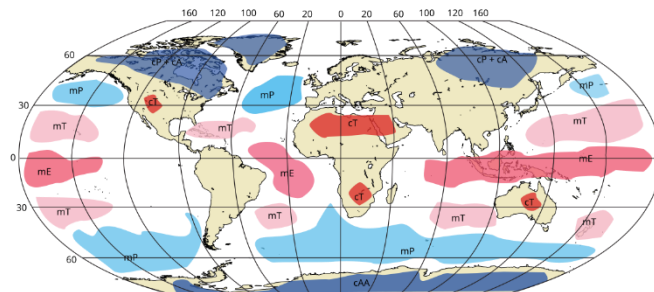


## 第二章 气团与锋

**章节概述** 本章主要教授锋或锋面附近的气象要素场的特征、锋生公式的物理意义及定性分析应用、气压倾向方程、地面锋线与高空锋区、高空等压面的上高度场三度空间的配置、用密度一级不连续面模拟锋时，锋的坡度公式推导及讨论和锋生锋消的动力学特点。



全球气团分布情况

## 2.1 气团

### 2.1.1 基本概念与性质

#### 2.1.1.1 基本内容

**概念** **Air mass** 从地表广大区域来看，存在着水平方向上**物理性质(温度、湿度、稳定度等)比较均匀**(各种要素梯度很小)的大块空气，这种性质比较均匀的大块空气叫做气团。

**性质**

- ① 水平范围常可达**几百到几千公里**
- ② 垂直范围可达**几公里到十几公里**(限制在对流层)
- ③ 水平温度差异小，**一百公里范围内的温度差为1℃**，最多不超过2℃
- ④ 垂直方向上温度随高度递减，与对流层一致。

#### 2.1.1.2 气团形成与变性

**形成条件** **性质均匀**(海洋\陆地)的**广阔**的地球表面**下沉辐散，稳定的环流**。(地表上方的空气要获得地表面的物理属性，需要时间较长，可以保证气团在该区域稳定存在) 与基本属性对应

**方式** 各种尺度的**湍流、系统性垂直运动、蒸发、凝结和辐射等物理过程**

**气团变性** 气团的**物理属性逐渐发生变化** 例如冷高压南下受到下垫面影响变暖

不同气团变性的快慢是不同的，变性快慢和它所经下垫面性质与气团性质差异的大小有关。

- ① **冷气团移到暖的地区变性较快**。因为冷气团低层变暖，**趋于不稳定，乱流对流**容易发展，能很快地将低层的热量传到上层大气。
- ② **暖气团移到冷的地区则变冷较慢**。因为低层变冷**趋于稳定**，乱流和对流不易发展，其冷却过程主要靠**辐射作用**进行。
- ③ **大陆移入海洋的气团容易取得蒸发水汽而变湿**(常见于山东半岛，有暴雪)，而从海洋移到大陆的气团，则要通过**凝结及降水过程**才能变干，所以气团的变干过程比较缓慢。

### 2.1.2 气团分类

#### 2.1.2.1 地理分类

**北极气团Ac/Am Arctic** 即冰洋气团，分布于极圈内 70°-90°。有大陆性或海洋性两类，性质为**气温低、水汽少、气层非常稳定**，冬季入侵大陆时会带来暴风雪天气 南极为大陆气团，北极为冰洋气团

**极地气团 Polar** 分布于**中高纬度西风带 40°N- 70°N**

**大陆性Pc continental** 低温干燥，天气晴朗，气团低层有**逆温层**，气层稳定，冬季多霜、雾

**海洋性Pm maritime** 夏季同 Pc 相近、**冬季比 Pc 气温高，湿度大**，可能出现云和降水

**热带气团 Tropical** 分布于**副热带地区，20°N- 40°N**

**大陆性Tc continental** 高温干燥、晴朗少云，低层**不稳定**

**海洋性Tm maritime** 低层温暖、潮湿，且**不稳定**，中层常有逆温层

**赤道气团E Equatorial** 分布于赤道 20°N 以南，**湿热不稳定**，天气闷热，多雷暴

### 2.1.2.2 热力分类

**冷气团** 当气团**向着比它暖的下垫面**移动时称为冷气团  
**暖气团** 当气团**向着比它冷的下垫面**移动时称为暖气团

从高纬陆地来一般都是冷气团，称干冷气团  
从低纬海洋来的称为暖湿气团

### 2.1.3 我国境内的气团活动与天气

**概述** 我国境内的气团多为**变性气团**

**冬半年** 主要影响：**极地大陆气团**、**热带海洋气团**(太平洋、南海)、**北极气团**。

① **大陆西伯利亚气团** (干冷天气下的反气旋) 与**热带海洋气团**相遇时在气团交界处**形成阴雨天气**，如冬季**华南地区的阴雨**。**热带海洋气团**可影响到华南、华东和云南等地，形成**温热、湿润**的天气。

