

气象学与气候学

第四章 大气运动与大气环流



授课老师：杨静 教授

13426150125

yangjing@bnu.edu.cn

京师科技大厦B901

第四章 大气运动和大气环流

4.2 大气的受力和运动：自由大气中的空气水平运动

□地转风：直线运动的理想平衡态

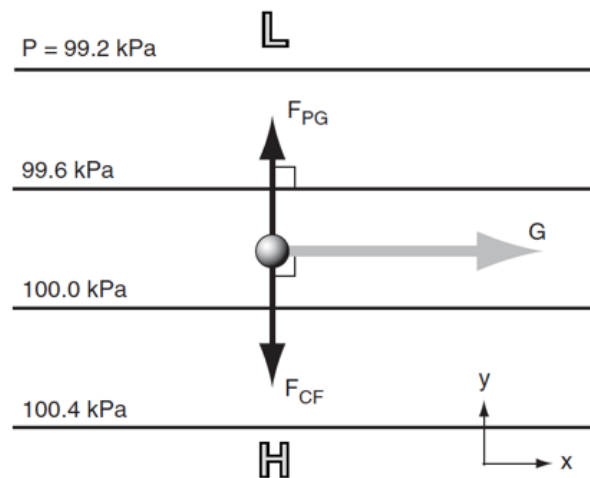
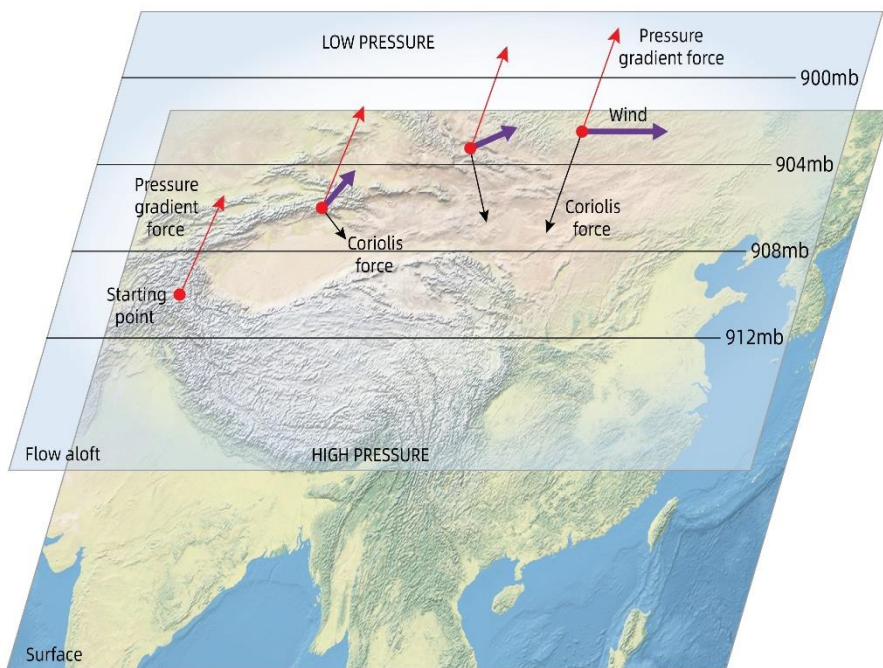
□梯度风：曲线运动的理想平衡态（特：旋横风）

第四章 大气运动和大气环流

4.2 大气的受力和运动：自由大气中的空气水平运动

□地转风 geostrophic wind

地转风的形成过程和平衡态



第四章 大气运动和大气环流

4.2 大气的受力和运动：自由大气中的空气水平运动

□地转风

- 定义：气压梯度力和地转偏向力相平衡时，空气作等速、直线的水平运动

$$f_G = f_C$$

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\Delta P}{\Delta n} = 2 V_g \omega \sin \varphi$$

第四章 大气运动和大气环流

4.2 大气的受力和运动：自由大气中的空气水平运动

□地转风

地转风的大小可以表示为：

$$V_g = - \frac{1}{2\rho \omega \sin \varphi} \frac{\Delta P}{\Delta n}$$

第四章 大气运动和大气环流

4.2 大气的受力和运动：自由大气中的空气水平运动

□地转风

在实际应用中，等压面上的地转风可表示为：

$$V_g = - \frac{9.8}{2 \omega \sin \varphi} \frac{\Delta H}{\Delta n}$$

$$V_g = -\frac{9.8}{2\omega \sin \varphi} \frac{\Delta H}{\Delta n}$$

##地转风是实际高空风的一种理想平衡状态，它提供了一种高效估算高空风的方法。

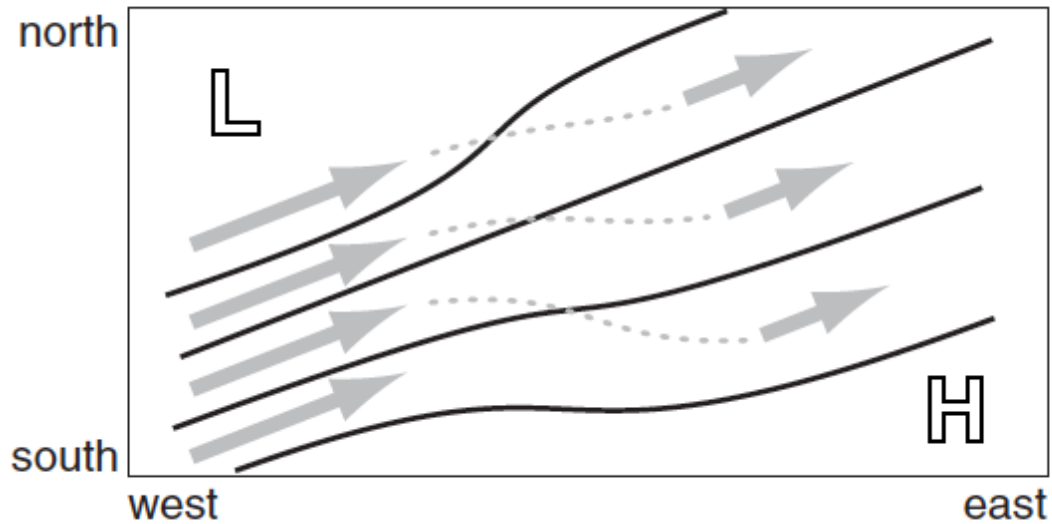
科学家可以通过高层大气的气压分布，比较等压面上**等高线的疏密程度**，可确定风速大小。

地转风在x-y平面上的表示:

$$u_g = -\frac{1}{f} \frac{\Delta\phi}{\Delta y}, \quad v_g = +\frac{1}{f} \frac{\Delta\phi}{\Delta x}$$

