数据(如气温、降水量极值等)、人机交互处理和气象预报服务产品加工为