② **北极气团 Ac** 南下侵入我国可造成**气温剧烈下降的强寒潮天气**。

**夏半年** 主要影响：**西伯利亚气团**、**热带海洋气团**(太平洋、南海)、**热带大陆气团**(干暖中亚)、**赤道气团**

① **西伯利亚气团**与南方海洋气团在我国大陆相遇并**由南向北推进**，造成我国**雨带的推移**。如右图，梅雨、秋雨

西伯利亚气团在长城以北和西北活动，与热带海洋气团一起造成我国**盛夏南北方降水**

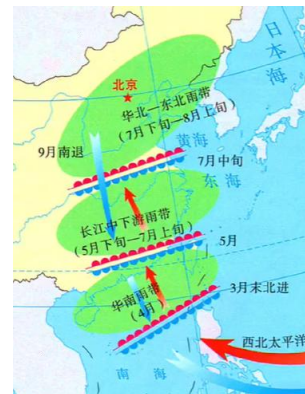
② 来自印度洋的**赤道气团(季风气团)**可造成**长江流域以南地区大量降水**，而**热带大陆气团**也可影响我国西部地区，出现严重的干旱和酷暑。

**春季** 主要影响：**西伯利亚气团**、**热带海洋气团** **春如四季**

此时西伯利亚气团和热带海洋气团两者势力相当，**互有进退**，是**锋系及气旋活动最盛的时期**。

**秋季** 主要影响：**变性西伯利亚气团**主导、**热带海洋气团**

变性的西伯利亚气团占主要地位，热带海洋气团退居东南海上，我国东部地区在单一气团控制下，出现全年最宜人的**秋高气爽**的天气。



## 2.2 锋的概念与锋面的坡度

**概述** **锋面和气旋**是中纬度最典型的两类天气系统，中纬度许多天气现象与锋面和气旋有关。

### 2.2.1 锋的概念

**锋区** 密度不同的两个气团之间的过渡区，在天气图上表现为**温度水平梯度大而窄的区域**，**随高度向冷区倾斜**，是一个**等温线的密集带**。即冷暖气团相遇时的**狭窄倾斜过渡带**。

**上界**：锋区与暖气团的交界面 **下界**：锋区与冷气团之间的交界面

**锋区宽度** 上界和下界的水平距离称为锋的宽度。在近地面层中锋面**宽约数公里**，在**高层可达 200-400 公里**。可见其宽度与其水平长度数百~数千公里相比是很小的，所以人们常把锋区近似地看成一个面，即锋面。

**锋面** **Weather front** **热力学场和风场具有显著变化的狭窄倾斜带**定义为锋面。其具有较大的**水平温度梯度**、**静力稳定度**、**绝对涡度**、**垂直风切变**等特征。

天气图上比例尺很小，锋面的宽度无法表示，从而把它看作空间的一个面。

**锋线** 锋面与地面的交线。习惯上把锋面和锋线统称为**锋**。

**空间结构** 锋区的**水平尺度**为**几十公里到几百公里**，一般上宽下窄，在天气图上只是一条线。

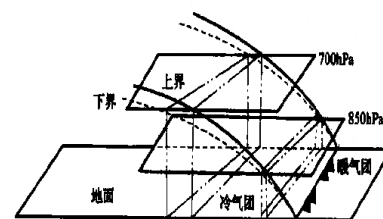
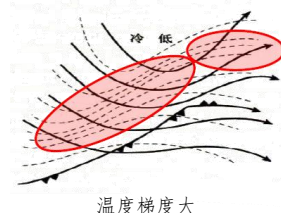
**沿锋面的尺度**一般为**1000~2000 公里** (锋面长度)