$$\Delta\phi = g \cdot \Delta z$$

$$V_g = -\frac{9.8}{2\omega \sin \varphi} \frac{\Delta H}{\Delta n}$$



第四章 大气运动和大气环流

4.2 大气的受力和运动：自由大气中的空气水平运动

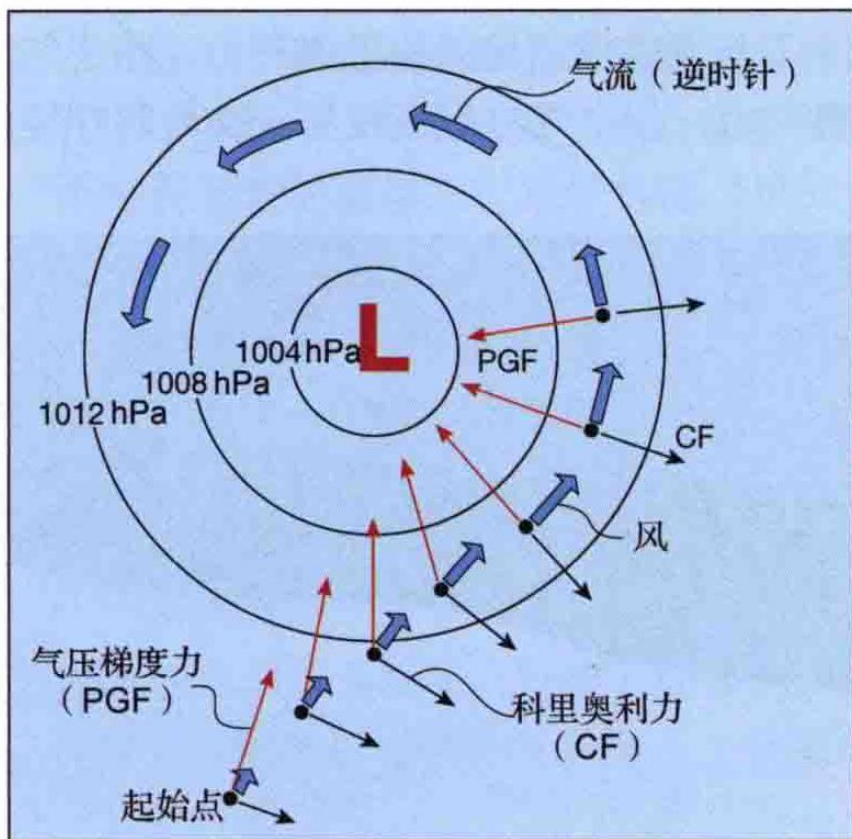
□ 梯度风

- 空气质点作曲线运动时，除受气压梯度力和地转偏向力外，还受惯性离心力的作用，三力达到平衡时的风为“梯度风”。

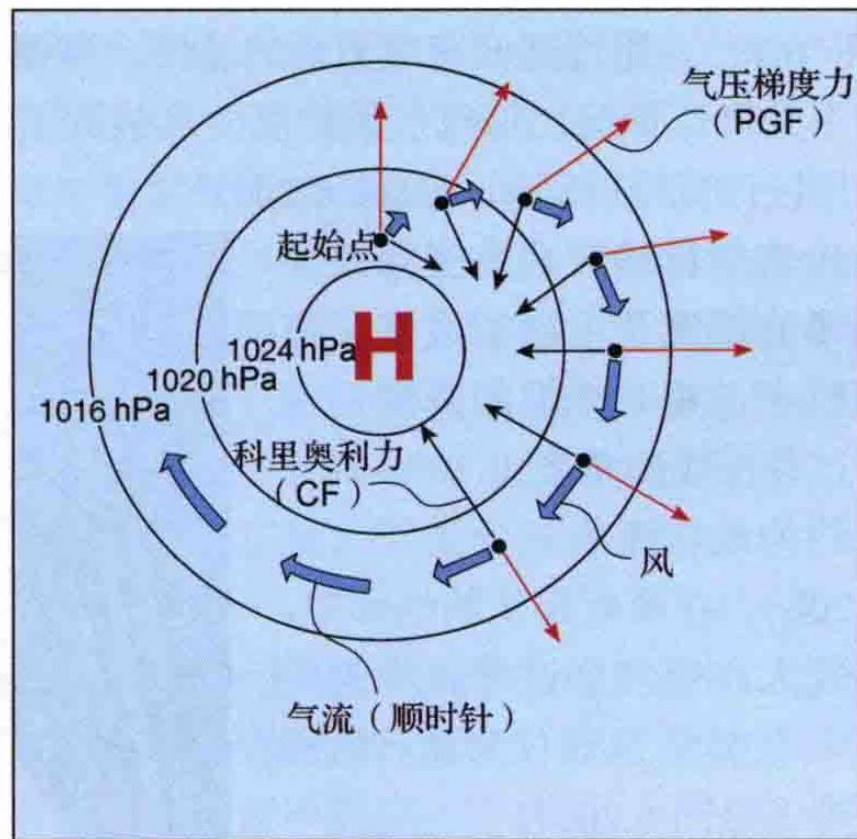
第四章 大气运动和大气环流

4.2 大气的受力和运动：自由大气中的空气水平运动

□ 梯度风：定性分析 解释 高压与低压的旋转方向



(a) 气旋性气流 (北半球)



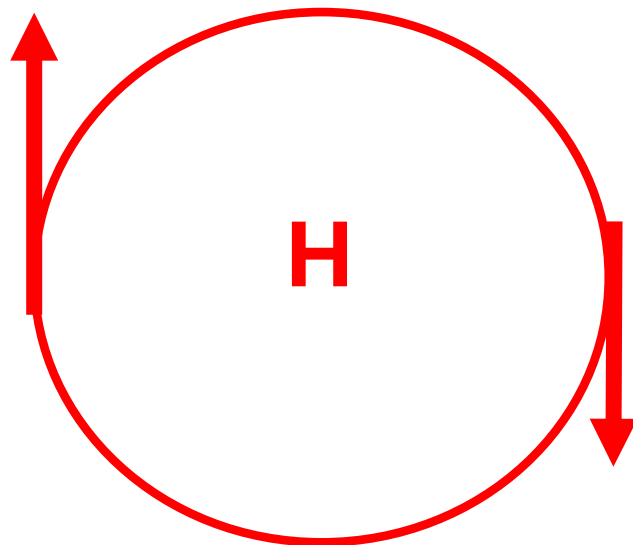
(b) 反气旋性气流 (北半球)

