

气象与气候学

张利平,陈杰

教授 博导

武汉大学水利水电学院

内容简介

- 绪论
- 大气概述
- 大气的热能和温度
- 大气的水分
- 大气的运动
- 天气系统
- 气候的形成
- 气候带和气候型
- 气候变化和人类活动对气候的影响

第三章 大气的运动

- 作用于空气的力
- 大气运动方程
- 大气中风的形成
- 连续性方程

- 地 - 气系统物质与能量的输送和交换，是通过空气分子运动来实现和进行的，一旦空气分子产生运动则立即出现人们所说的风的天气现象。

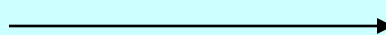
- 据物理学原理推论，任何物体只有在受力时才产生运动。大气层空气之所以产生运动，是在力的作用下产生。该作用力主要是气压梯度（水平与垂直）、地转偏向力、惯性离心力、摩擦力。

大气的水平运动——风

力 → 气压差



气压梯度
(单位距离间的气压差)



气压梯度力



水平气压梯度力

(形成风的直接原因)

一、作用于空气的力

(1) 气压梯度与气压梯度力

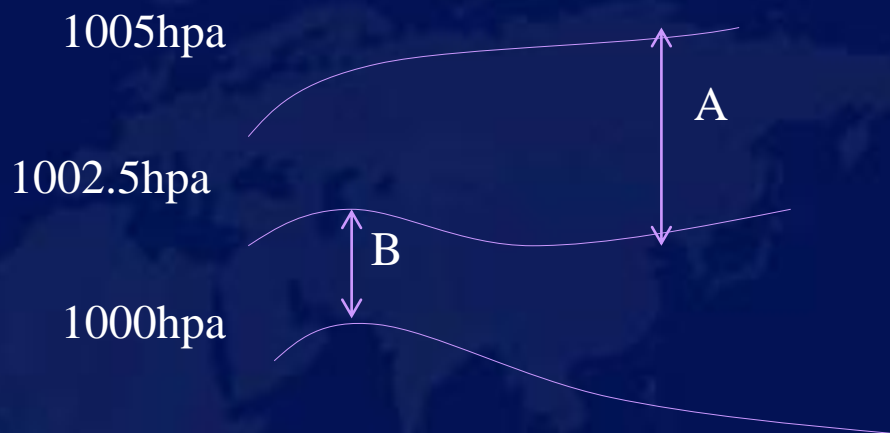
① 气压梯度

方向由高压指向低压，大小等于单位距离内的气压差。

单位：**hpa / m (km)**

表示方式： $-\Delta p / \Delta N$ 。 Δp 为两相邻等压线间气压差， ΔN 为两相邻等压线间距离。负号表示气压降低，因气压取正值而加负号。

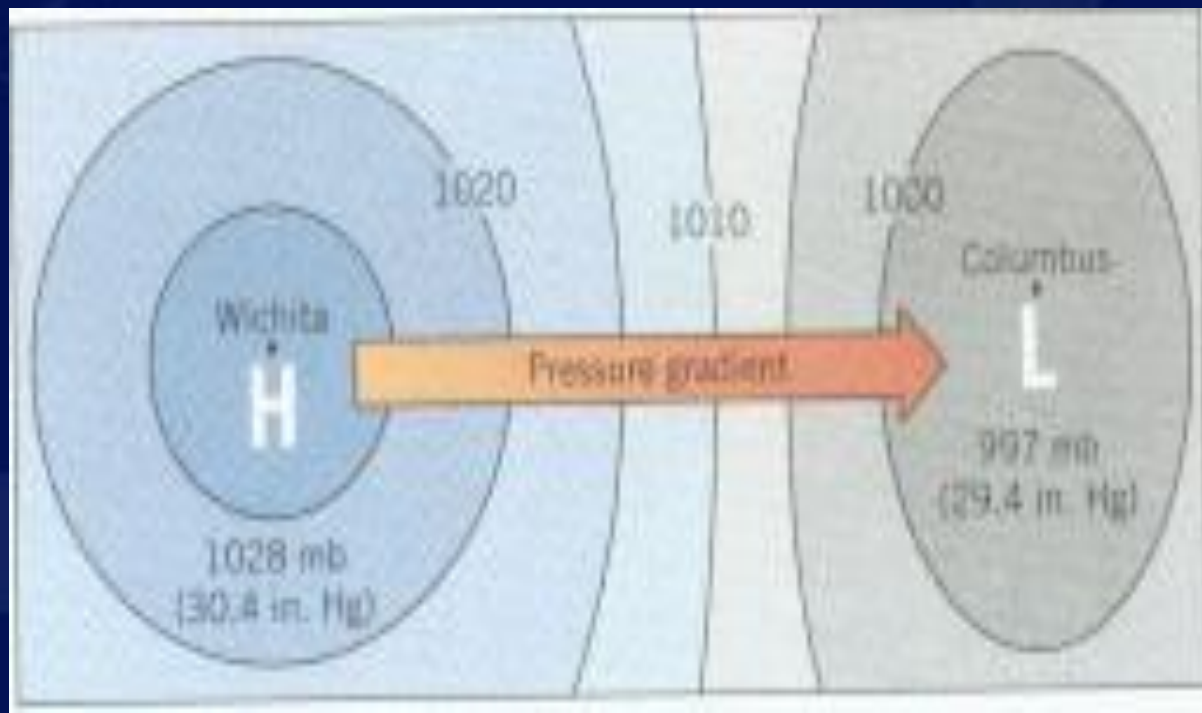
• 气压梯度的大小



等压线稀疏，单位距离内
气压差异小(气压梯度小)

等压线密集，单位距离内
气压差异大(气压梯度大)

• 气压梯度的方向 ——由高压指向低压



水平气压梯度力



方向：垂直于等压线，由高压指向低压

②水平气压梯度力 (G)

概念—— 水平气压梯度存在时，单位质量空气在水平方向上受到的作用力。

表达式： $G = - (1/\rho) \cdot (\Delta p / \Delta n)$

式 中： $\rho = 1.293 \text{kg/m}^3$ 。 $\Delta p / \Delta n = 1 \text{hpa} / 111 \text{km}$
时， $G = 7 \times 10^{-4} \text{N/kg}$ 。

- 表示1Kg质量的空气，可获 7×10^{-4} 牛顿的力，此力相当于1Kg质量空气在水平方向上可获 $7 \times 10^{-4} \text{ m/s}^2$ 的**加速度**。
- 此力虽小，但持续的加速度作用，足以使空气从静止状态转为运动状态，是空气产生运动的原动力。

例： 3小时，风速从0增至 7.6m/s (4级风)

1天，风速从0增至 60m/s (17级风力)

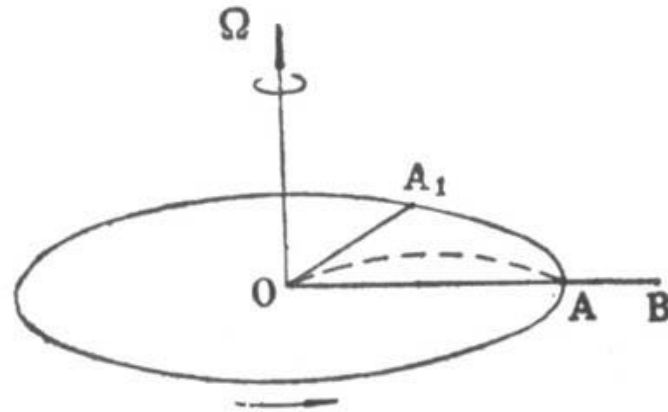
(2) 地转偏向力 (F_c)

概念——由于地平面转动而产生的使空气偏离气压梯度力方向的力。起到限制风无限增大的作用。

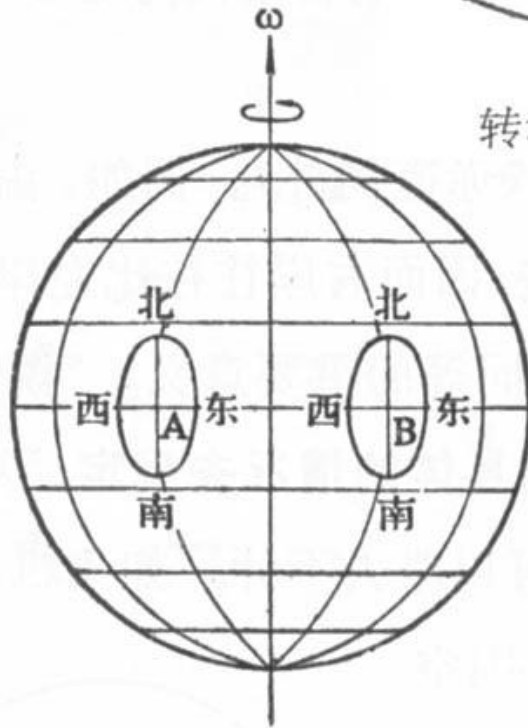
$$F_c = A = 2V\omega \sin\Phi$$

- **差别**——北半球 F_c 使运动空气向右偏，南半球相反使运动空气向左偏，改变了大气物质能量输送的方向。
- **作用**——只改变空气运动方向，不改变速率（只改变风向，不改变风速大小）。
- **大小**——地转偏向力在赤道为零，随纬度而增加，极地达最大。

地转偏向力



转动圆盘上运动物体的偏向



赤道上的地平面不绕其垂直轴转动



纬度 φ 处地平面绕其垂直轴的转动

(3) 惯性离心力 (C)

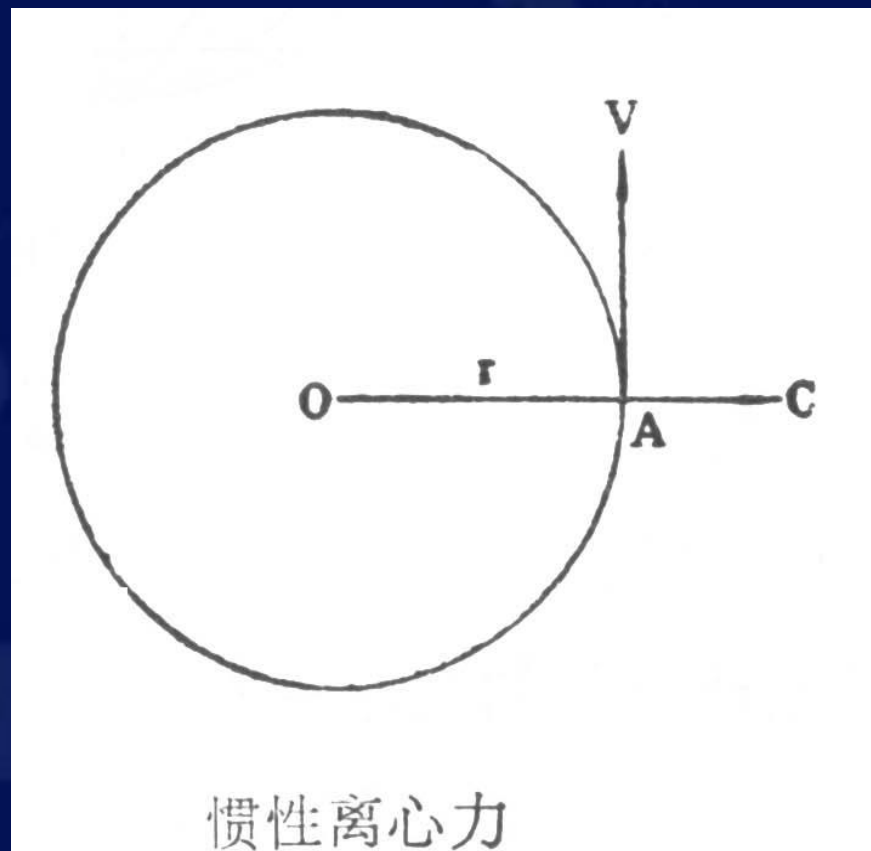
概念——空气作圆周运动时，为保持沿惯性方向运动产生的力。

- 惯性离心力同运动方向相垂直，自曲率中心沿半径指向外缘，

其大小同空气运动的线速度 (V) 的平方成正比，与曲率半径 (r) 成反比。

表达式： $C = V^2 / r$

惯性离心力





- 实际大气空气运动曲率半径（几十千米——几千千米）很大，故C很小。但在低纬度或空气运动速度大而曲率半径很小时，C 较大并可能超过 G。

- 作用——只改变风向，不改变风速大小。

(4) 摩擦力 (R)

概念——两个作相对运动的物体，在相互接触的界面间产生的一种阻碍物体运动的力（有外摩擦力、内摩擦力之分）。

① 外摩擦力

概念——地表阻碍与之接触的近地表空气运动的力

表达式： $R = -K \cdot V$

摩擦力的方向

- 方向与运动空气相反，大小与运动空气的速度（V）和摩擦系数（K）成正比。
- 海上R小，风大；陆上R大，风小。

②内摩擦力

概念——空气运动速度不同或运动方向不同两个相互接触的气层（团）间产生的摩擦力（相互牵制的力）。

主要通过乱流（湍流）交换作用使气流发生改变（也称湍流摩擦力）。摩擦力数值很小，可忽略不计。

- **作用——**可减小运动空气的速度（风速）和地转偏向力。
- **影响——**近地面大于上层。随高度增加而逐渐减小，1 - 2km高度以上其影响可忽略不计。
- **1 - 2km以下称作摩擦层或边界层，1 - 2km以上称作自由大气。**

气压梯度力

$$\vec{G} = -\frac{1}{\rho} \nabla p$$

地转偏向力

$$\vec{D} = -2\Omega \times V$$

惯性离心力

$$\vec{C} = \frac{V^2}{r}$$

摩擦力

$$\vec{N} = kv$$

上述四个力对空气运动影响不同。

气压梯度力是空气产生运动的直接动力，为最基本的力；

地转偏向力对高纬度或大范围的空气运动影响大；

惯性离心力对空气作曲线运动时起作用；

摩擦力在摩擦层中起作用。

第三章 大气的运动

- 作用于空气的力
- 大气运动方程
- 大气中风的形成
- 连续性方程

大气运动方程

大气运动方程是表示作用于空气微团上的力与其所产生的加速度之间关系的方程。根据牛顿第二定律，物体所受的力等于质量和加速度的乘积，即 $F=ma$ 。F为所受的力，是各个作用力的总和。单位质量空气运动方程的一般形式为：

$$\frac{d\vec{V}}{dt} = \vec{G} + \vec{D} + \vec{N} + \vec{g}$$

式中：G为气压梯度力，D为地转偏向力，N为摩擦力，g为重力

大气运动方程

标准坐标系的运动方程（局地直角坐标系）：

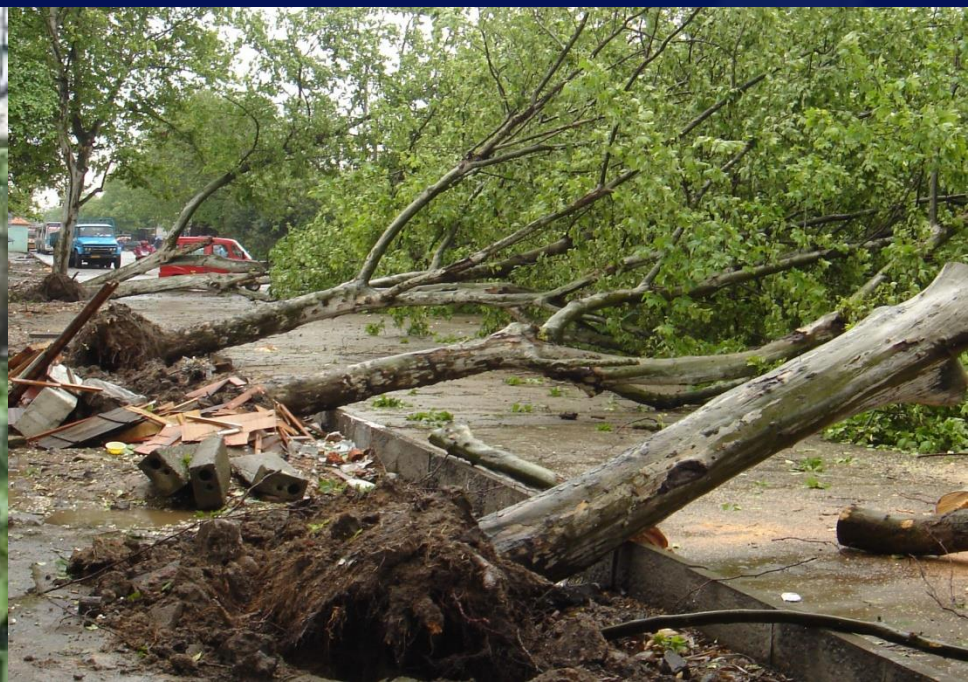
$$\frac{d\vec{V}}{dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla p - 2\vec{\Omega} \times \vec{V} + \vec{g} + \vec{F}$$