锋面实际上并不像示意图一样具有规则的几何形态。

**沿锋面一维**，属于中- $\alpha$ 尺度 (200~2000 公里)

**沿跨锋面一维**，属于中- $\beta$ 尺度 (20~200 公里)

锋面在垂直方向上厚度属于中- $\gamma$ 尺度 (1~2 公里，浅层系统)



锋面空间结构示意图

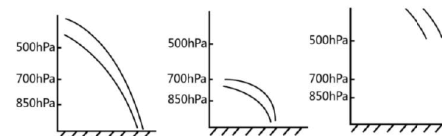
## 2.2.2 锋的分类

### 2.2.2.1 按伸展高度分类

**对流层锋** 地面-对流层顶的所有锋

**地面锋** 低层锋-700hPa 以下 主要指锋面垂直方向的伸展位置主要位于**大气低层**。地面锋一般认为是在水平面气压图上的一个强的**水平温度梯度带**。它经常与**降水相关联**，可造成局地的强烈天气，同时可以为更小尺度的天气系统的不稳定发展提供一个背景场。

**高空锋** 500hPa 以上，不接触地面 主要指位于对流层上层的锋面，它与**急流和急流轴**相伴随。它对从中纬度气旋到对流尺度的天气系统中的**强迫垂直运动**起着十分重要的动力作用。另外，对流层与平流层之间的**物质和能量等垂直输送**起着重要作用。

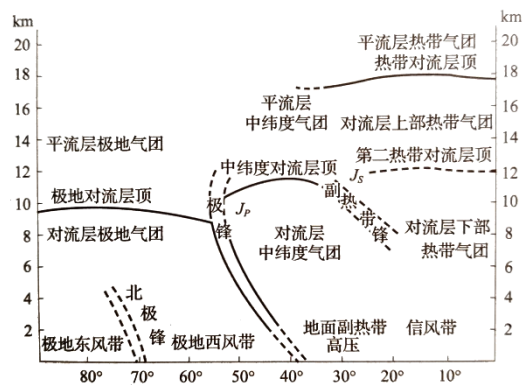


### 2.2.2.2 按地理类型分类

**冰洋锋** 冰洋气团和极地气团之间的界面，处于高纬地区，**势力较弱，位置变化不大**。

**极锋** 极地气团和热带气团之间的界面，**冷暖交换强烈，位置变化大，对中纬地区影响很大**

**副热带锋** 赤道气流和信风气流之间的界面，由于两种气流之间的温差小，以**气流辐合为主**，可称为**辐合线**。有位置的季节变化，夏季移至北半球，冬季移至南半球。多出现在海上，**是热带风暴的源地**



主要气团、对流层顶、锋面、急流和低层风系特征的关系

虚线表示气团和锋的位置随季节摆动

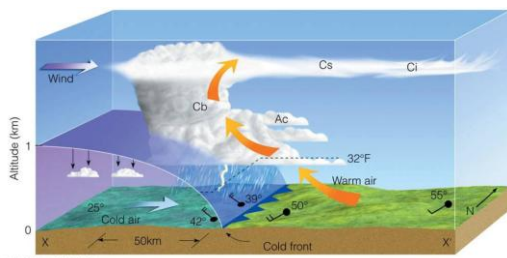
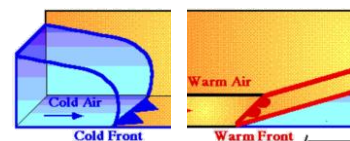
### 2.2.2.3 按锋移动的主次地位分类