第四章 大气运动和大气环流

4.2 大气的受力和运动：自由大气中的空气水平运动

□ 梯度风：定性分析 解释 高压与低压的旋转方向

环高压中心，梯度风顺时针运动，受力平衡关系式为

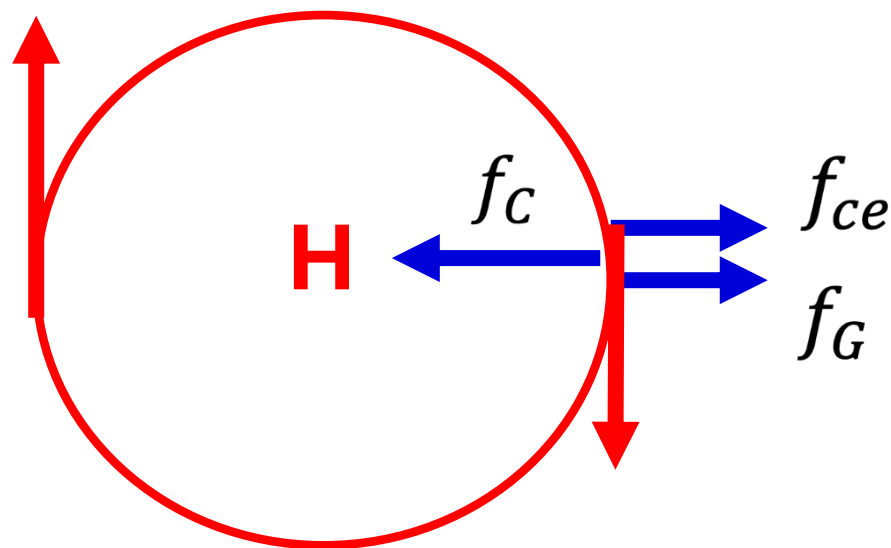


第四章 大气运动和大气环流

4.2 大气的受力和运动：自由大气中的空气水平运动

□ 梯度风：定性分析 解释 高压与低压的旋转方向

环高压中心，梯度风顺时针运动，受力平衡关系式为



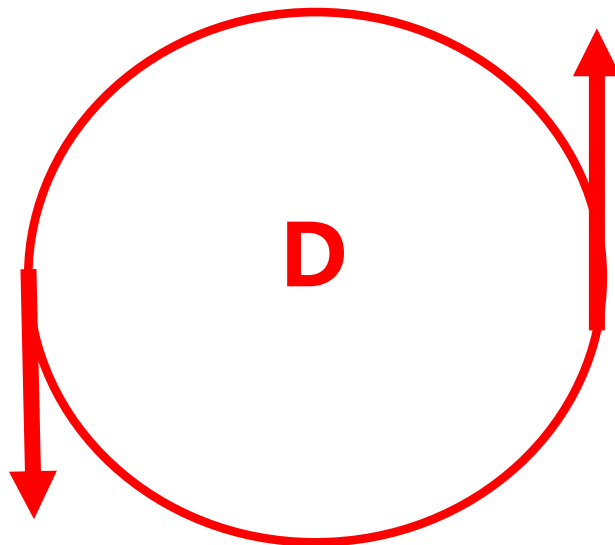
$$f_G = f_c - f_{ce}$$

第四章 大气运动和大气环流

4.2 大气的受力和运动：自由大气中的空气水平运动

□ 梯度风：定性分析 解释 高压与低压的旋转方向

环**低压**中心，梯度风**逆时针**运动，受力平衡关系式为

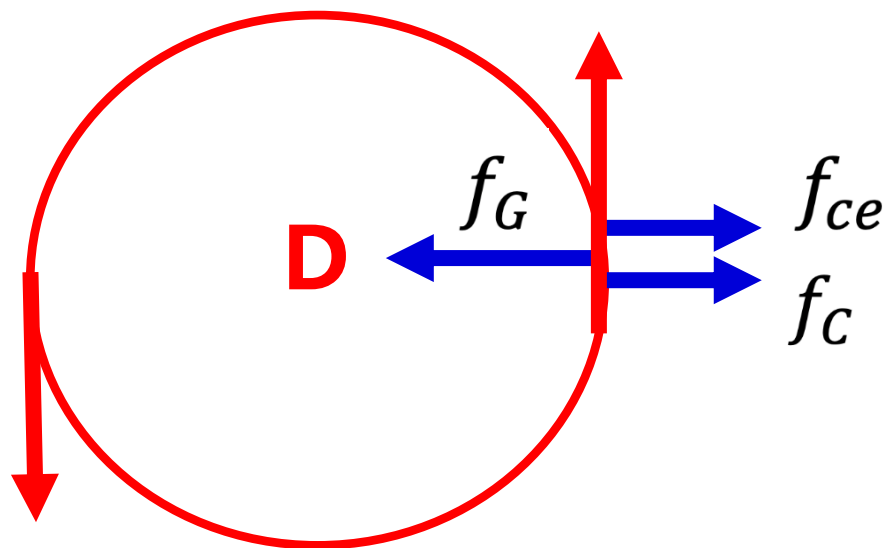


第四章 大气运动和大气环流

4.2 大气的受力和运动：自由大气中的空气水平运动

□ 梯度风：定性分析 解释 高压与低压的旋转方向

环**低压**中心，梯度风**逆时针**运动，受力平衡关系式为



$$f_G = f_c + f_{ce}$$

第四章 大气运动和大气环流

4.2 大气的受力和运动：自由大气中的空气水平运动

□ 梯度风：特殊情况-旋横风

✓ 尺度小，惯性离心力非常大

龙卷风：顺时针或逆时针（取决于初始扰动）



第四章 大气运动和大气环流

4.2 大气的受力和运动：自由大气中的空气水平运动

思考：在一定纬度带，气压梯度力相同时，梯度风与地转风有怎样的关系？

第四章 大气运动和大气环流

4.2 大气的受力和运动：自由大气中的空气水平运动

比较梯度风和地转风的关系是：

$$\frac{1}{\rho} \frac{\Delta P}{\Delta r} = 2 V_{gr} \omega \sin \varphi \pm \frac{V_{gr}^2}{r}$$

$$2 V_g \omega \sin \varphi = 2 V_{gr} \omega \sin \varphi \pm \frac{V_{gr}^2}{r}$$

$$V_g = V_{gr} \pm \frac{V_{gr}^2}{2r\omega \sin \varphi}$$

第四章 大气运动和大气环流

4.2 大气的受力和运动：自由大气中的空气水平运动

比较梯度风和地转风的关系是：

$$\frac{1}{\rho} \frac{\Delta P}{\Delta r} = 2 V_{gr} \omega \sin \varphi \pm \frac{V_{gr}^2}{r}$$

$$2 V_g \omega \sin \varphi = 2 V_{gr} \omega \sin \varphi \pm \frac{V_{gr}^2}{r}$$

$$V_g = V_{gr} \pm \frac{V_{gr}^2}{2r\omega \sin \varphi}$$

环高压中心的梯度风大于其地转风

环低压中心的梯度风小于其地转风

第四章 大气运动和大气环流

4.2 大气的受力和运动：自由大气中的空气水平运动

思考：什么情况下梯度风和地转风近似？

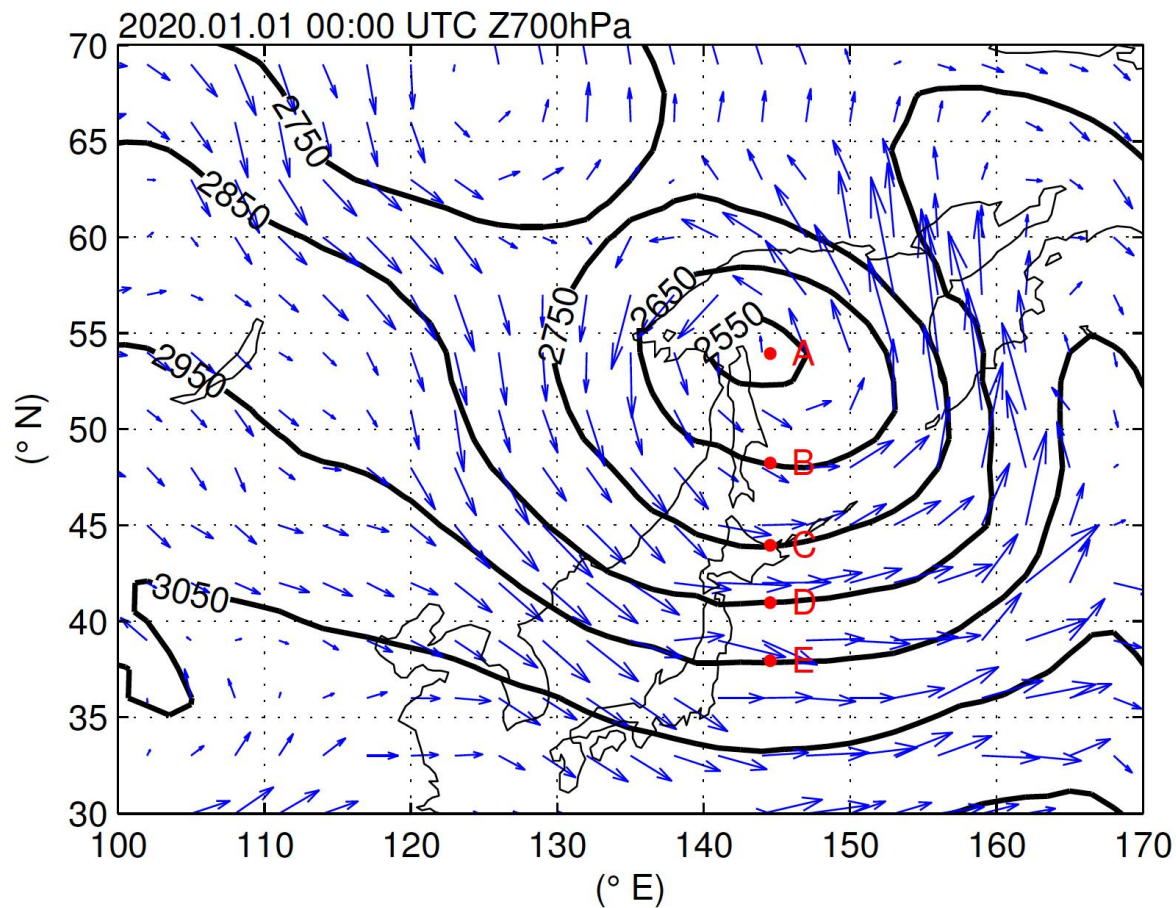


图 4.9: 2020 年 1 月 1 日 0 时次东亚地区 700hPa 大气环流形式。粗黑等值线为位势高度 (gpm), 箭头为水平风矢量。图中沿 144°E 标出 A-E 点, 其纬度分别是 A:54°N, B:48.3°N, C:44°N, D:41°N, E:38°N

先计算地转风:

取 B 点和 C 点的中间位置 $\frac{44+48.3}{2} = 46.15^\circ\text{N}$

$$f = 2 \Omega \sin 46.15^\circ \\ = 2 \times 7.292 \times 10^{-5} \times 0.72116 = 1.05174 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$$

根据南北 2 侧相邻等高线, 估算位势经向梯度:

$$\frac{\Delta\phi}{\Delta y} = \frac{(2650-2750) \times 9.8}{(48.3-44) \times 111.1 \times 10^3} = -2.0514 \times 10^{-3} \text{ m s}^{-2}$$

计算地转风:

$$u_g = -\frac{1}{f} \frac{\Delta\phi}{\Delta y} = 19.5 \text{ m s}^{-1}$$

计算梯度风

取到 A 点距离为曲率半径

$$R = 54^\circ - 46.15^\circ = 7.85 \times 111.1 \times 10^3 = 8.72135 \times 10^5 \text{ m}$$

$\Delta R = \Delta y$, 根据公式 4.8:

$$\frac{u^2}{R} + f u + \frac{\Delta\phi}{\Delta y} = 0$$

一元二次方程求根:

$$u = \frac{-f + \sqrt{f^2 - 4 \frac{1}{R} \frac{\Delta\phi}{\Delta y}}}{2 \frac{1}{R}} = 16.5 \text{ m s}^{-1}$$

■ 问题2:

旋转半径500 km, 低压地转风速是10m/s, 梯度风速是多少? ($f_c = 1 \times 10^{-4} s^{-1}$)

■ 家庭作业: 同样情况, 高压如何?