分量形式

$$\begin{cases} \frac{du}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + 2\Omega \sin \varphi - 2\Omega w \cos \varphi + F_x \\ \frac{dv}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} - 2\Omega u \sin \varphi + F_y \\ \frac{dw}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + 2\Omega u \cos \varphi - g + F_z \end{cases}$$

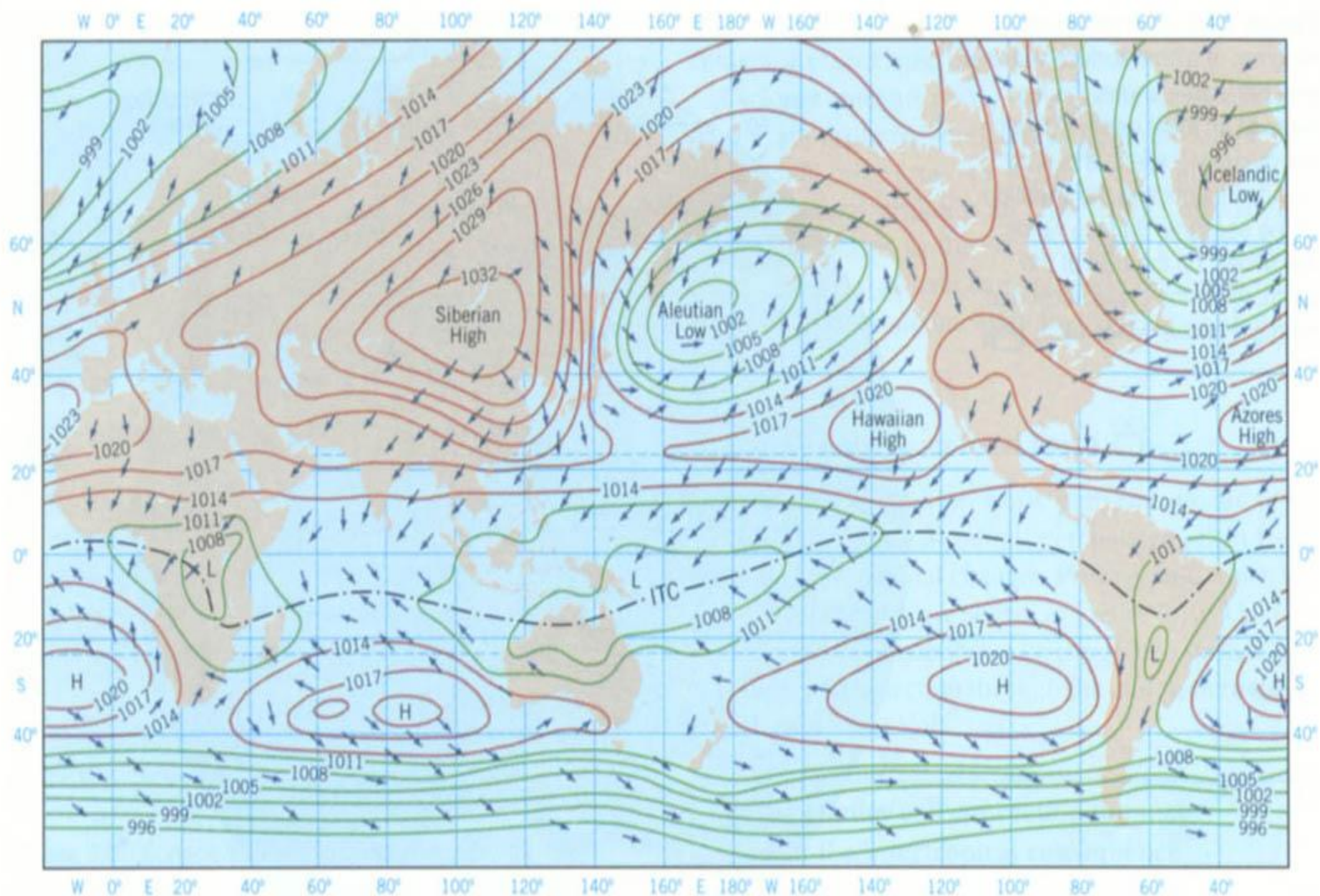
第三章 大气的运动

- 作用于空气的力
- 大气运动方程
- 大气中风的形成
- 连续性方程

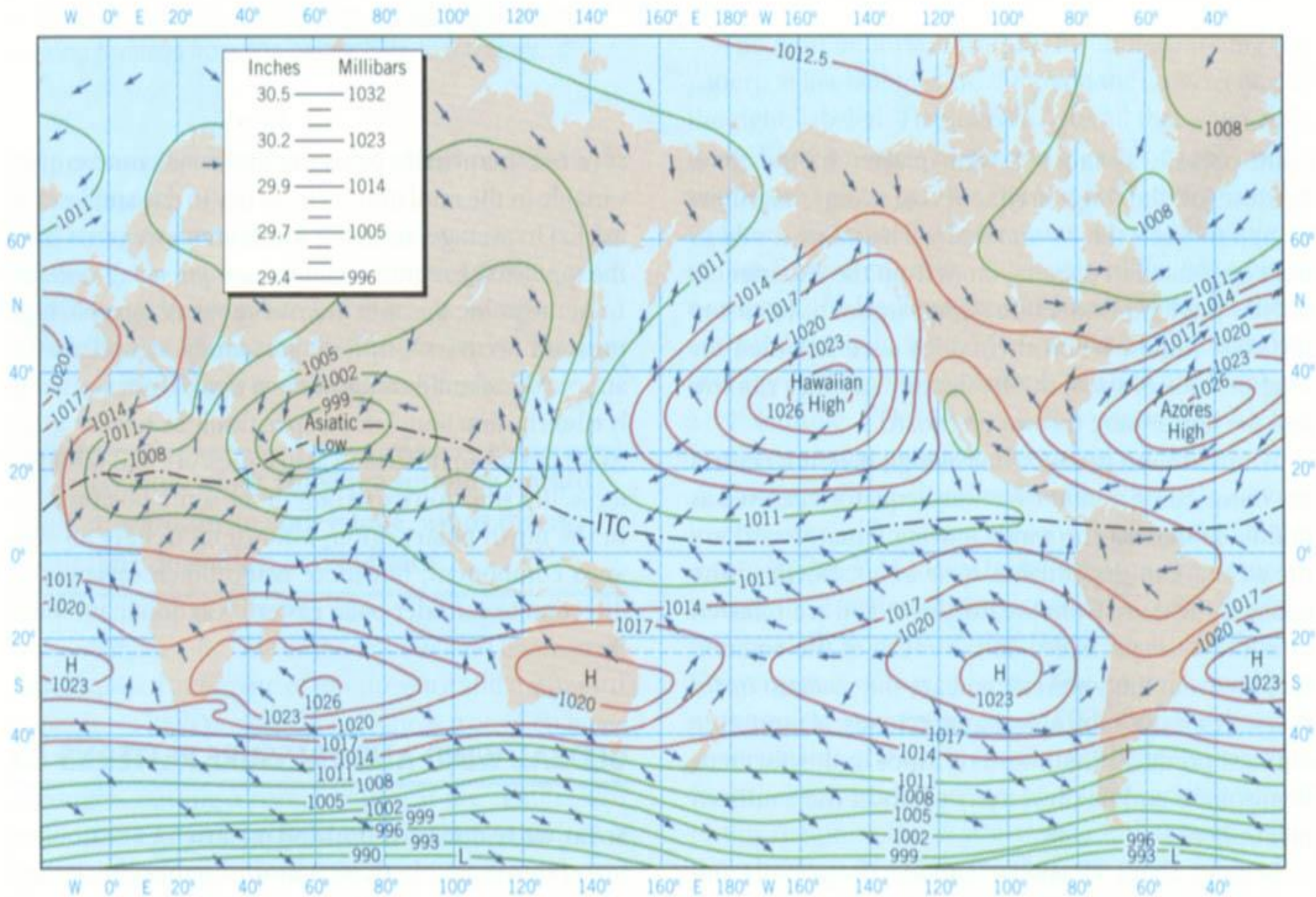




全球1月份海平面平均气压图



全球 7月海平面平均气压图



大气圈

千米
900

外层（逃逸层）

热层（电离层）

中层

平流层

对流层

自由大气层

对流层顶

\vec{G} \vec{D}

摩擦层

2000m

\vec{G} \vec{D} \vec{N}

地转平衡

(hPa)

1002

1004

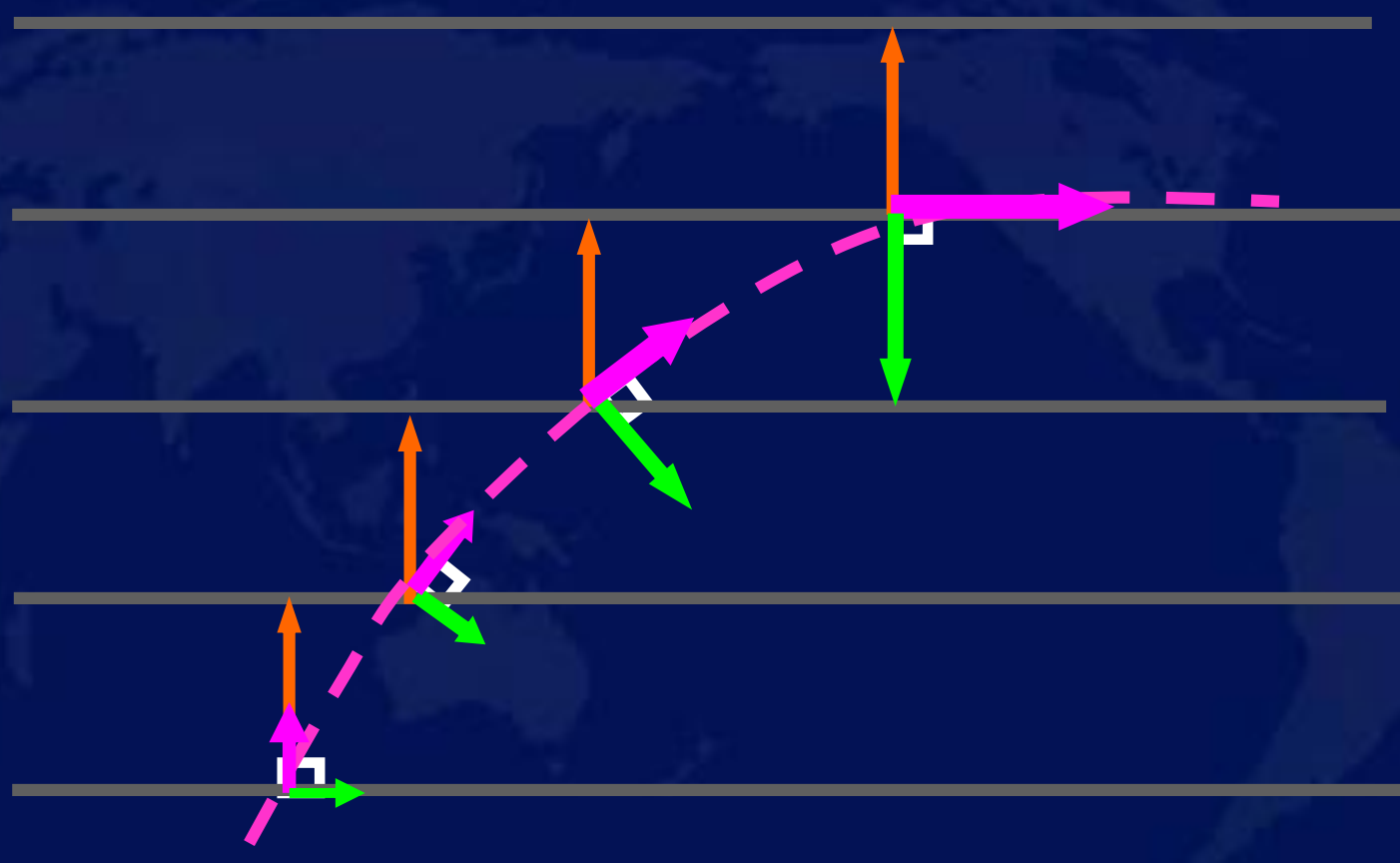
1006

1008

1010

- 气压梯度力
- 风向
- 地转偏向力

地转偏向力：方向始终与风向垂直
只改变风向，不影响风速



一、地转风

概念——在气压梯度力和地转偏向力二个力相平衡时空气作匀速直线运动

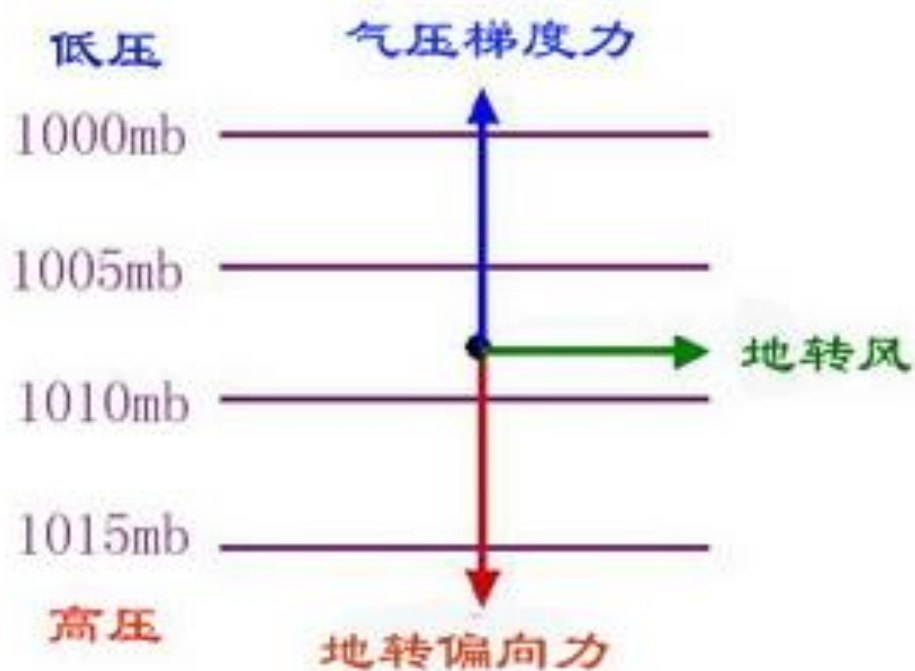
平衡关系:

$$\vec{G} = \vec{D}$$

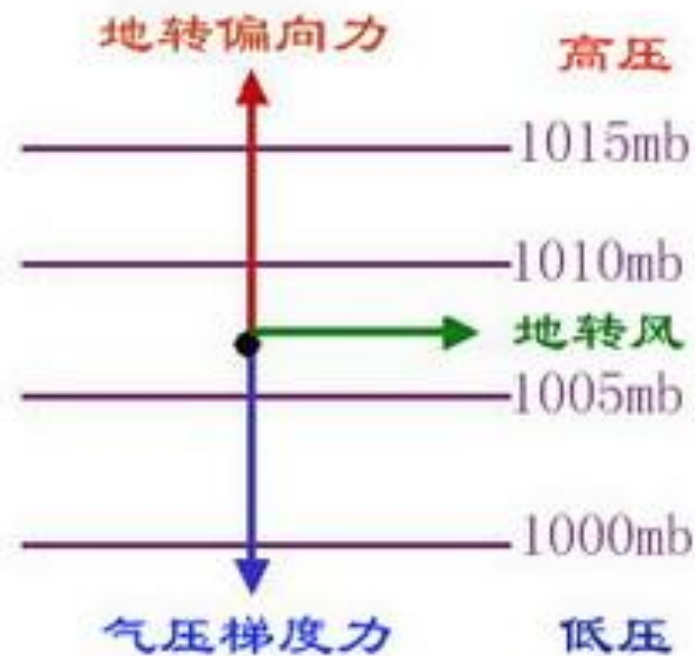
关系式: $V_g = [1 / (-2\omega \sin\phi)] (\Delta p / \Delta n)$

意义:

- 当密度和纬度一定时，**风速与气压梯度成正比**，等压线愈密，风速愈大
- 当水平气压梯度力和纬度一定时，**风速与空气密度成反比**，高空密度小，风速大
- 当水平气压梯度力和空气密度一定时，**风速与纬度成反比**，纬度愈高，风速愈小。



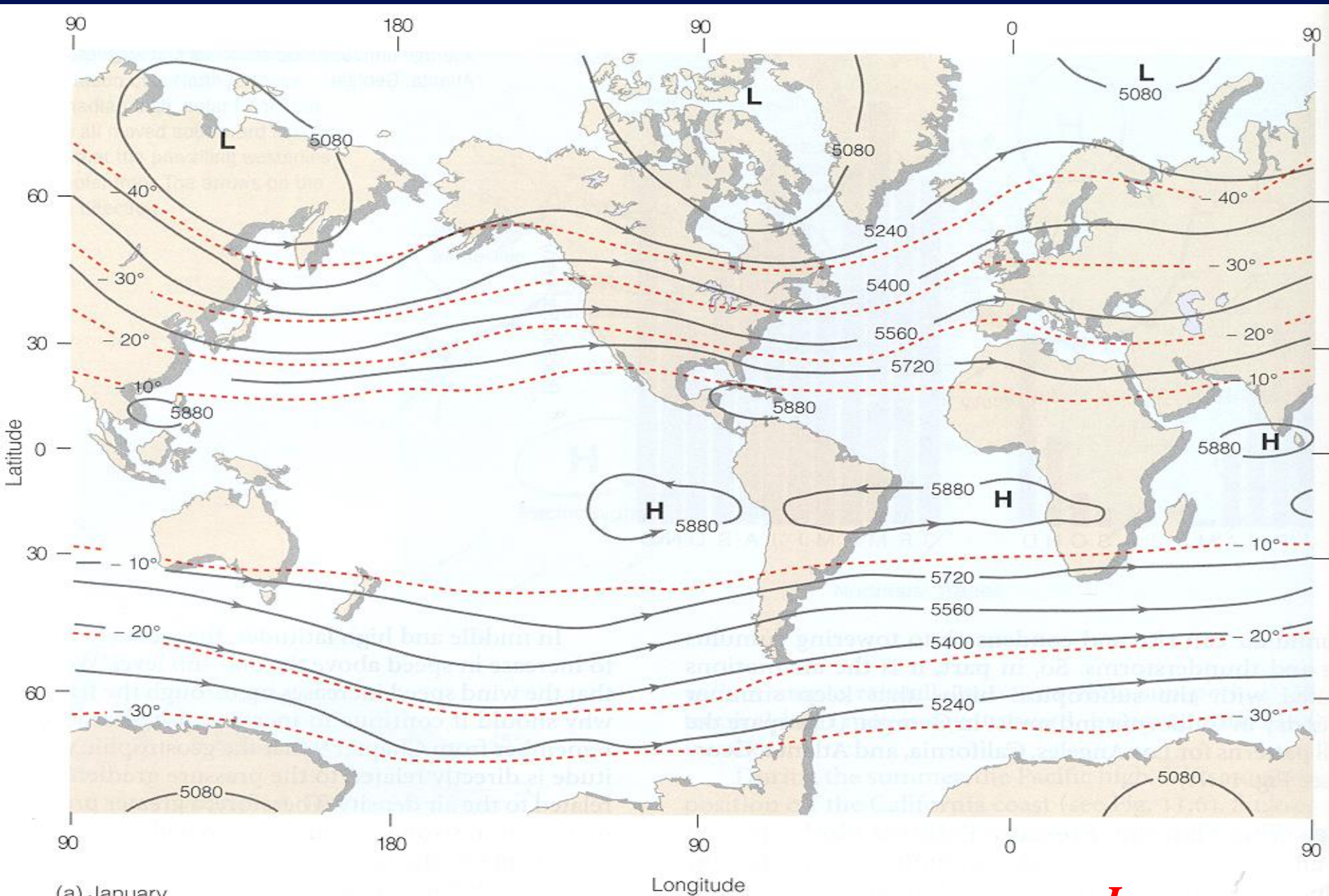
北半球



南半球

• 白贝罗风压定律

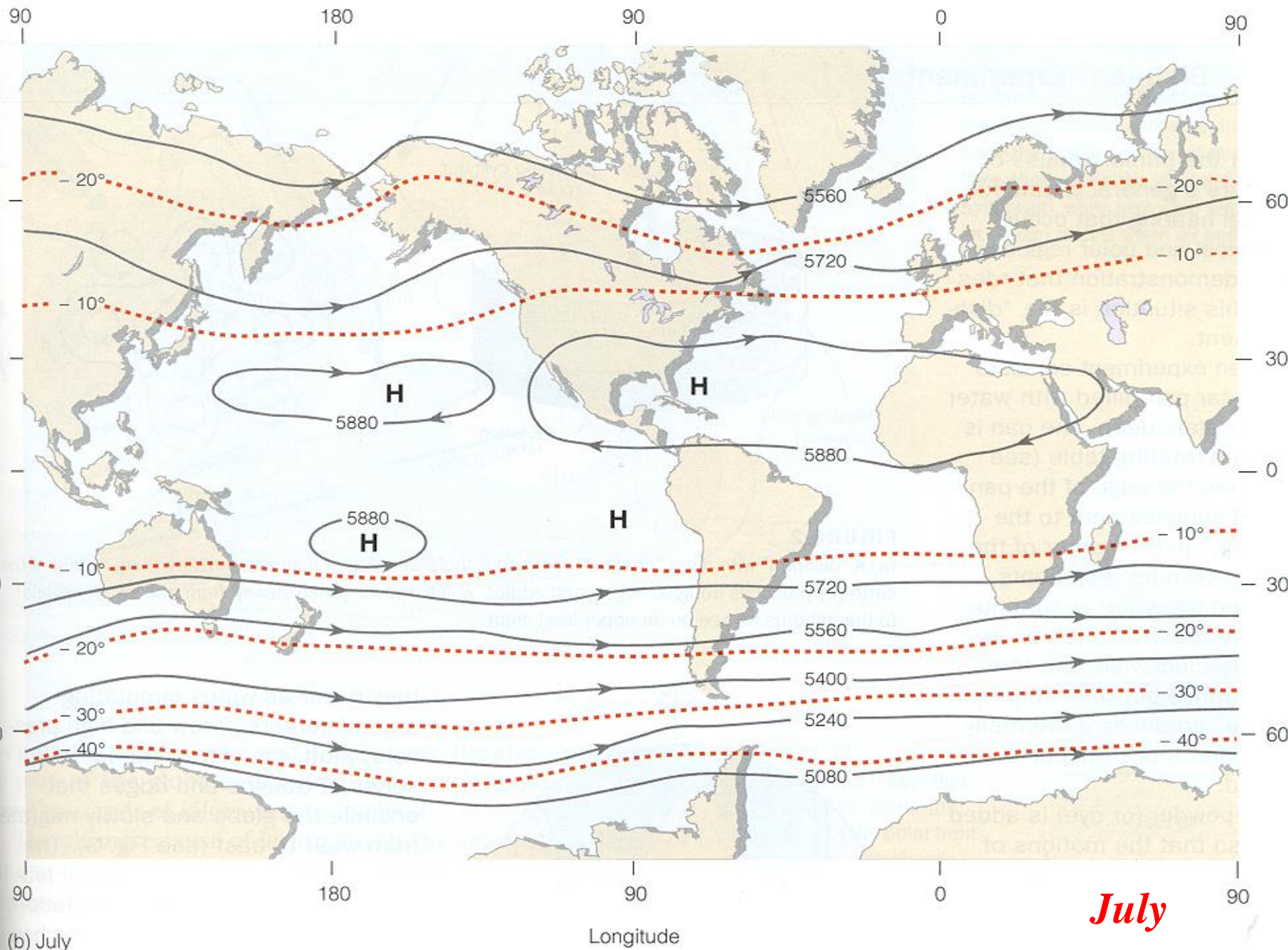
在北半球,背风而立,高压在右、 低压在左,南半球相反。



January

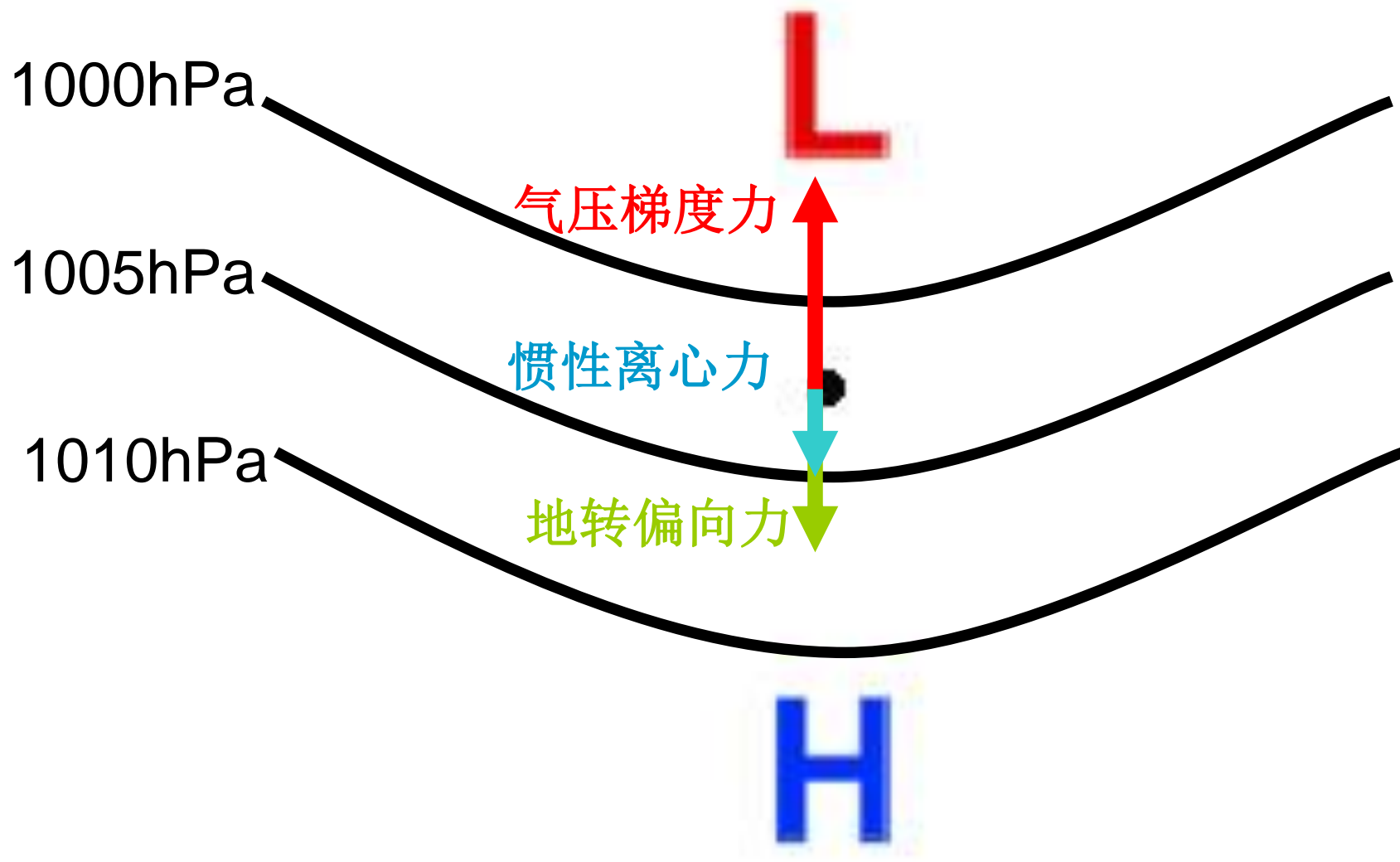
FIGURE 11.8

Average 500-mb chart for the month of January (a) and for July (b). Solid lines are contour lines in meters above sea level. Dashed lines are isotherms in °C. Arrowheads illustrate wind direction.