**冷锋** 锋面在移动过程中，**冷气团起主导作用**，推动锋面向暖气团一侧运动。

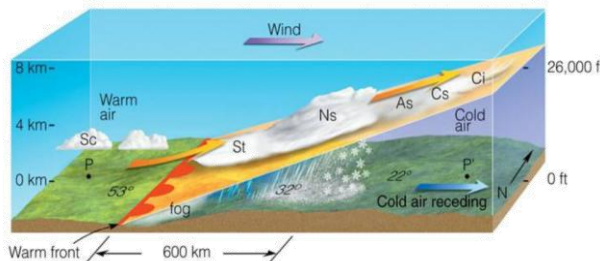
暖气团被迫抬升，**锋面坡度较大，天气在冷锋后**

**暖锋** 锋面在移动过程中，**暖气团起主导作用**，推动锋面向冷气团一侧运动

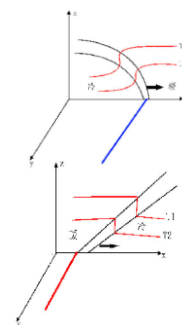
暖气团沿冷气团向上滑升，**锋面坡度较小，天气在暖锋前**



冷锋及其云系



暖锋及其云系



**准静止锋** 冷暖气团势力相当，锋面很少移动的锋 (**6 小时移动小于 1 个纬度**，24 小时移动在 2 个纬度之内)

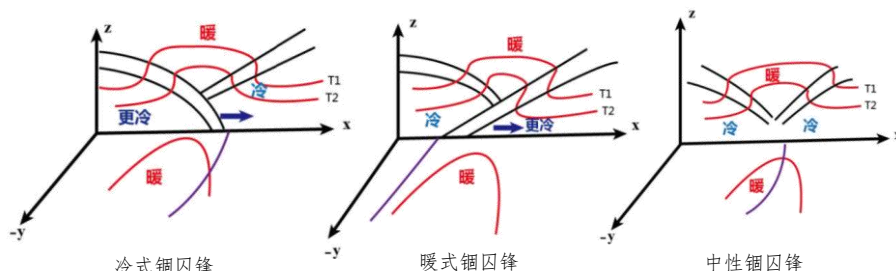
**锢囚锋** 由**冷锋赶上暖锋**或是**两条冷锋相遇叠并**形成的锋，把**暖空气抬到高空**而形成的新锋面。

即**两个冷气团之间形成的锋面**。其形成原因有：锋面受山脉阻挡形成的**地形锢囚**、**两条冷锋迎面相遇形成的锢囚**、**冷锋追上暖锋形成的锢囚**。在我国东北、华北地区活动频繁，以春季最多。

**冷式锢囚锋**：冷锋后的冷空气团比暖锋前的冷空气团**冷**，**暖舌位于地面锢囚锋后方**。

**暖式锢囚锋**：冷锋后的冷空气团比暖锋前的冷空气团**暖**，**暖舌位于地面锢囚锋前方**。

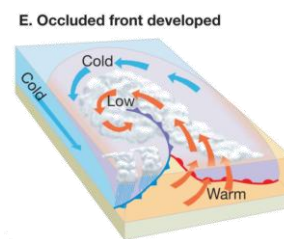
**中性锢囚锋**：冷锋后的冷空气团与暖锋前的冷空气团的温差较小，**暖舌各高度上位置不变**。



冷式锢囚锋

暖式锢囚锋

中性锢囚锋



锢囚锋的形成



## 2.2.3 马古列斯锋面坡度公式

### 2.2.3.1 锋面近似为物质面

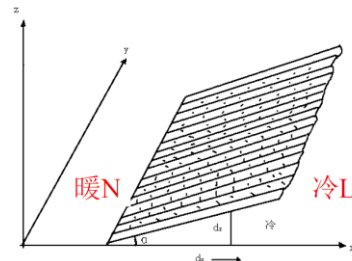
- 物质面** 由**相同的空气质点**组成的不连续面，组成锋面的空气质点不随位置变化，其中物质不能脱离锋面。
- 内容**
- ① 锋面两侧**贴近处的气压相等**，锋面两侧气压必须连续  $P_L = P_N$ ，否则锋面附近气压梯度会无穷大
  - ② 锋面是**密度的零级不连续面**， $\rho_L \neq \rho_N$
  - ③  $u_L = u_N = c$  平行于x轴方向的风速等于**锋面的移动速度**  $v_L \neq v_N$  与**锋线相平行的风**

### 2.2.3.2 锋面坡度公式

**问题重述** 如右图，x轴垂直于地面锋线，由暖指向冷  
y轴平行于地面锋线，需要求锋面倾角 $\alpha$

**锋面坡度** 我们称  $\text{tg}\alpha = \frac{dz}{dx}$  为锋面坡度。

**动力学边界** 锋线两侧**冷暖气团中气压相同**：  $P_L = P_N$  则变化量  $dP_L = dP_N$  也相等



$$\text{展开得: } dP_L = \frac{\partial P_L}{\partial x} dx + \frac{\partial P_L}{\partial y} dy + \frac{\partial P_L}{\partial z} dz \quad dP_N = \frac{\partial P_N}{\partial x} dx + \frac{\partial P_N}{\partial y} dy + \frac{\partial P_N}{\partial z} dz$$

$$\text{两式相减得: } dP_L - dP_N = \left( \frac{\partial P_L}{\partial x} - \frac{\partial P_N}{\partial x} \right) dx + \left( \frac{\partial P_L}{\partial y} - \frac{\partial P_N}{\partial y} \right) dy + \left( \frac{\partial P_L}{\partial z} - \frac{\partial P_N}{\partial z} \right) dz = 0$$