第四章 大气运动和大气环流

4.2 大气的受力和运动：自由大气中的空气水平运动

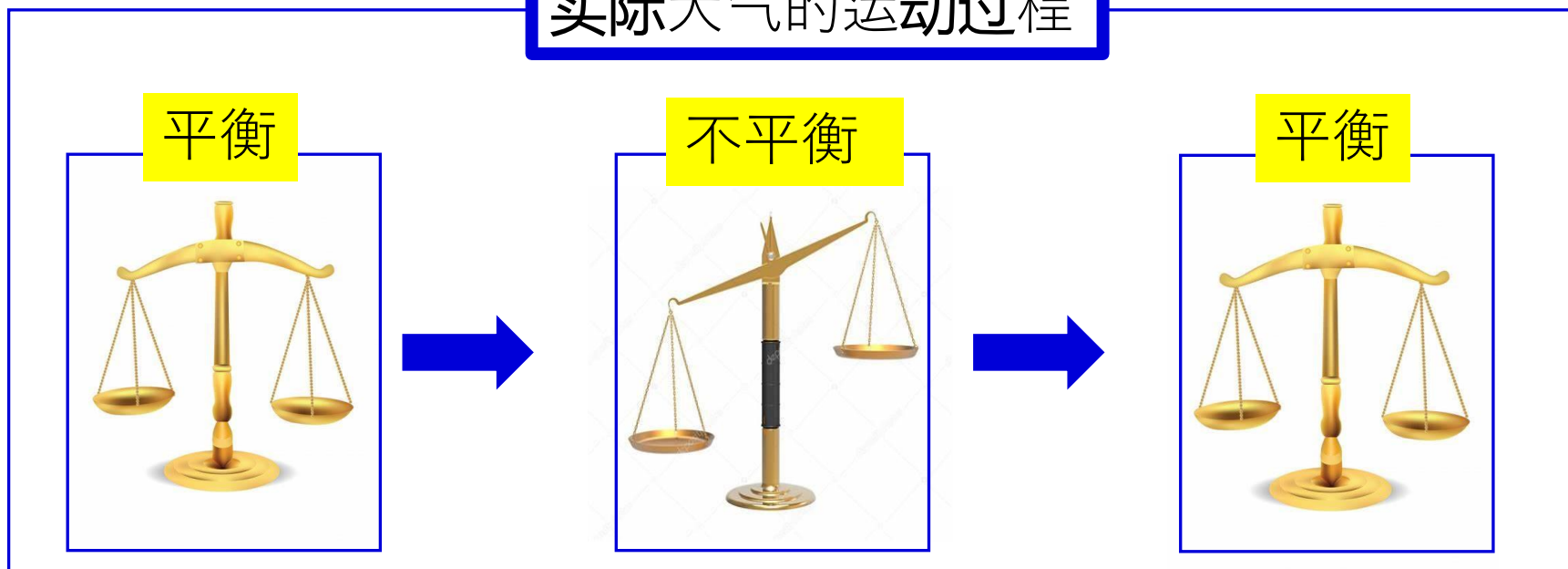
- 地转风和梯度风都是平衡风
- 反映自由大气中风场和气压场的基本关系
- 数值是实际风暂时达到平衡状态时具有的风速值

第四章 大气运动和大气环流

4.2 大气的受力和运动：自由大气中的空气水平运动

- 地转风和梯度风都是平衡风
- 反映自由大气中风场和气压场的基本关系
- 数值是实际风暂时达到平衡状态时具有的风速值

实际大气的运动过程



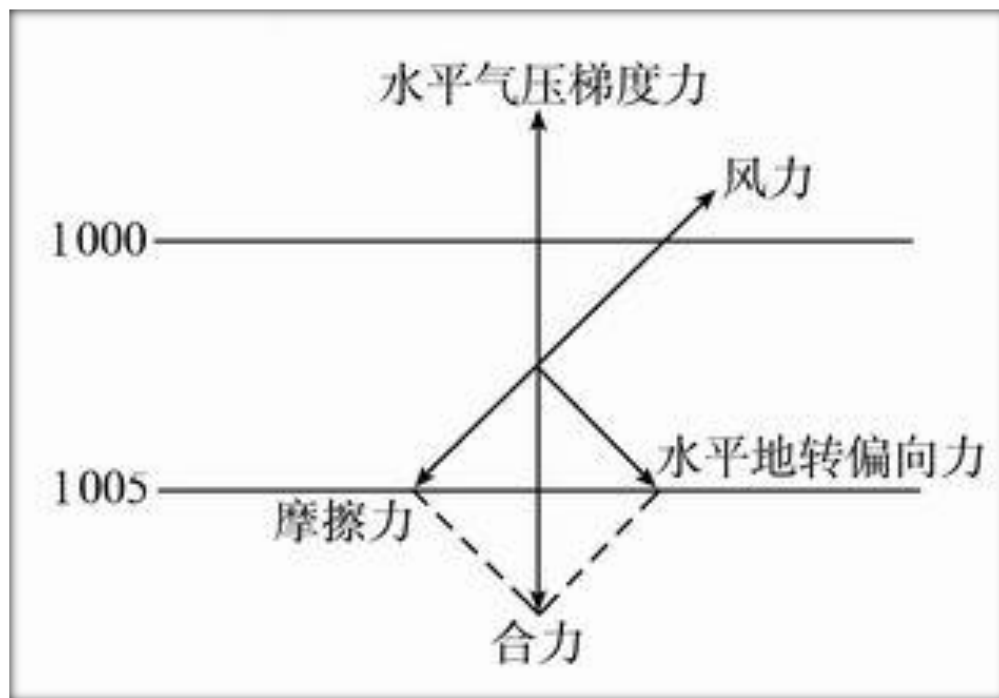
第四章 大气运动和大气环流

4.2 大气的受力和运动：摩擦层的空气水平运动

第四章 大气运动和大气环流

4.2 大气的受力和运动：摩擦层的空气水平运动

- 降低速度，改变运动方向
- 风斜穿等压面



三力平衡

4.2 大气的受力和运动：摩擦层的空气水平运动

三力平衡

$$0 = f_G + f_C + f_d$$

4.2 大气的受力和运动：摩擦层的空气水平运动

三力平衡

$$f_G \sin \alpha = f_d; \quad f_G \cos \alpha = f_c$$

$$f_G \sin \alpha = -C_D \cdot V^2 / h; \quad f_G \cos \alpha = fV$$

$$\tan \alpha = -C_D \cdot V / fh$$

- **地表粗糙度、风速和边界层高度**共同决定了**风斜穿等压线的角度 α** 。
- 地表越平坦、风速越小、距离地表越高，风与等压线之间的夹角就越小。
- 在边界层顶，摩擦力可忽略不计，风与等压面的夹角基本为0，近似地转风。距离地表越高，风与等压线之间的夹角就越小，风向右偏，风速越大。
- 随着高度增加，风矢在地面的投影形成**埃克曼螺旋线**。