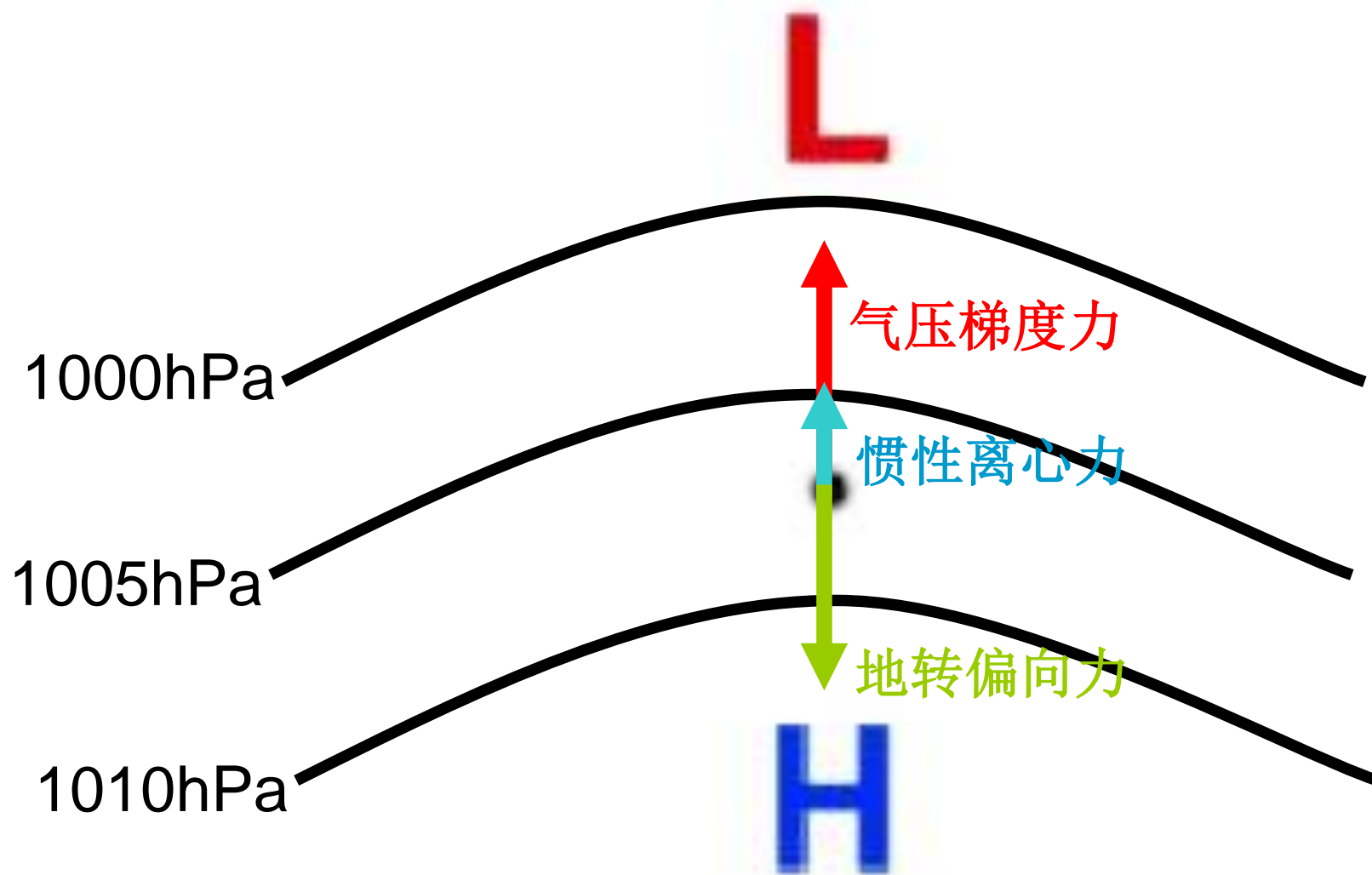
低压

$$\vec{G} = \vec{D} + \vec{C}$$



高压

$$\vec{G} + \vec{C} = \vec{D}$$



二、梯度风

概念—在气压梯度力与地转偏向力和惯性离心力相平衡时空气做匀速圆周运动

平衡关系: 低压

$$\vec{G} = \vec{D} + \vec{C}$$

高压

$$\vec{G} + \vec{C} = \vec{D}$$

低压

$$V_c = -r\omega \sin \phi + \sqrt{(r\omega \sin \phi)^2 - \frac{r}{\rho} \frac{\Delta p}{\Delta n}}$$

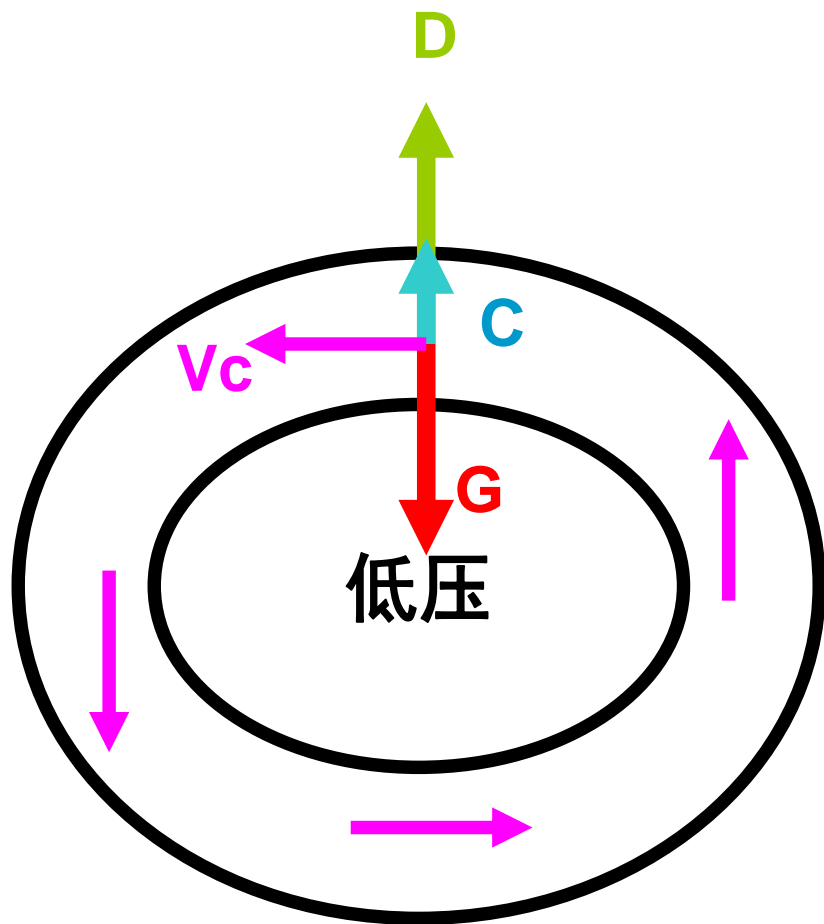
高压

$$V_{ac} = r\omega \sin \phi - \sqrt{(r\omega \sin \phi)^2 + \frac{r}{\rho} \frac{\Delta p}{\Delta n}}$$

梯度风的特性：

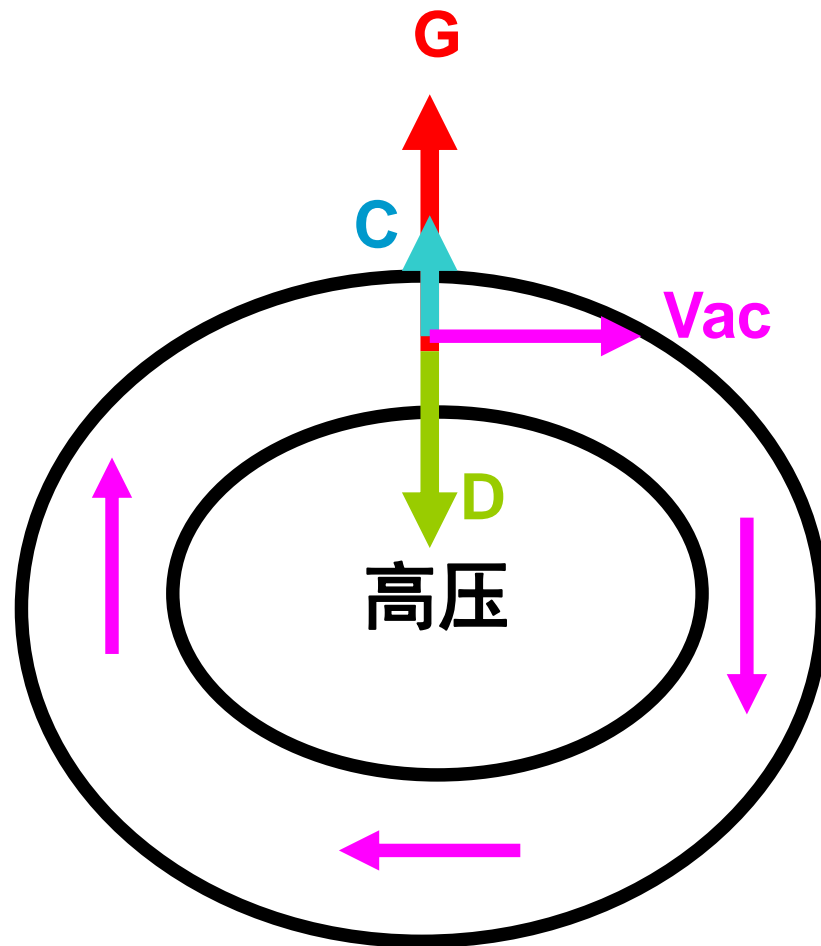
①空气运动的速度受水平气压梯度、纬度和曲率半径的影响

②当气压梯度和纬度在同一气压场中时，
 $V_{ac} > V_g > V_c$




- 北半球低压中的梯度风沿等压线的切线方向，逆时针方向吹

• 北半球高压中的
梯度风沿等压线的切
线方向，**顺时针方向**
吹。南半球相反。





三、摩擦层中的风



摩擦力:两个相互接触的物体作相对运动时,接触面之间所产生的一种阻碍物体运动的力

北半球近地面的风向

(hPa)

1002

1004

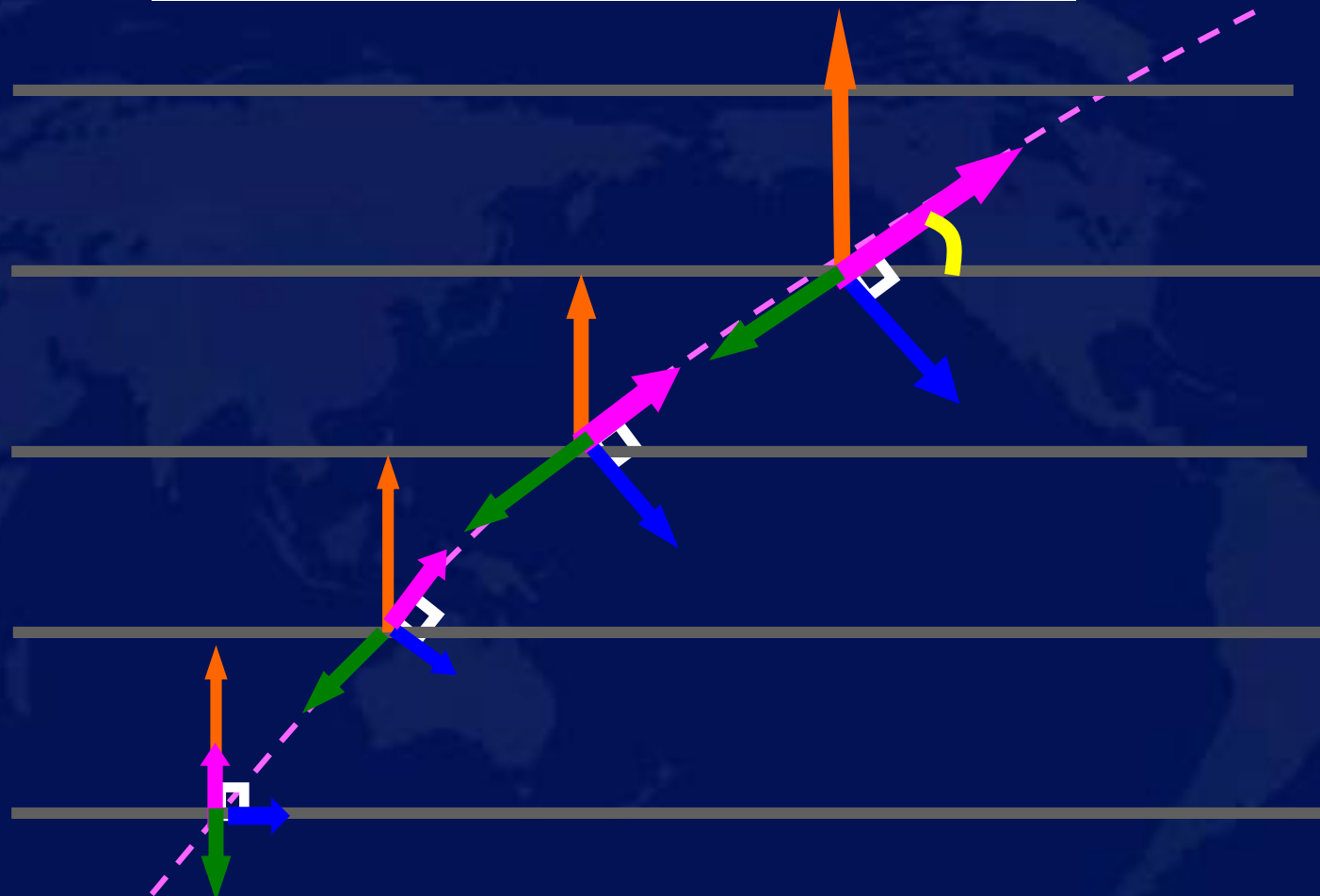
1006

1008

1010

- 气压梯度力
- 地转偏向力
- 摩擦力
- 风向

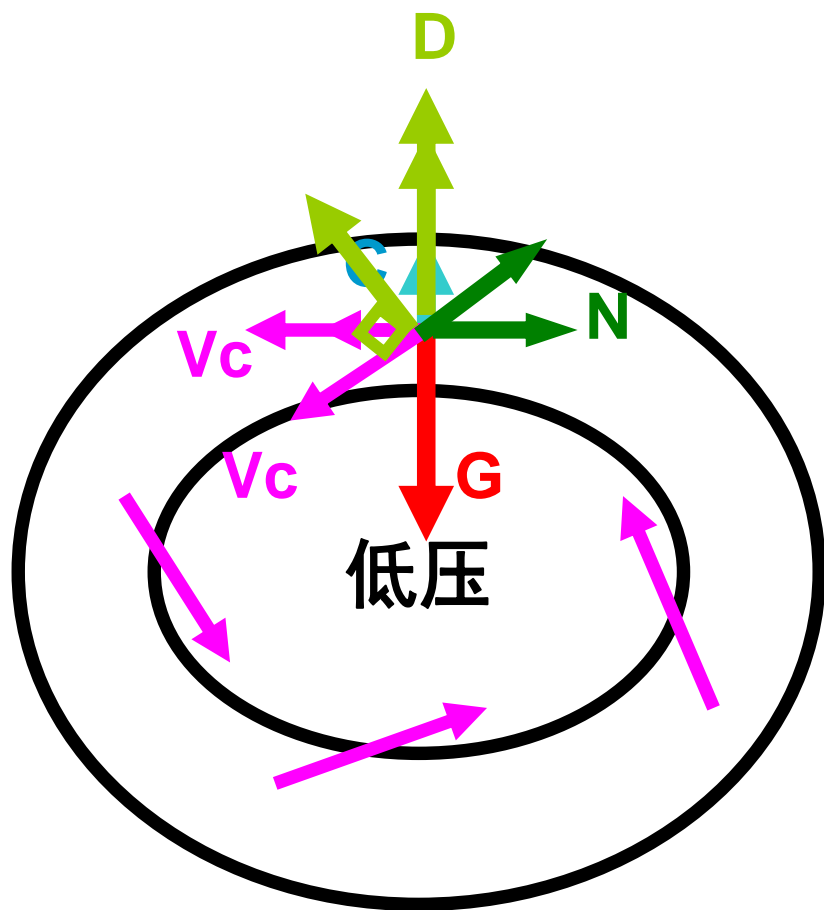
摩擦力：方向与风向相反



平直等压线气压场:

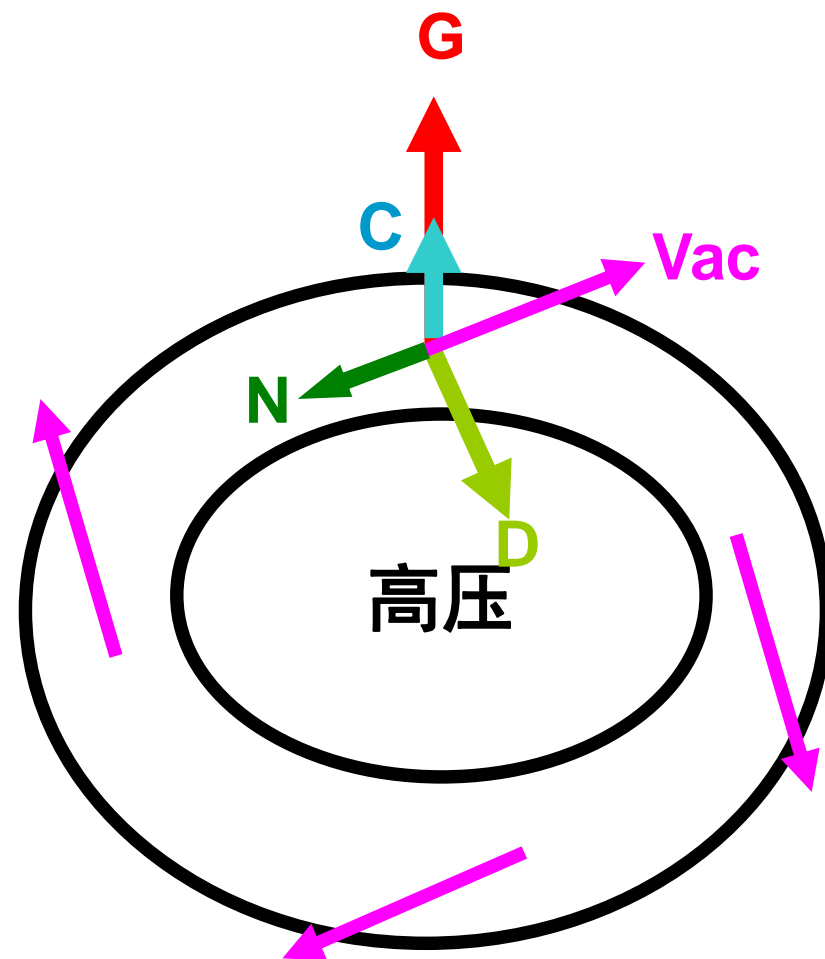
(1) 风不能平行等压线吹，而是**斜穿等压线**，风与等压线之间出现一定交角，**由高压指向低压**

(2) 摩擦力愈大，风与等压线的**交角**就愈大，**风速**就愈小。

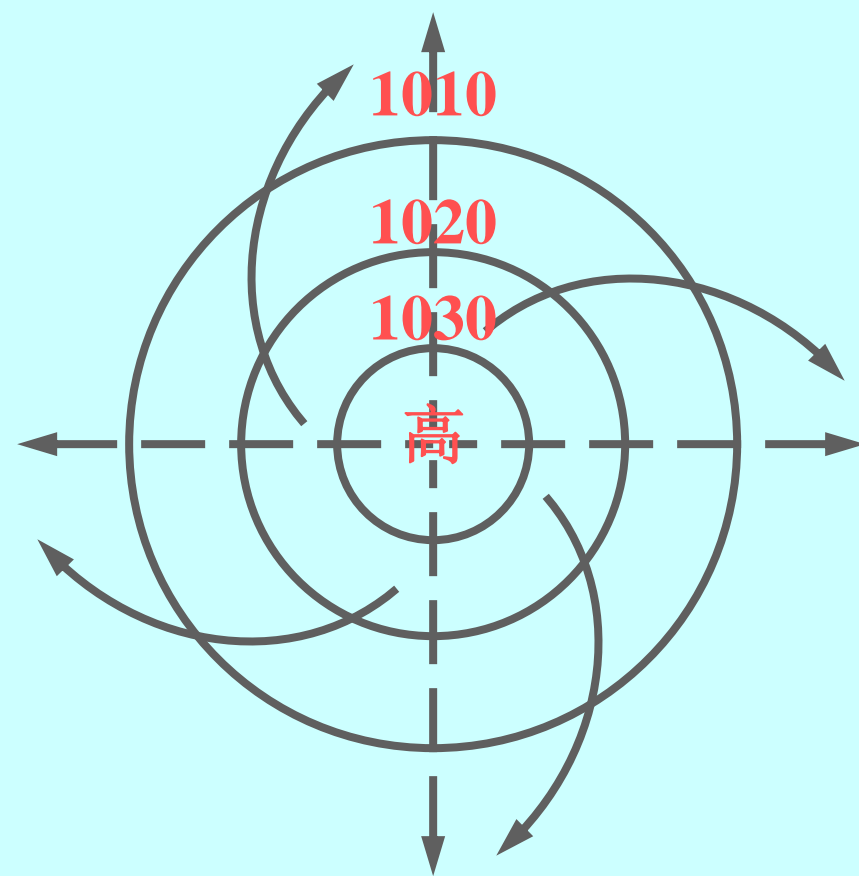
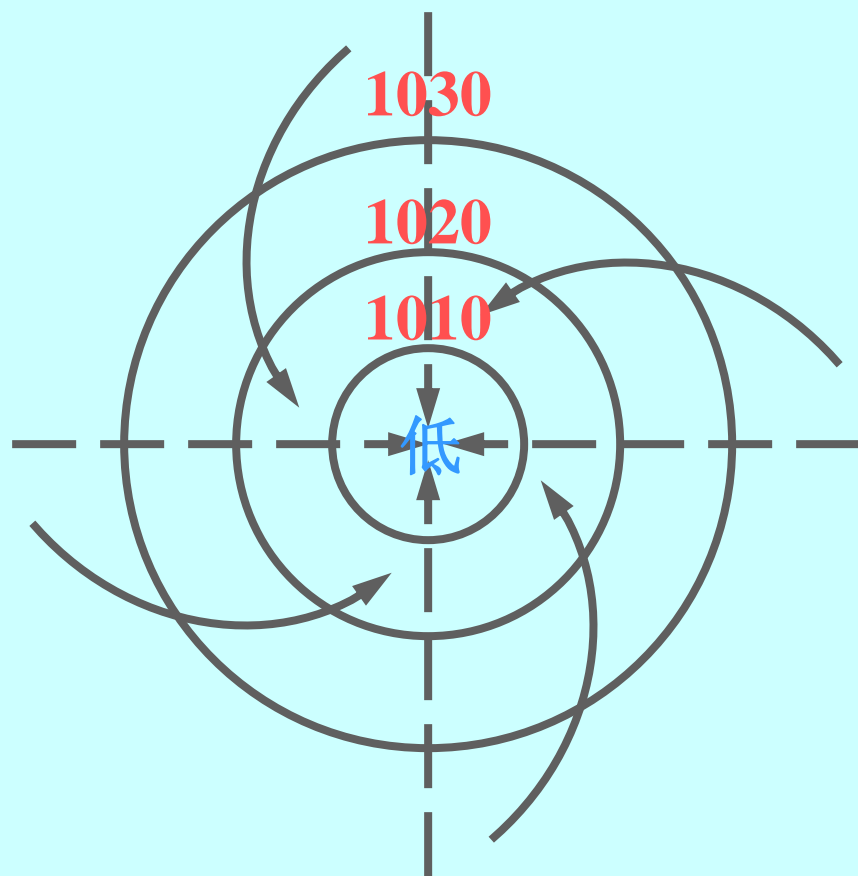


风斜穿等压线，由高压指向低压

风斜穿等压线，由高压指向
低压



北半球近地面两种气压状况下的大气运动情形



水平气压梯度力



实际风向

**例：中纬度陆上交角 $25-35^{\circ}$
中纬度海上交角 $10-20^{\circ}$**

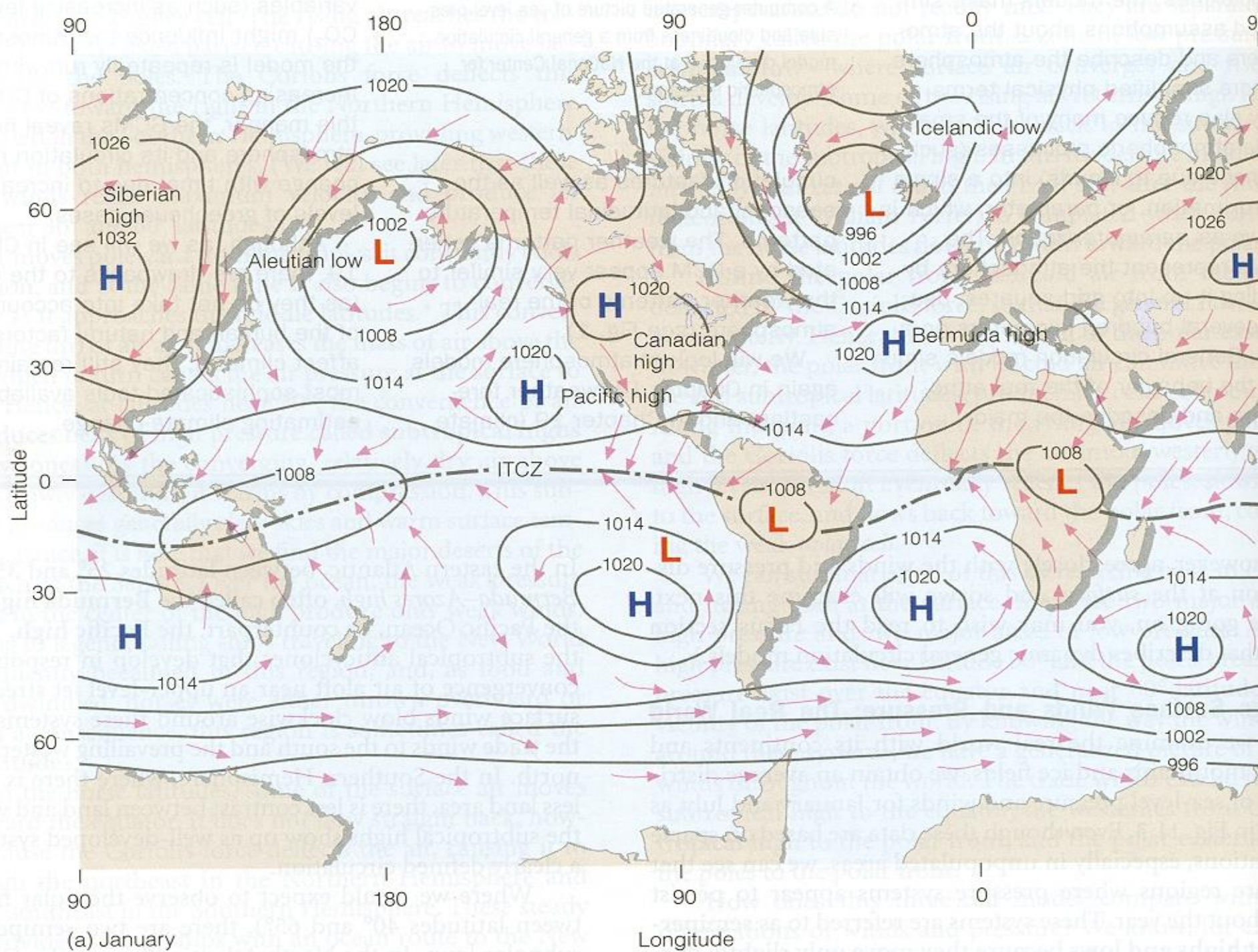
• 同气压影响下的不同区域，风向完全不一致（见前图）。

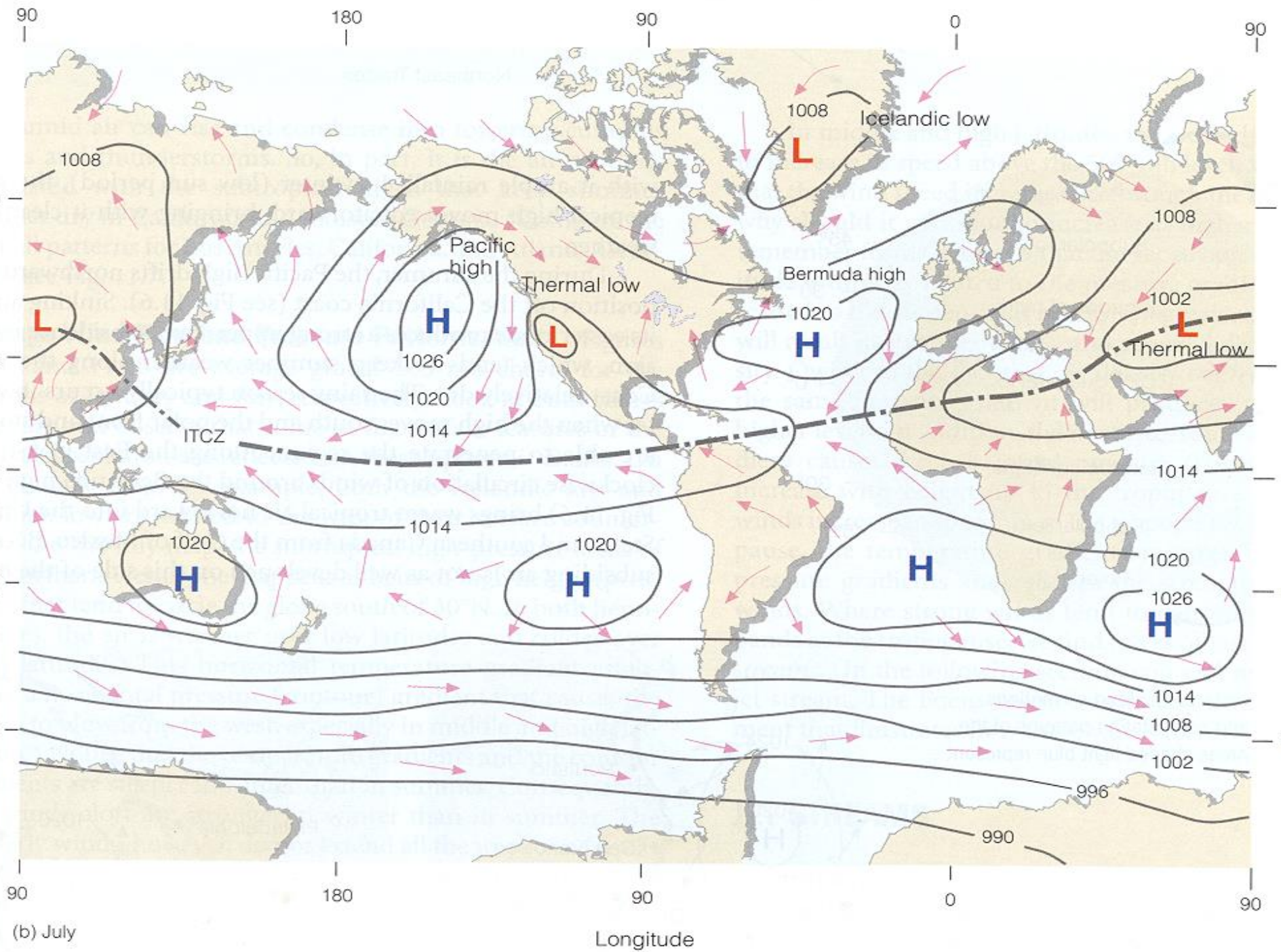
例：冬季我国大多数地区处于高压南部，吹NE，WN等方向偏北风（高纬度吹来，风较干冷）；