如果不等，则有气压差，导致极大的气压梯度力，违背了物质面的假设。

$$\text{由于所取坐标y轴与地面锋线平行，故 } \frac{\partial P_L}{\partial y} - \frac{\partial P_N}{\partial y} = 0, \text{ 则 } \left( \frac{\partial P_L}{\partial x} - \frac{\partial P_N}{\partial x} \right) dx + \left( \frac{\partial P_L}{\partial z} - \frac{\partial P_N}{\partial z} \right) dz = 0$$

$$\text{可得锋面坡度为: } \text{tg}\alpha = \frac{dz}{dx} = - \left( \frac{\partial P_L}{\partial x} - \frac{\partial P_N}{\partial x} \right) / \left( \frac{\partial P_L}{\partial z} - \frac{\partial P_N}{\partial z} \right) \quad \text{最原始的表达形式}$$

**进步推导** 由**地转风平衡关系**得到  $f u_g = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y}, \quad f v_g = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x}$

**坡度公式**  $\text{tg}\alpha = \frac{-f(\rho_L u_{gL} - \rho_N u_{gN})}{g(\rho_L - \rho_N)}$  **马古列斯锋面坡度公式** 其中 $u_{gL}$ 和 $u_{gN}$ 是平行于锋线的地转风分量

**进步简化** 由于密度不是观测量，所以代入**状态方程**  $\rho = \frac{P}{RT}$  可以进一步得到:  $\text{tg}\alpha = \frac{-f(T_N v_{gL} - T_L v_{gN})}{g(T_N - T_L)}$

$$\text{引入: 平均温度: } T_m = \frac{T_N + T_L}{2} \quad \text{平均地转风风速: } v_m = \frac{v_{gN} + v_{gL}}{2} \quad \text{地转风风速差: } \Delta v_g = v_{gL} - v_{gN}$$

$$\text{温度差: } \Delta T = T_N - T_L \quad \text{代入上式可得: } \text{tg}\alpha = \frac{f}{g} \left( T_m \frac{\Delta v_g}{\Delta T} + V_{gm} \text{可忽略} \right)$$

**公式**  $\text{tg}\alpha \approx \frac{f}{g} T_m \frac{\Delta v_g}{\Delta T}$  依赖于**气温**和两个气团的**风速差异**

- 讨论**
- ① 其他条件不变，**锋面坡度随纬度增高而增大**
  - ② 锋两侧**温差越大坡度越小**，温差为零则不会有锋面
  - ③ 锋两侧风速差为零时，锋面不存在；锋存在时则两侧**平行于它的地转风分速应具有气旋式切变**  
 $\Delta v_g$ 是冷暖气团中平行于锋线的分量之差，由于 $\text{tg}\alpha > 0$ ，则 $v_{gL} > v_{gN}$  风速应当具有**气旋式切变**  
气旋式切变包括：风向上的转变，即相反或风速上的转变，即风向相同，但风速减小
  - ④ **平均温度越高，则坡度越大**（表征季节变化）
  - ⑤ 锋附近气流曲率很大时应用梯度风公式，即气旋曲率越大的气流中锋面平衡坡度越大

**气压场特征** ① 锋线附近气压连续

②  $\frac{\partial P_L}{\partial y} \neq \frac{\partial P_N}{\partial y}$  锋线附近气压梯度不连续，即等压线穿过锋线时有弯折

③  $\text{tg}\alpha = \frac{\frac{\partial P_L}{\partial y} - \frac{\partial P_N}{\partial y}}{g(\rho_L - \rho_N)}$  为保证 $\text{tg}\alpha > 0$ ，又有 $\rho_L > \rho_N$ ，则  $\frac{\partial P_L}{\partial y} > \frac{\partial P_N}{\partial y}$  故折角指向高压，即锋线落在低压槽中