第四章 大气运动和大气环流

4.2 大气的受力和运动：摩擦层的空气水平运动

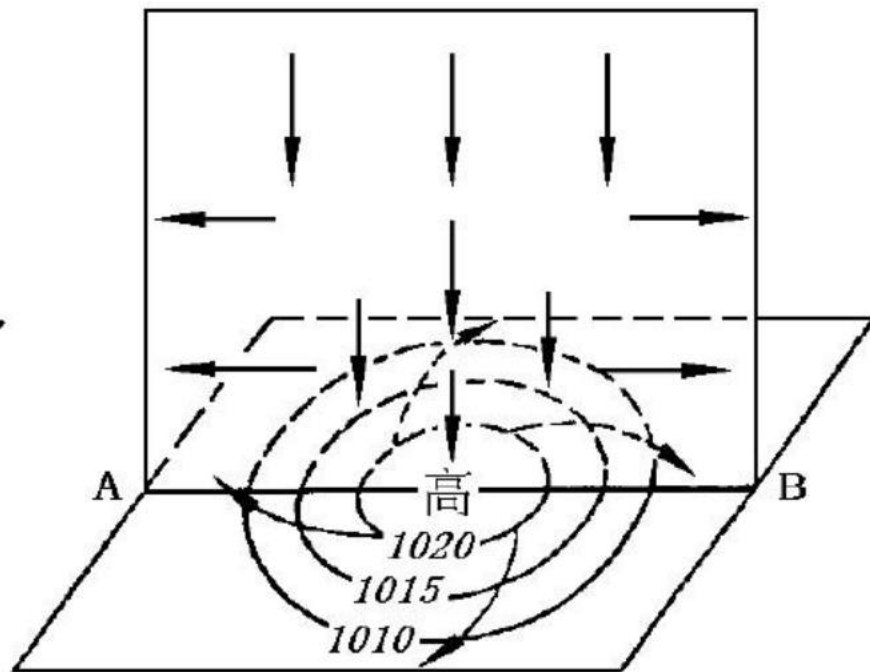
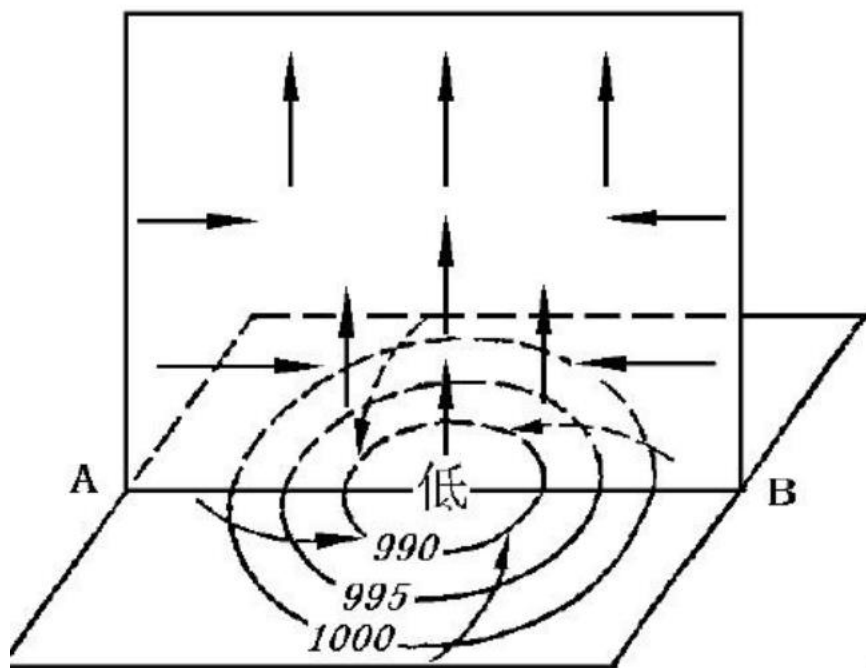


$$0 = f_G + f_c + f_d + f_{ce}$$

第四章 大气运动和大气环流

4.2 大气的受力和运动：摩擦层的空气水平运动

□ 近地面的真实高、低压的运动



■ 问题3（家庭作业思考题）：

边界层，大气曲线运动的受力平衡方程？

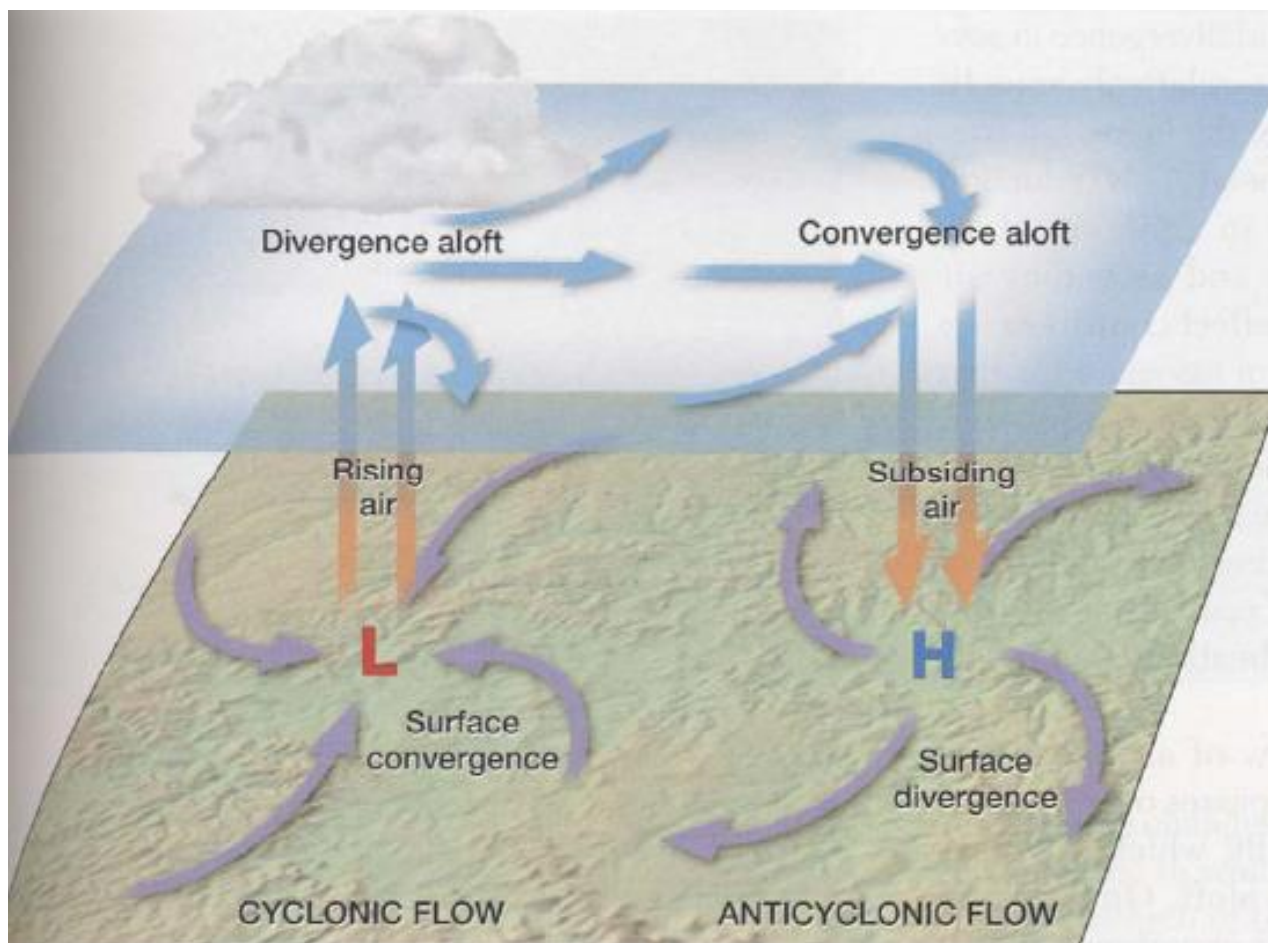
边界层，风与等压线夹角如何计算？

Ekman螺线的诠释？

第四章 大气运动和大气环流

4.2 大气的受力和运动：摩擦层的空气水平运动

□ 近地面的真实高、低压的运动



第四章 大气运动和大气环流

4.2 大气的受力和运动：空气的垂直运动

■对流运动：

- 成因：某团空气温度与周围空气温度不等
- 特点：规模较小、维持时间短暂，
- 作用：垂直输送热量、水分、固体杂质，对成云致雨和天气演变具有重要作用。

第四章 大气运动和大气环流

4.2 大气的受力和运动：空气的垂直运动

■ 系统性垂直运动:

- 成因：水平气流的**辐合**、**辐散**、**暖气流沿锋面滑升**以及**山脉的机械阻滞**等**动力作用**所引起的大范围**的上升或下降运动**。
- 特点：**垂直速度很小**，但**范围很广**，并**维持时间长**。
- **对天气的形成和演变产生着重大影响**。

第四章 大气运动和大气环流

4.2 大气的受力和运动：基本动力量简介

□ 连续方程：不可压缩流体

$$\frac{\Delta\rho}{\Delta t} = \underbrace{\left(-u \frac{\Delta\rho}{\Delta x} - v \frac{\Delta\rho}{\Delta y} - w \frac{\Delta\rho}{\Delta z} \right)}_{\text{平流}} - \rho \underbrace{\left(\frac{\Delta u}{\Delta x} + \frac{\Delta v}{\Delta y} + \frac{\Delta w}{\Delta z} \right)}_{\text{辐合/辐散}}$$