夏季又常位于低压北部，吹SE、SW等方向偏南风（低纬吹来，风较暖湿，并可能产生降水）。

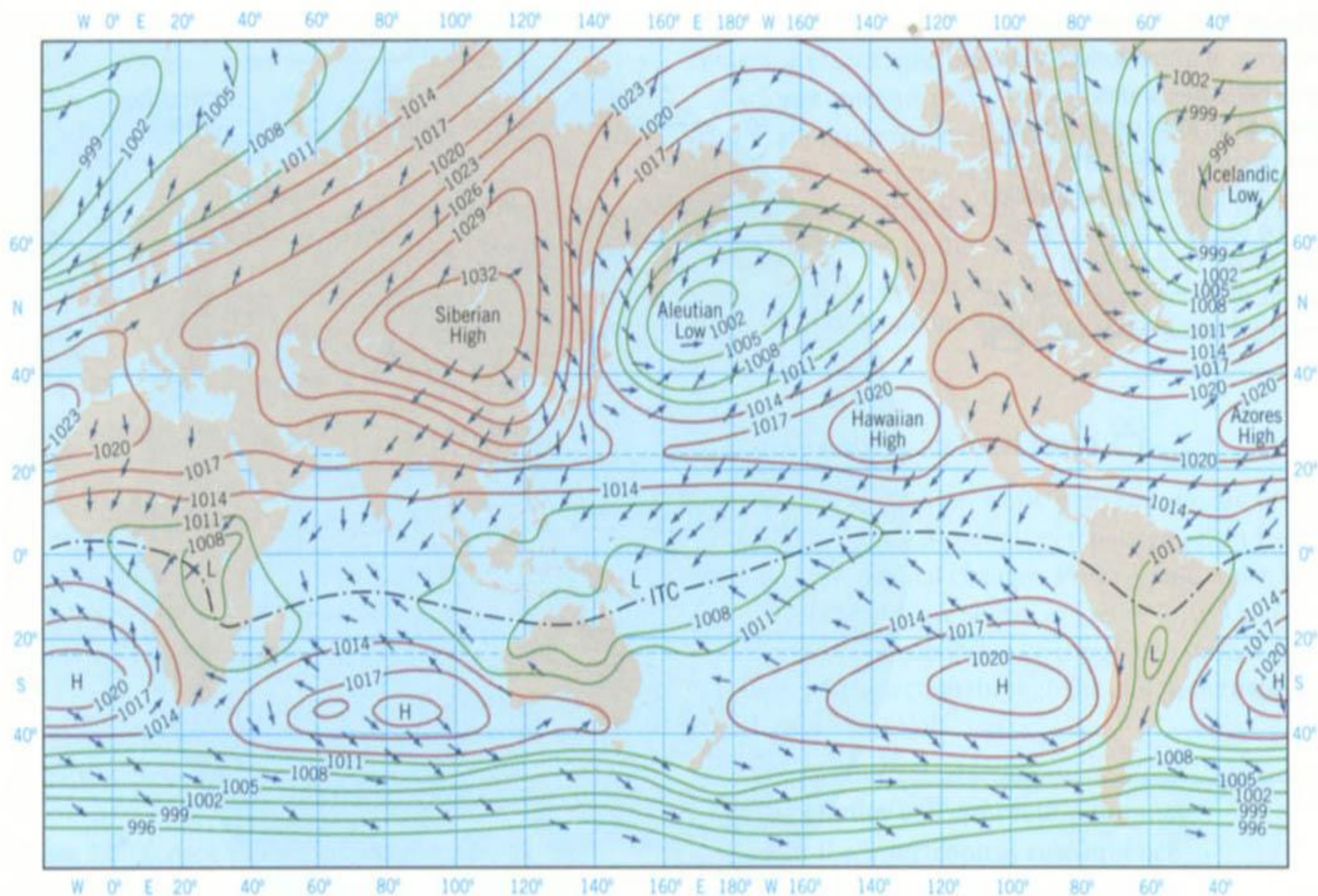
A faint, light blue world map is visible in the background of the slide, centered on the Atlantic Ocean.

四、与观测结果的对比

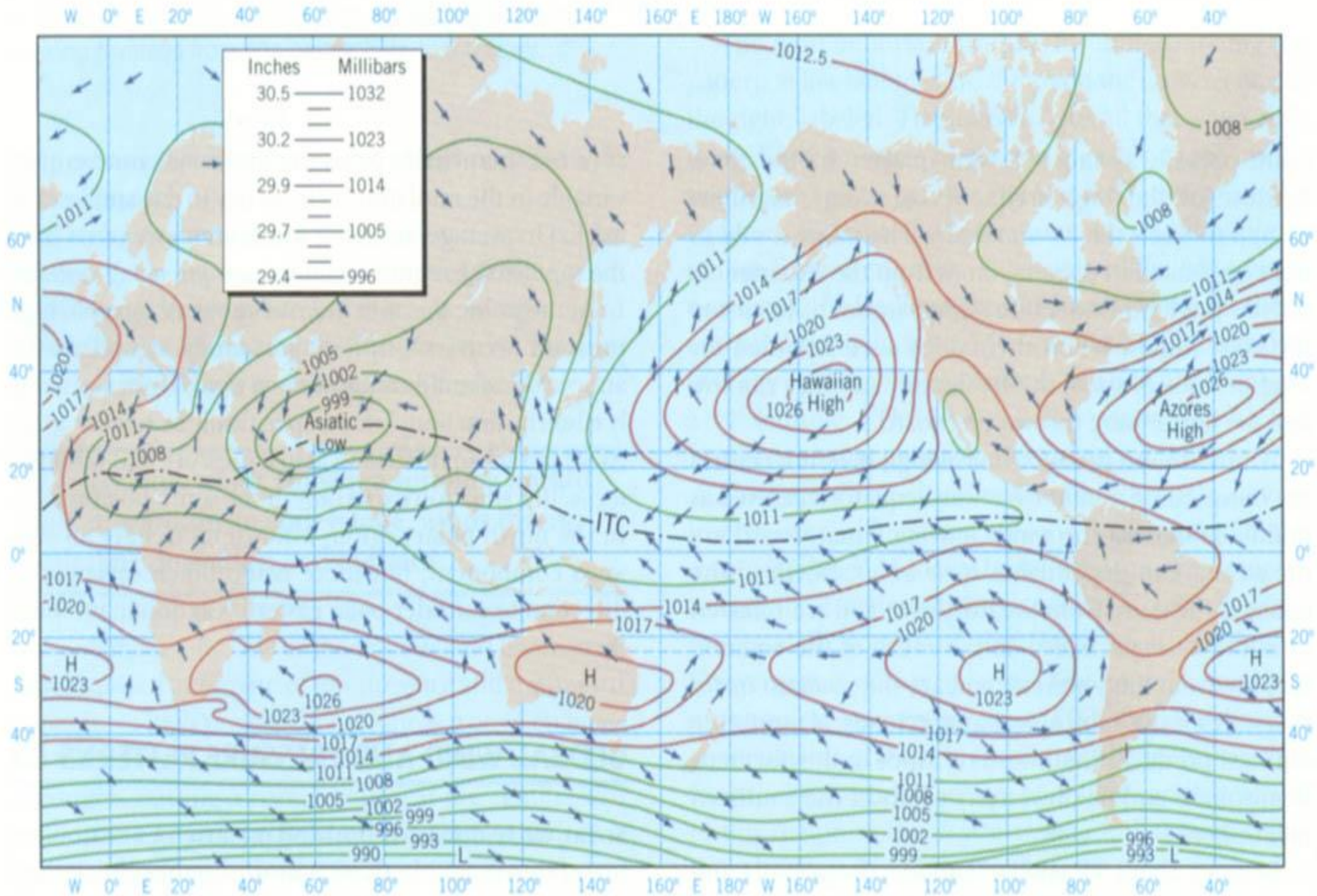




全球1月份海平面平均气压图



全球 7月海平面平均气压图



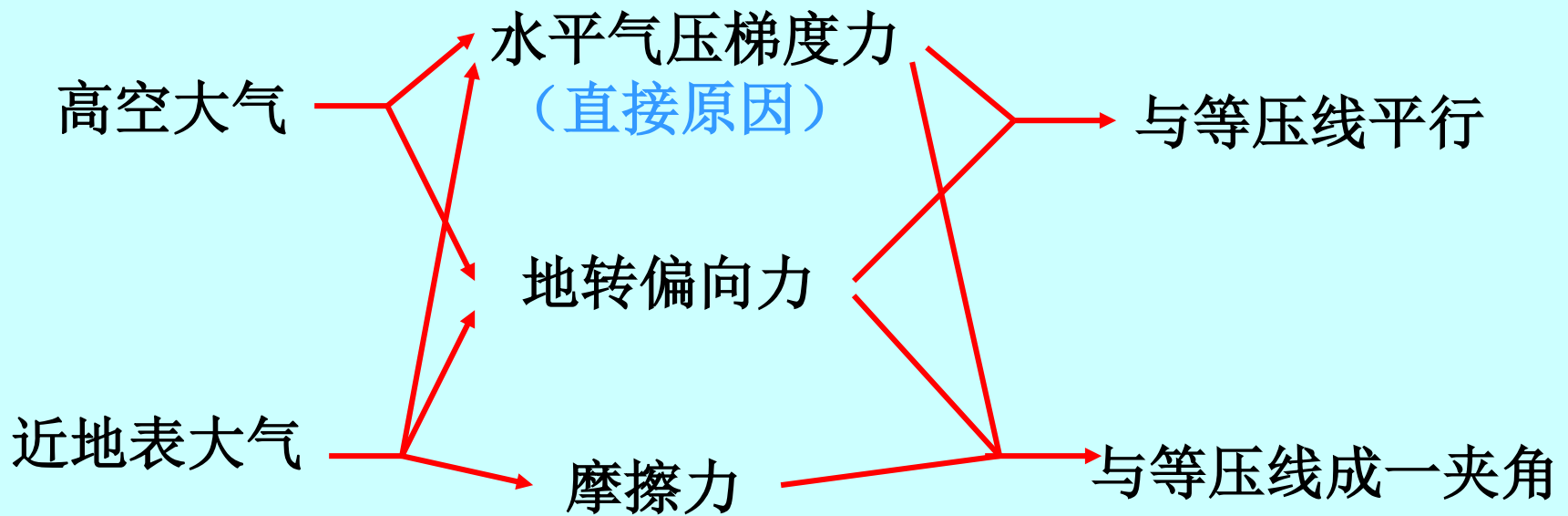
小结

	风类	气压梯度力	地转偏向力	惯性离心力	摩擦力	风向
自由大气层	地转风	✓	✓			平行于等压线
	梯度风	✓	✓	✓		沿等压线切向方向
摩擦层	地转风	✓	✓		✓	穿越等压线，由高压向低压一侧运动
	梯度风	✓	✓	✓	✓	

三力作用下的风向小结

大气受力分析

风向与等压线关系



第三章 大气的运动

- 作用于空气的力
- 大气运动方程
- 大气中风的形成
- 连续性方程









Photo By Mimi with Sony V60

一、个别变化、局地变化、空间变化

- **个别变化** (d/dt) ----空气块在运动过程中, 其本身的气象要素随时间的变化
- **局地变化** ($\partial/\partial t$) ----由于大气运动或其他原因,使得某一固定地点的气象要素值发生变化
- **空间变化** ($\partial/\partial x$ 、 $\partial/\partial y$ 、 $\partial/\partial z$)

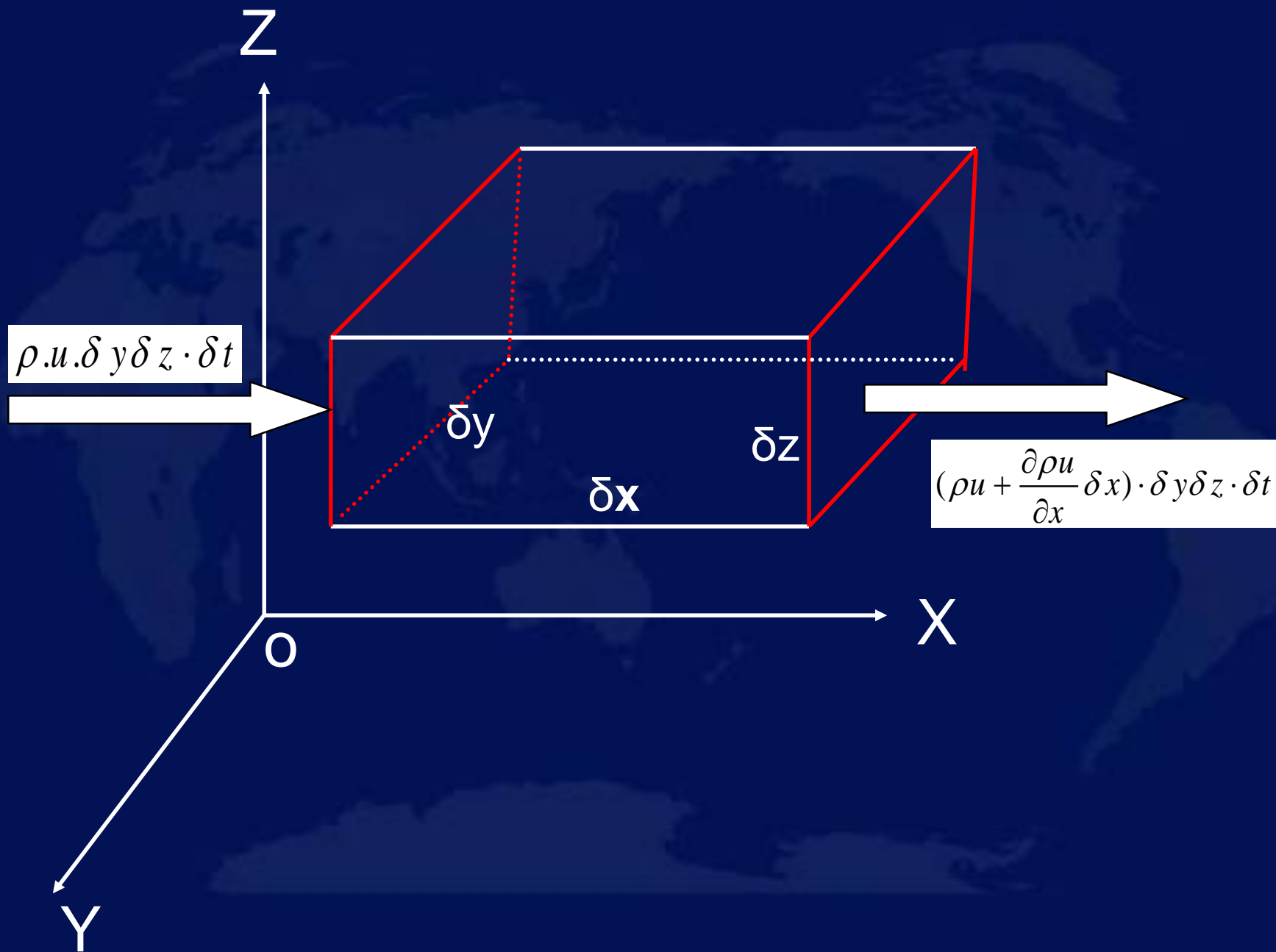
结 论:

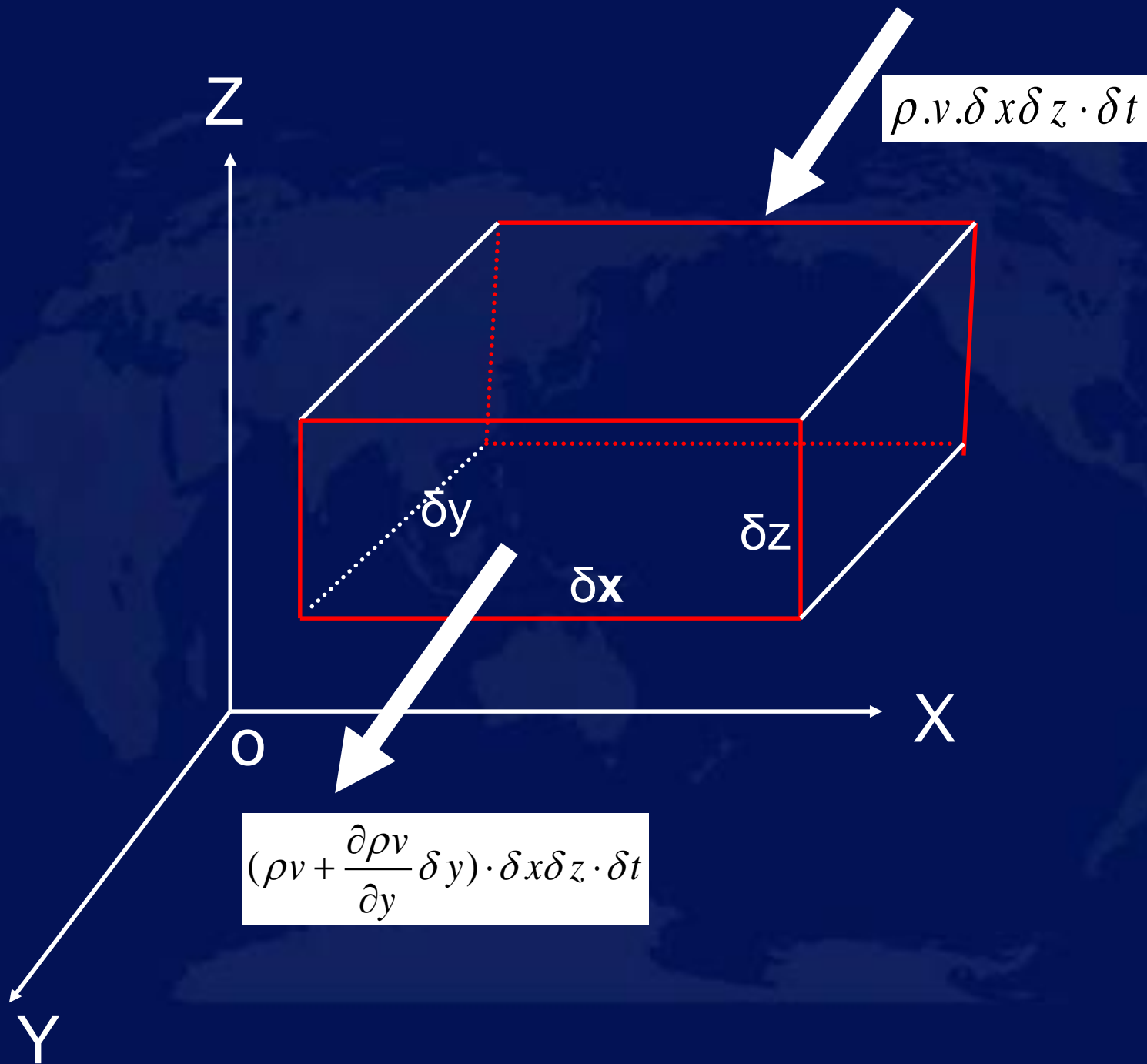
$$\frac{dF}{dt} = \frac{\partial F}{\partial t} + u \frac{\partial F}{\partial x} + v \frac{\partial F}{\partial y} + w \frac{\partial F}{\partial z}$$

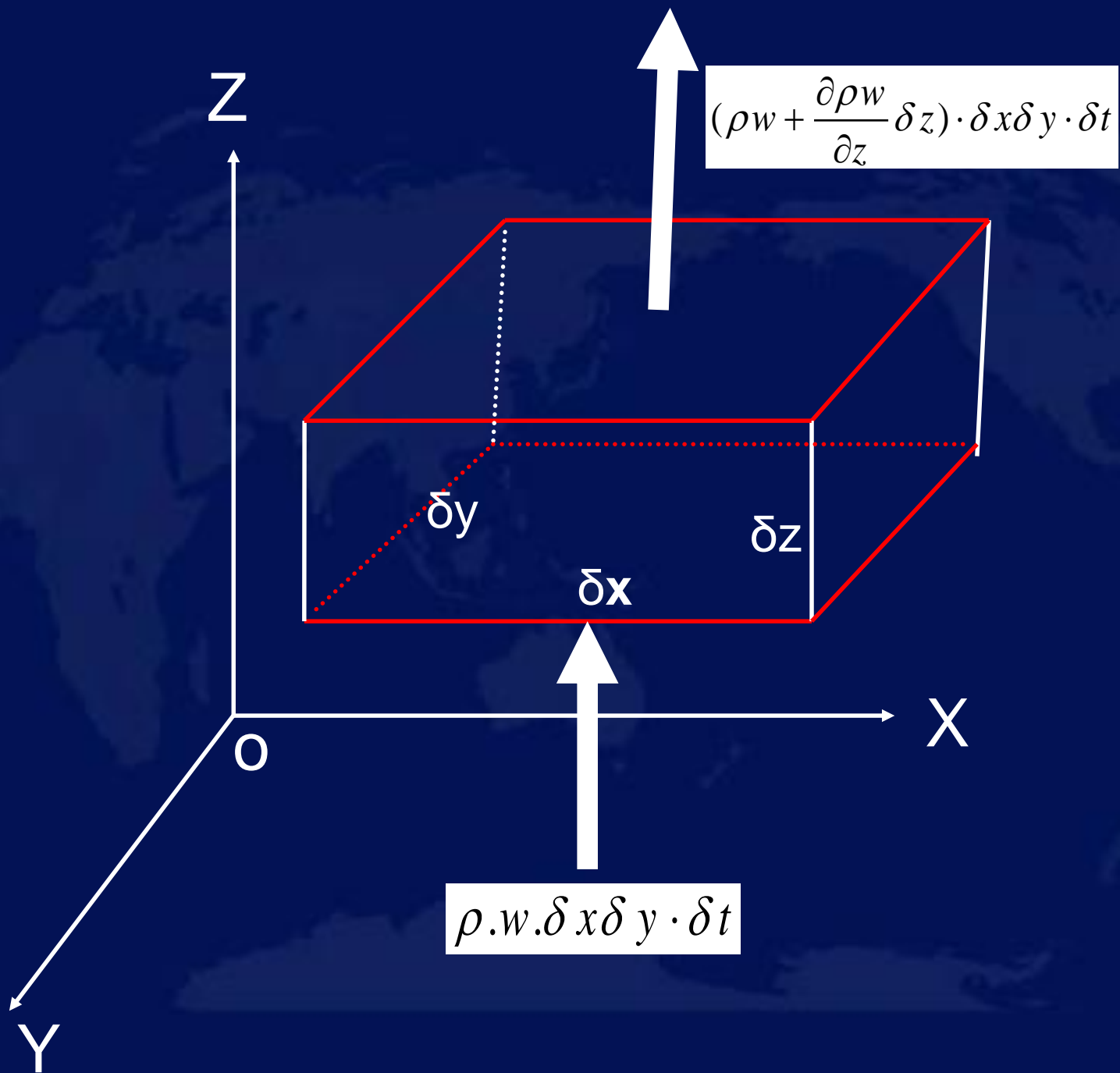
空气微团各要素的个别变化等于局地变化以及各坐标轴上空间变化与相应的速度分量的乘积之和

二、连续方程

质量守恒定律：空气块在运动过程中，尽管体积和形状发生了变化，但其所含质量应保持不变







连续方程

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \cdot \nabla \cdot \vec{V} = 0$$

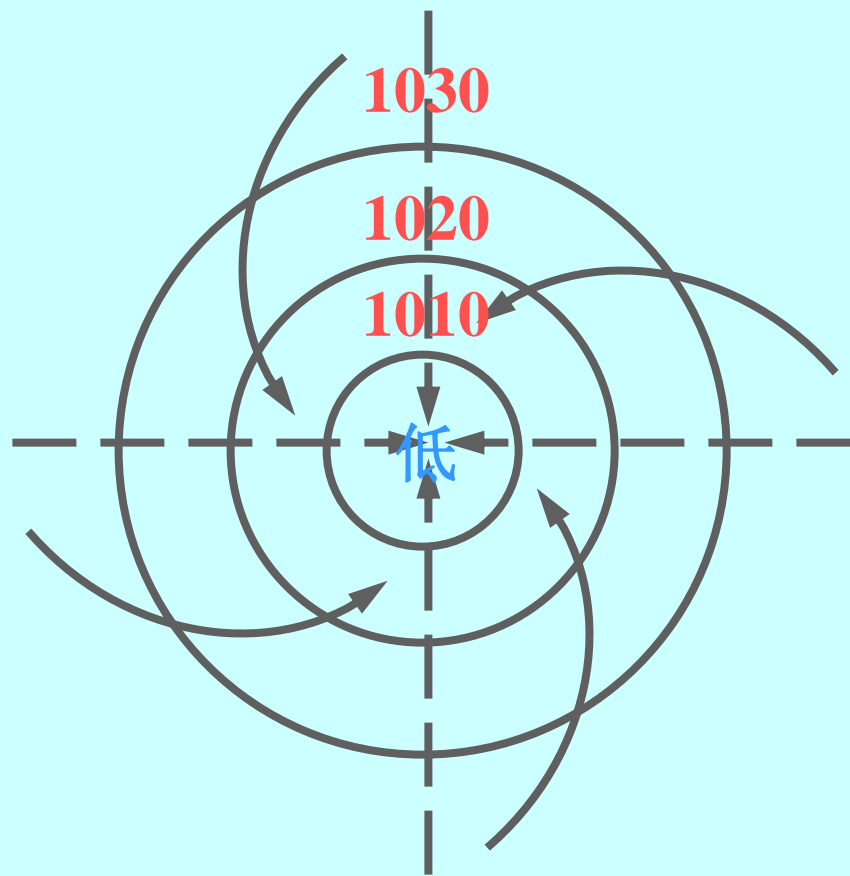
$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