### 2.2.3.3 另一种推导方式

**推导** 根据热成风关系:  $\frac{\partial u_g}{\partial z} = -\frac{g}{fT} \frac{\partial T}{\partial y}$  将连续微分转化为锋面两侧的差分:  $\frac{\partial u_g}{\partial z} = \frac{u_2 - u_1}{\Delta z} = \frac{u_N - u_L}{\Delta z}$

和  $\frac{\partial T}{\partial y} = \frac{T_2 - T_1}{\Delta y} = \frac{T_L - T_N}{\Delta y}$  则可得:  $\frac{\Delta z}{\Delta y} = -\frac{fT}{g} \left( \frac{u_N - u_L}{T_L - T_N} \right)$  其中  $\frac{u_N - u_L}{T_L - T_N} \approx \frac{\frac{\partial u}{\partial y}}{\frac{\partial T}{\partial y}}$

引入涡度  $\zeta = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$  在锋面附近, 通常  $\frac{\partial v}{\partial x} \approx 0$ , 近似为:  $\zeta \approx -\frac{\partial u}{\partial y}$   $\zeta > 0$  表示气旋式环流

**公式** 
$$\frac{\Delta z}{\Delta y} \approx \frac{fT}{g} \left( \frac{-\frac{\partial u}{\partial y}}{-\frac{\partial T}{\partial y}} \right) = \frac{fT}{g} \left( \frac{\zeta}{-\frac{\partial T}{\partial y}} \right)$$

- 性质**
- ① 锋面坡度与温度梯度的大小成反比 (锋面越强, 坡度越小)
  - ② 锋面附近相对涡度为正, 锋面两侧的风具有气旋式切变

## 2.3 锋面附近气象要素场的特征

**概述** 气象要素包括温度、气压、风、变压、湿度、天气情况等, 它们在锋面附近有明显的变化。

### 2.3.1 基本要素场特征

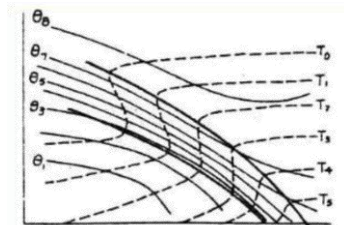
#### 2.3.1.1 温度场特征

**水平方向** 锋区内温度水平梯度大, 表现为等温线密集带, 两侧气团中温度则水平分布均匀。  
锢囚锋在高空图上有暖舌, 暖舌两侧等温线密集。锋附近区域内, 在水平方向上的温度差异非常明显, 100 公里的水平距离内可相差近 10°C, 比气团内部的温度差异大 5-10 倍。

**应用** 根据锋区内等温线密集度确定锋区强度、地面锋线位置, 等压面上冷暖平流确定锋的类型。

根据高空锋区(等温线密集处)来确定地面锋线位置,

- 垂直方向**
- ① 锋区内温度垂直梯度小, 可能出现锋面逆温、等温或递减率小, 两侧气团内温度则随高度递减。
  - ② 冷暖气团温差越大, 锋面逆温越强或过渡区越窄, 通过锋区时等温线弯折越厉害。
  - ③ 位温随高度增大的快, 锋区等位温线密集。等位温面随高度向冷区倾斜, 与锋面倾斜方向一致。



锋面附近等温线与等位温线

#### 2.3.1.2 湿度场特征

**总述** 干冷暖湿。一般暖空气湿度大, 露点高; 冷空气湿度小, 露点低。由此, 在地面图上定锋时, 需要参考露点温度的大小。注意: 水汽保守性较好, 若无降水发生, 则露点代表性非常好。

### 2.3.2 零级不连续模拟

**总述** 以密度的零级不连续模拟锋面时, 锋面附近风场、气压场和变压场的特征  $\tan \alpha = \frac{dz}{dx} = \frac{\frac{\partial P_L}{\partial x} \frac{\partial P_N}{\partial x}}{g(\rho_L - \rho_N)}$

#### 2.3.2.1 气压场特征

**特征** 锋面两侧气压连续, 密度不连续, 则气压梯度不连续: 冷气团中气压梯度大于暖气团中气压梯度

**应用** 等压线过锋面有气旋性弯曲, 锋面处等压线有折角, 指向高压



锋面附近的气压场和风场的分布