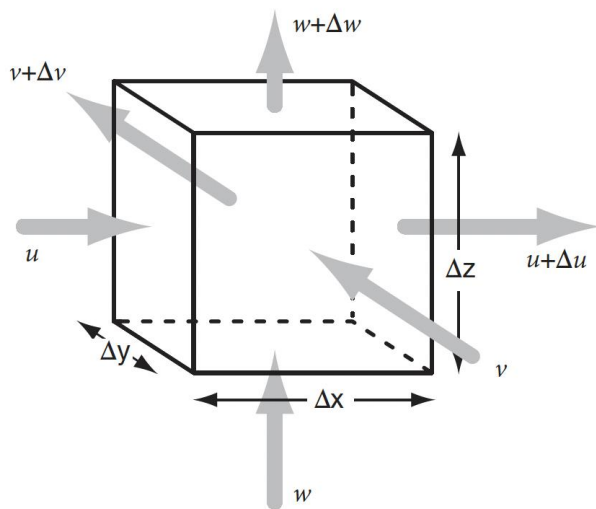


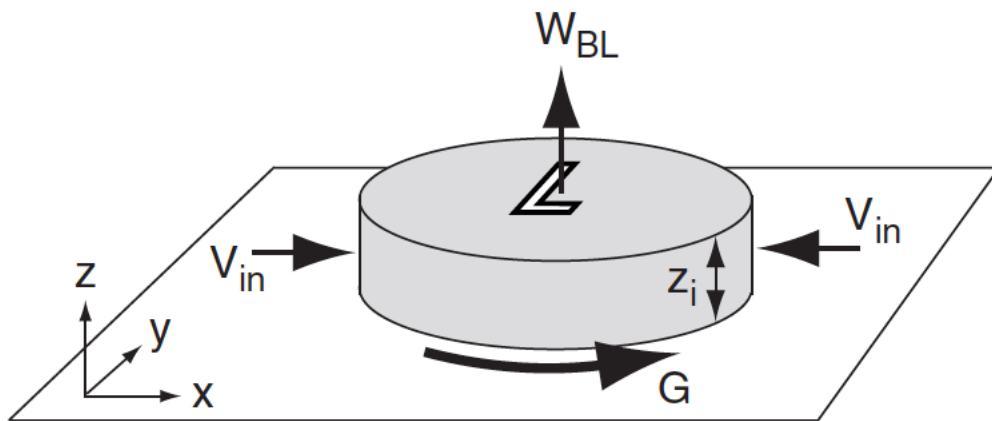
图 4.15: 单位空间空气质量收支示意图

第四章 大气运动和大气环流

4.2 大气的受力和运动：基本动力量简介

□连续方程：不可压缩流体

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



第四章 大气运动和大气环流

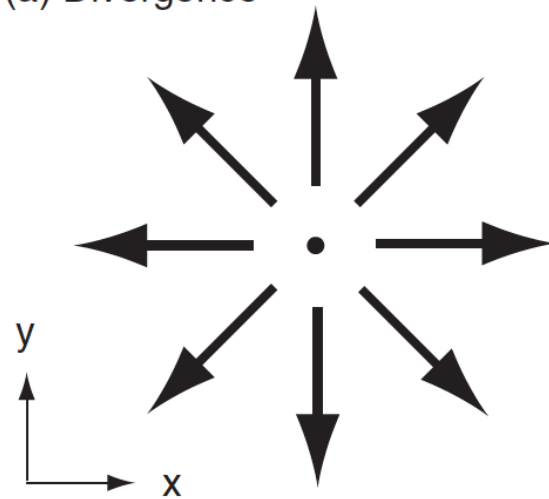
4.2 大气的受力和运动：基本动力量简介

□ 水平散度 (Divergence)：空气的辐合和辐散

$$D = \frac{\Delta u}{\Delta x} + \frac{\Delta v}{\Delta y}$$

$$-D = \frac{\Delta w}{\Delta z}$$

(a) Divergence



第四章 大气运动和大气环流

4.2 大气的受力和运动：基本动力量简介

□ 连续方程：不可压缩流体

$$\frac{2 \cdot v_{in}}{R} = \frac{\Delta \omega}{\Delta z}$$

- 问题4：地面天气图上有一个低压气旋，垂直等压线向气旋中心有水平速度2m/s，距离低压中心旋转半径500km，取边界层高度1km，估算边界层顶垂直速度

第四章 大气运动和大气环流

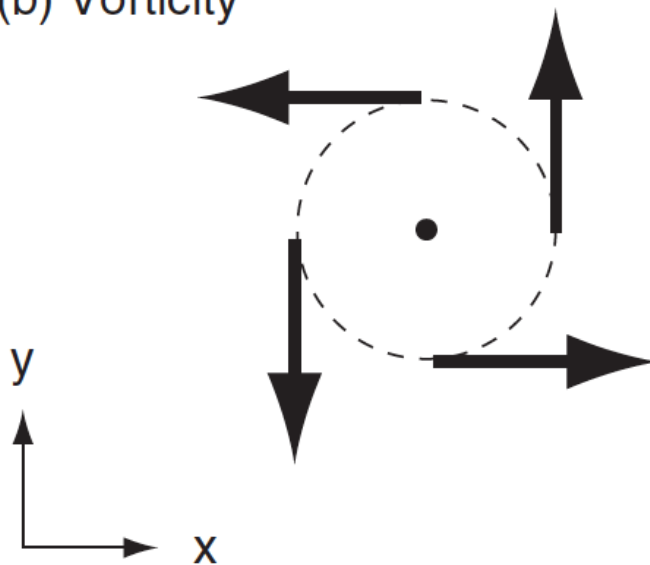
4.2 大气的受力和运动：基本动力量简介

□ 涡度 (Vorticity)：空气的旋转程度

相对涡度

$$\zeta = \frac{\Delta v}{\Delta x} - \frac{\Delta u}{\Delta y}$$

(b) Vorticity



第四章 大气运动和大气环流

4.2 大气的受力和运动：基本动力量简介

□ 涡度 (Vorticity)

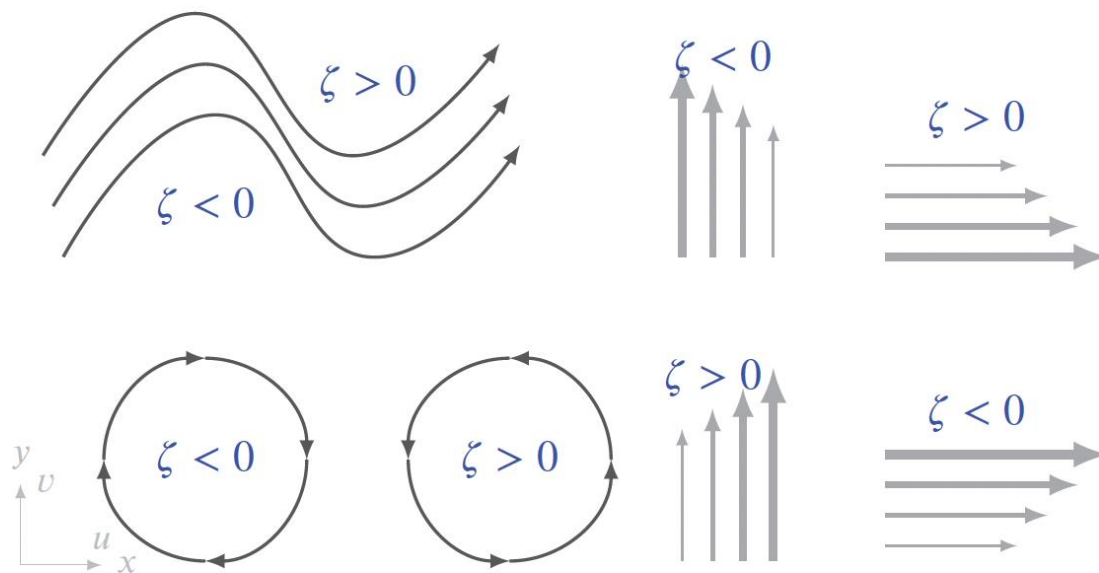


图 4.17: 曲率和切变导致的相对涡度示意图

第四章 大气运动和大气环流

4.2 大气的受力和运动：基本动力量简介

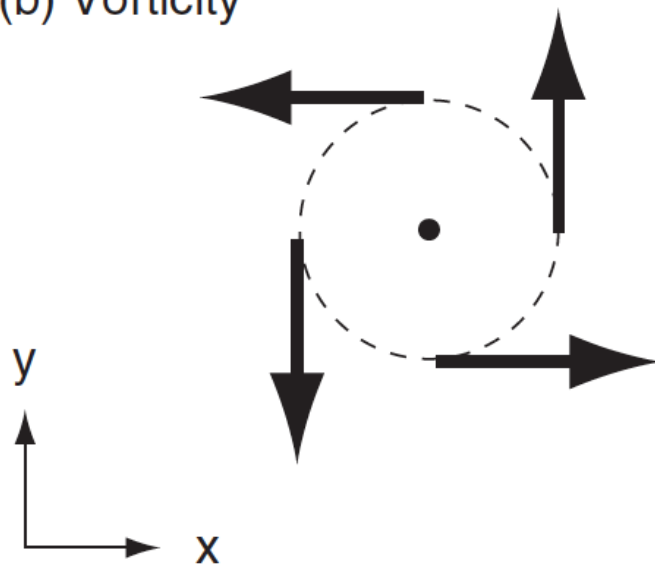
□ 涡度 (Vorticity)

问题5:

低压的涡度是正还是负?