三、应用

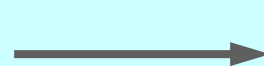
水平运动与垂直运动的联系

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{\partial w}{\partial z}$$

气旋



水平气压梯度力



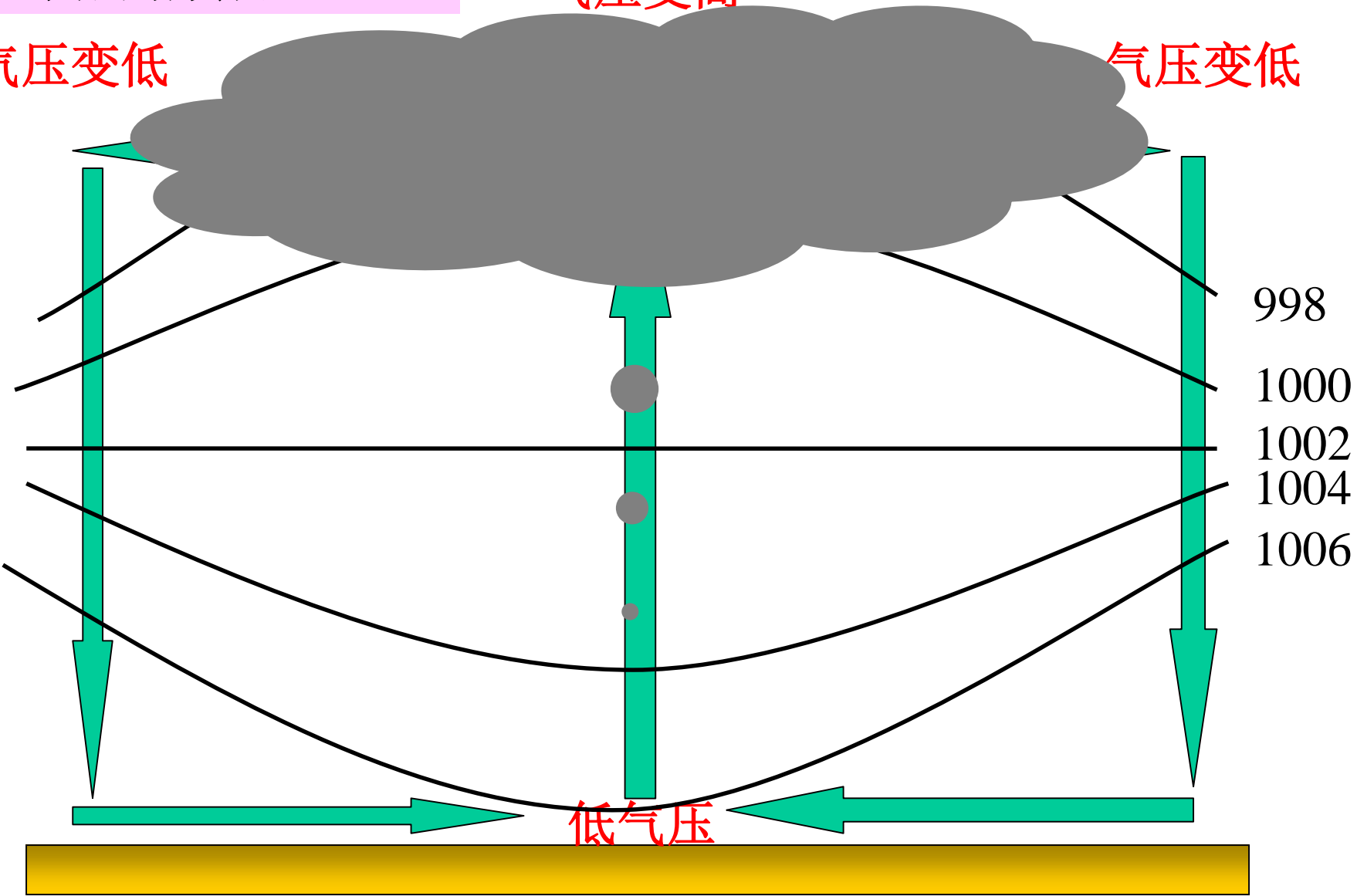
实际风向

低压环流的形成

气压变高

气压变低

气压变低



气压变高

气压变高

气旋

辐合



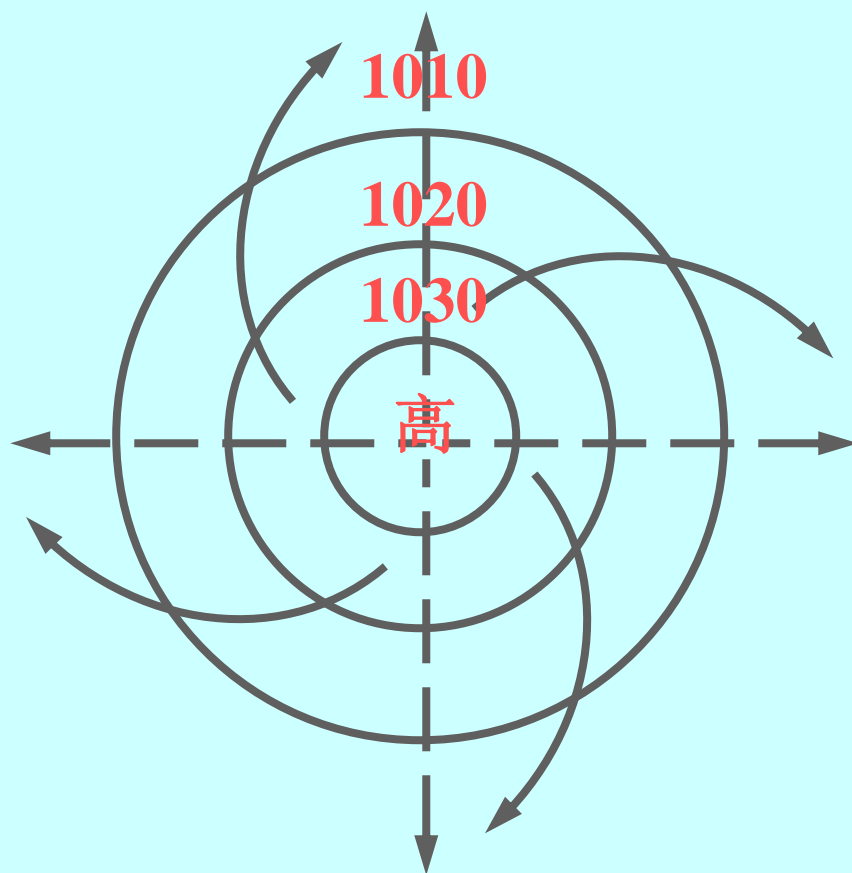
对流层顶

近地面





反气旋

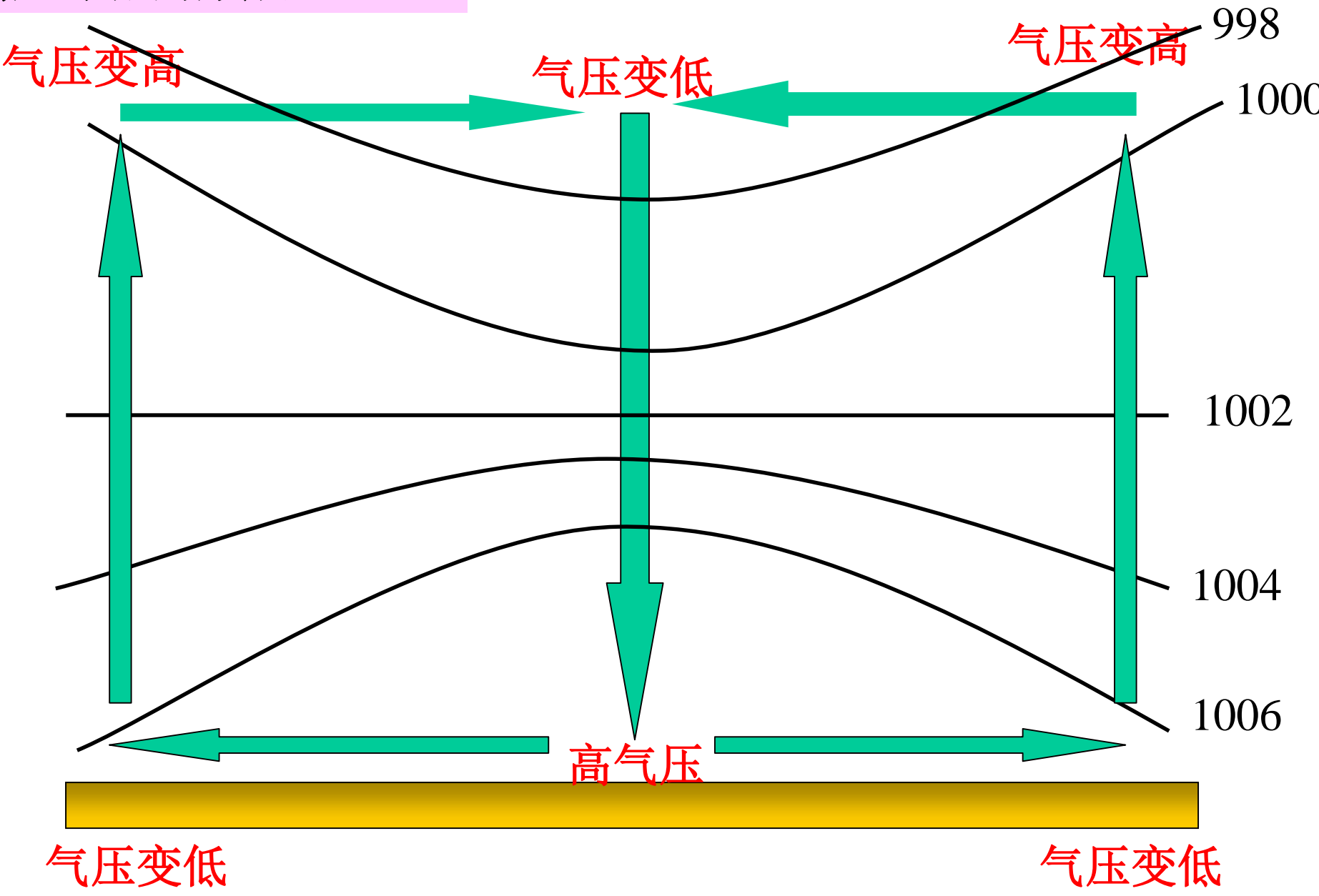


水平气压梯度力



实际风向

高压环流的形成



反气旋

辐散



对流层顶

近地面



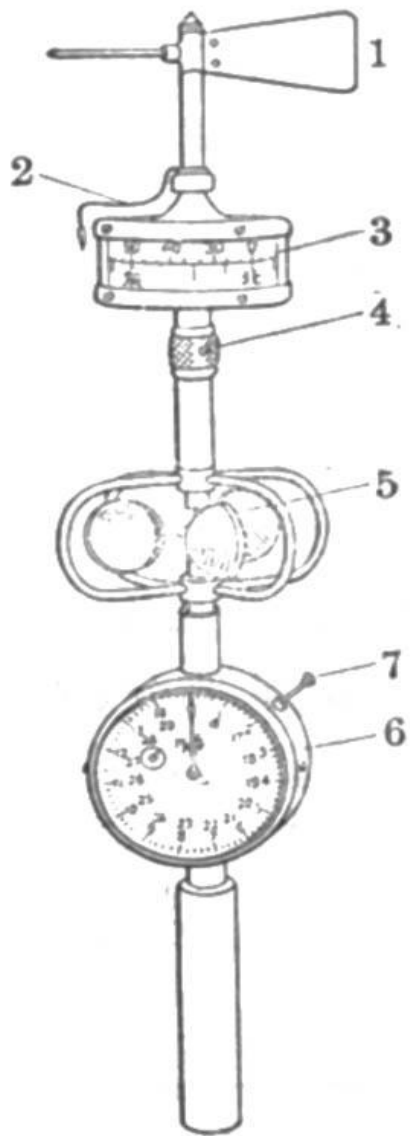


Photo By Mimi with Sony V60

三、应用

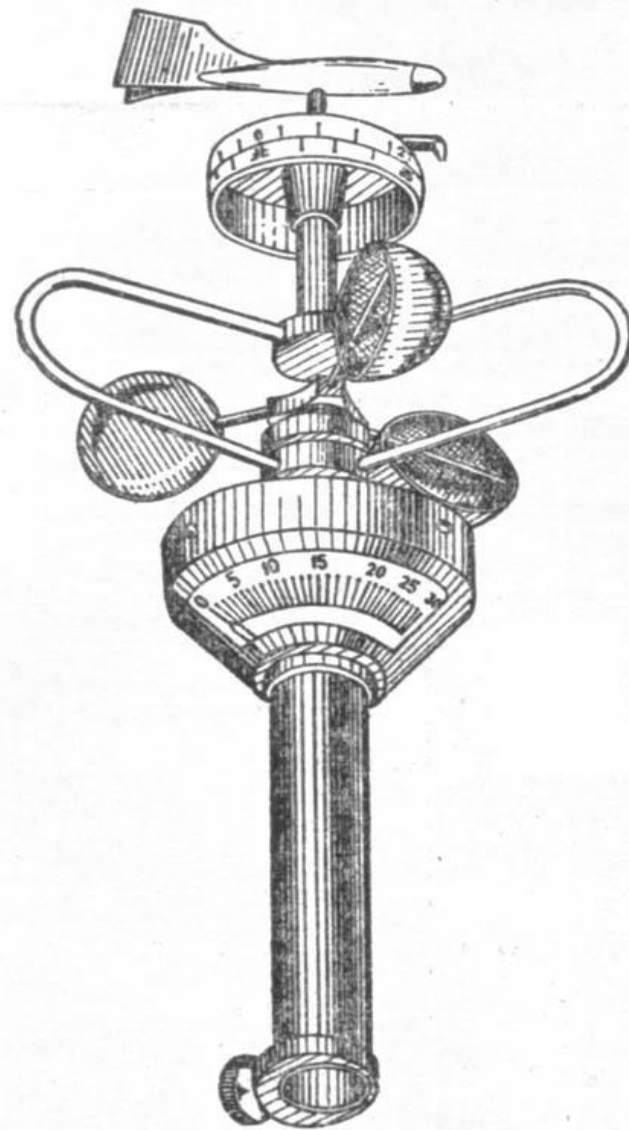
计算垂直风速

轻便风向风速表



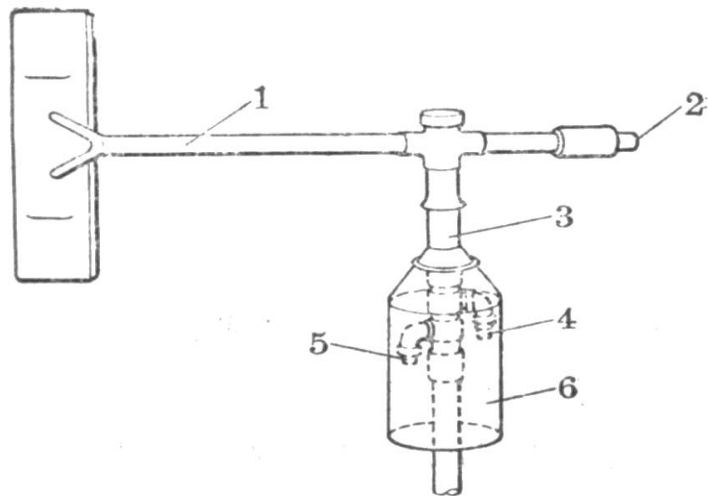
1. 风向标
2. 风向指针
3. 方向盘
4. 制动小套
5. 风杯
6. 风速表刻度
7. 风速按钮

三杯轻便风向风速表



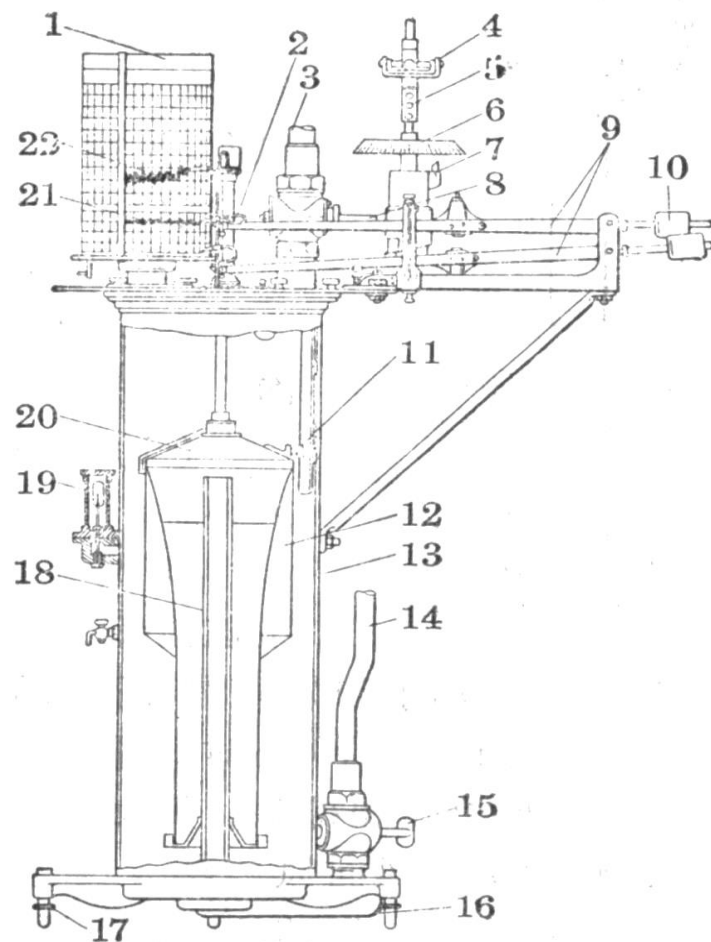
电感式轻便测风仪

达因式风向风速计



达因式风向风速计感应部分

1. 风标 2. 压力管口 3. 吸气孔 4. 吸气管
5. 压力管 6. 防雨罩



达因式风向风速计记录部分

1. 自记钟 2. 风速自记笔 3. 吸气管 4. 活动挂钩
5. 风标方向连杆 6. 方位盘 7. 离合器 8. 吸气管
开关 9. 风向自记笔杆 10. 平衡锤 11. 浮子导引
滚轮 13. 浮筒 13. 水筒 14. 压力管 15. 压力管
开关 16. 排水塞子 17. 调整水平螺旋 18. 内压力管
19. 水位指示器 20. 浮子 21. 风向记录 22. 风速记录

垂直速度w计算公式

$$-\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}\right) = \frac{\partial w}{\partial z}$$

$$w(h) = w(0) - \int_0^h \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}\right) dz$$

四、小 结

- 1、个别变化、局地变化与空间变化的关系
- 2、连续性方程
- 3、应用



谢谢！