高压呢?

(b) Vorticity



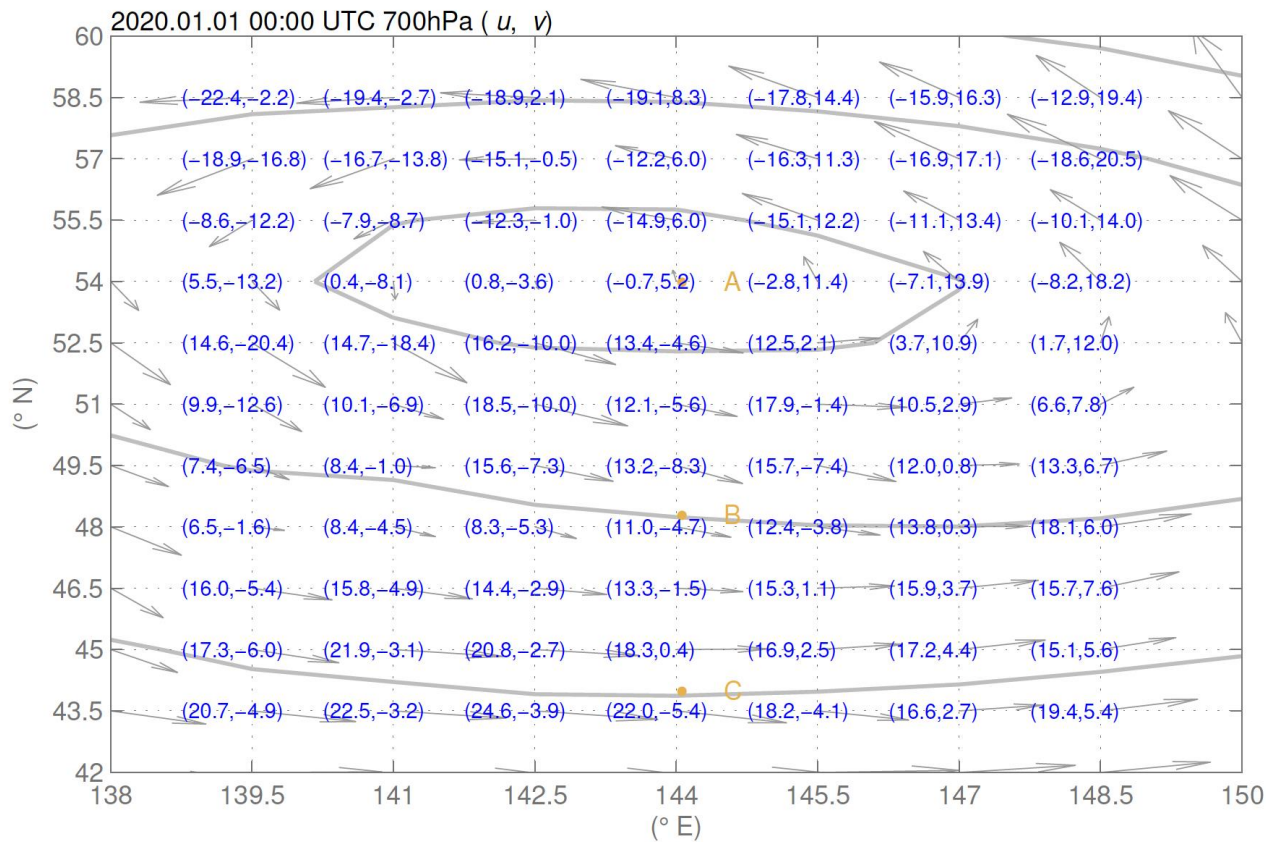


图 4.16: 2020 年 1 月 1 日 0 时次东亚地区 700hPa 水平风. 每一个格点位置上的 (u, v) 以数值标出, 箭头为水平风矢量, 粗实线为等高线. 参考图 4.9

！！ 计算A和B点的涡度和散度

第四章 大气运动和大气环流

$$\underbrace{\frac{\Delta\zeta}{\Delta t}}_{\text{涡度倾向}} = - \underbrace{\left(u \frac{\Delta\zeta}{\Delta x} + v \frac{\Delta\zeta}{\Delta y} \right)}_{\text{相对涡度平流}} - \underbrace{\beta v}_{\text{自转涡度平流}} - \underbrace{(f + \zeta) D}_{\text{辐合辐散}} \quad (4.22)$$

上式也叫涡度倾向方程。如果上式中的水平风用地转风 (u_g, v_g) 来代替, 则称为准地转涡度方程³⁰。涡度方程表明, 某一点涡度的变化, 决定于相对涡度平流、地球自转涡度平流和气流辐合辐散这三个因子。

- 相对涡度平流项。涡度平流的强弱决定于相对涡度梯度和水平风速的大小。典型的情况, 槽前气流有正涡度平流, 脊前有负的涡度平流。
- 地球自转涡度平流也称 β 效应项。均匀的经向气流受地转偏向力的作用, 由于偏向力高纬度大于低纬度, 在北半球将形成反气旋性切变的西风气流, 产生负涡度。反之, 北风在地转偏向力作用下形成气旋性切变的东风气流, 产生正涡度。形式上是经向风对自转涡度在不同纬度间的输送, 本质是地球自转涡度向相对涡度的转换。
- 水平散度项。水平辐合使局地相对涡度减小; 辐合时, 水平散度为负, 使局地相对涡度增大 (图 4.19)。其物理意义为当无外力作用时, 气块的转动惯量不变, 辐合流场中, 由于旋转半径减小, 转动的角速度将增大, 辐散流场中, 由于旋转半径增大, 气块旋转角速度将减小。例题 4.3 中计算了图 4.16 中 700hPa 气旋中心区的水平散度, 正的散度表明流场是辐散的, 这意味着局地散度项的作用会削弱气旋的强度。根据公式 4.17, 辐合辐散对应垂直运动 $D = -\frac{\Delta w}{\Delta z}$, 因此涡度方程的辐合辐散项也叫垂直拉伸项, 也可理解为气柱上层比下层有更大的上升运动, 加强下层气流的水平辐合, 导致相对涡度的增加。

第四章 大气运动和大气环流

4.2 大气的受力和运动：热成风 thermal wind

□热成风：由于水平温度梯度存在，产生的地转风在垂直方向上的速度矢量差（风垂直切变）

$$\vec{V}_T = \vec{V}_2 - \vec{V}_1$$

V_2 、 V_1 分别是高层与低层的地转风

V_T 大小取决于温压场配置

第四章 大气运动和大气环流

4.2 大气的受力和运动：热成风 thermal wind

等压面间的厚度
与平均温度成正比

$$Z_2 - Z_1 = \frac{RT}{g} (\ln P_1 - \ln P_2)$$

地转风
与等压面坡度成正比

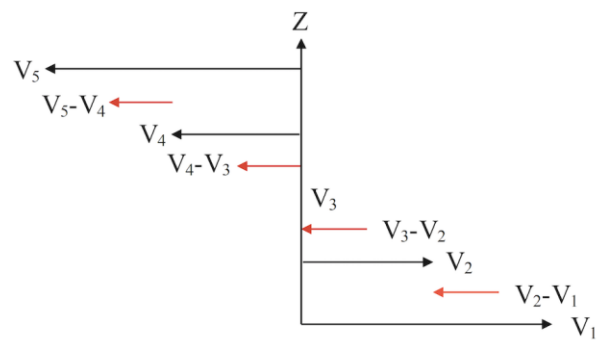
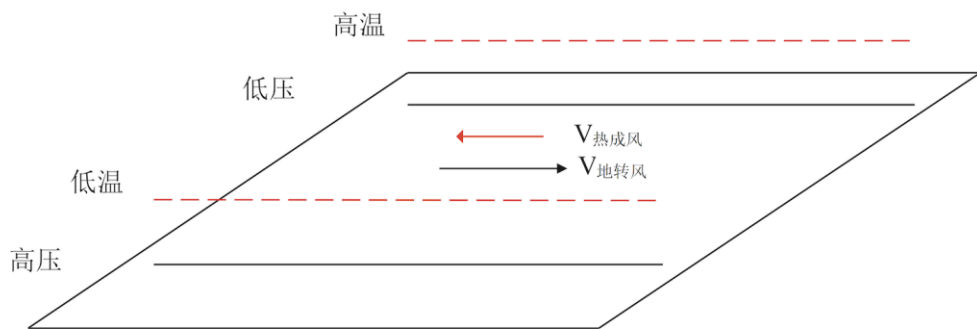
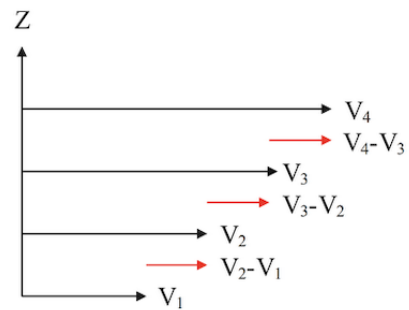
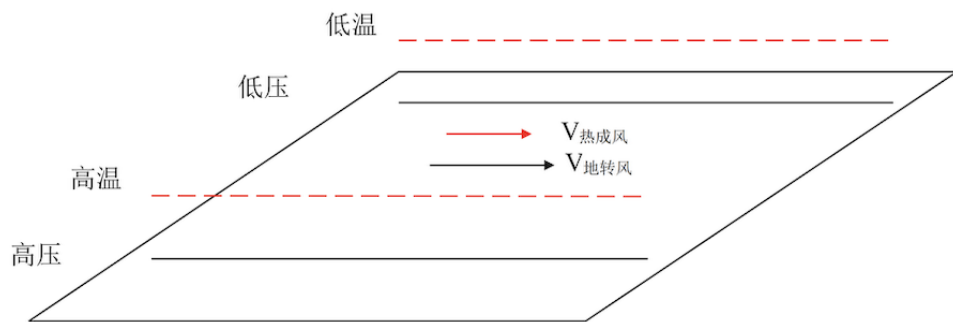
$$V_g = -\frac{9.8}{2\omega \sin \varphi} \frac{\Delta H}{\Delta n}$$

第四章 大气运动和大气环流

4.2 大气的受力和运动：热成风 thermal wind

第一类：等温线和等压线平行

- 地转风的风向与热成风方向平行。当高压区对应高温区时，水平气压梯度力随高度会增加，**风速随高度逐渐增大**；副热带地区的高空西风急流就是热成风原理形成的。
- 当低压区对应高温区，水平气压梯度力随高度会减小，风速随高度不断减小，到某一高度减少至零后，风向反转180度、风速开始随高度增大。

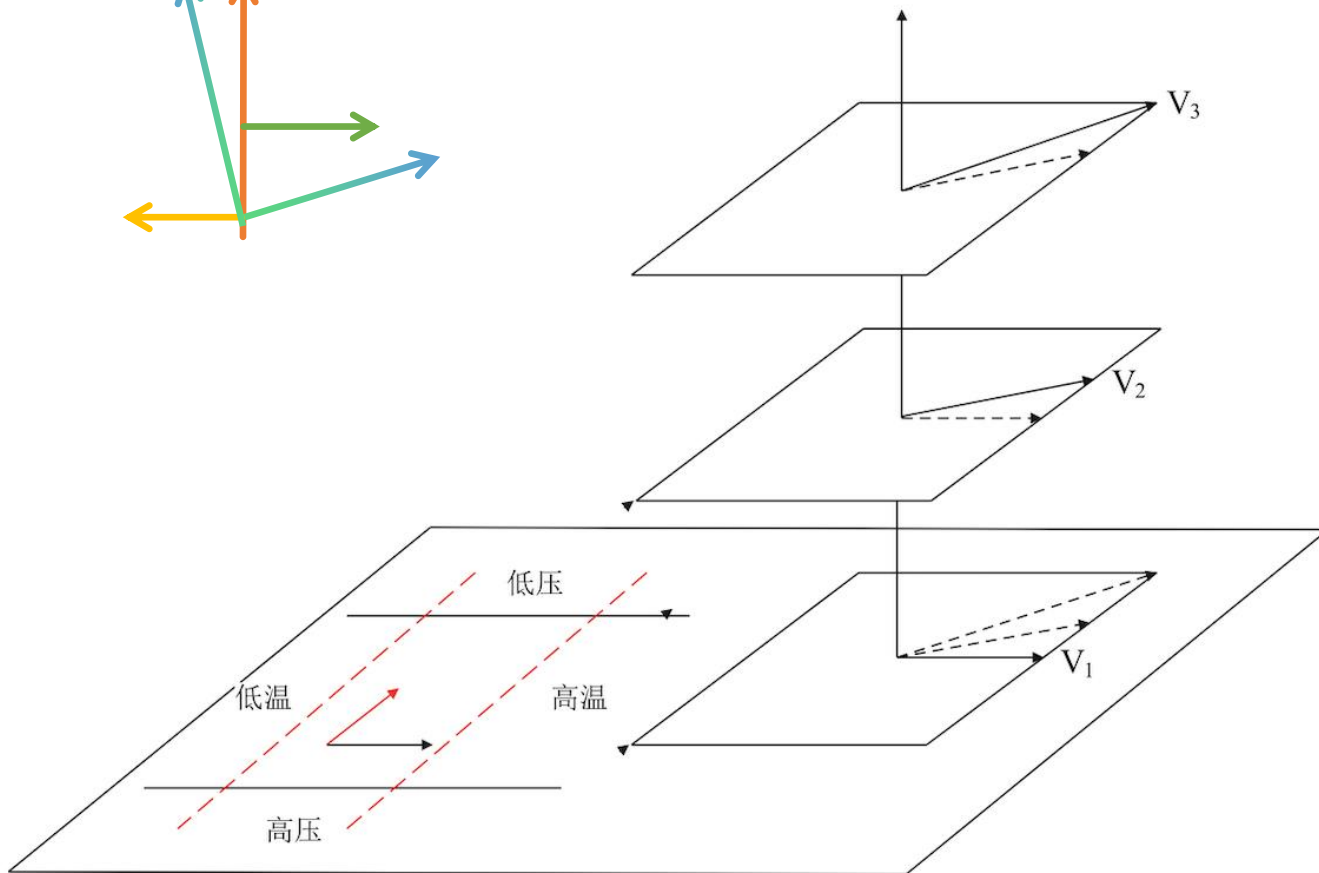
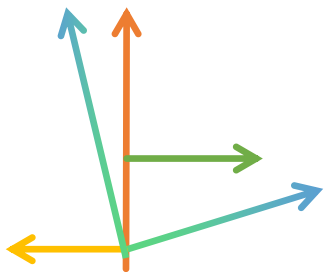


第四章 大气运动和大气环流

4.2 大气的受力和运动：热成风 thermal wind

第二类：等温线和等压线不平行

- 当低层风从冷区吹向暖区，即冷平流发生时，随着高度增加，会产生从暖区指向冷区的气压梯度力分量，风随高度逐渐向左转，越到高层，风向越接近热成风方向。
- 当低层风从暖区吹向冷区，即暖平流发生时，随着高度增加，会产生从暖区指向冷区的气压梯度力分量，风随高度逐渐向右转，越到高层，风向越接近热成风方向。



4.2 大气的受力和运动：小结

重点：

- 自由大气的空气水平运动：地转风和梯度风
- 实际大气中高压和低压的运动形式和形成原理（自由大气和摩擦层）
- 理解涡度、散度和连续方程
- 理解热成风（西风急流）

Homework 4



- 绘制地转风、梯度风的受力平衡图
- 绘制自由大气高压和低压的旋转形式和受力图
- 绘制大气边界层高压和低压的旋转形式和受力图。
- 参考P346 (*Meteorology for S & E*) 推倒热层风

思考解释：

- 高纬度地区和低纬度地区大气运动受力有何不同？