

第六章：大气运动的基本原理

Jintai Lin 林金泰

Dept. of Atmospheric & Oceanic Sciences, School of Physics

linjt@pku.edu.cn

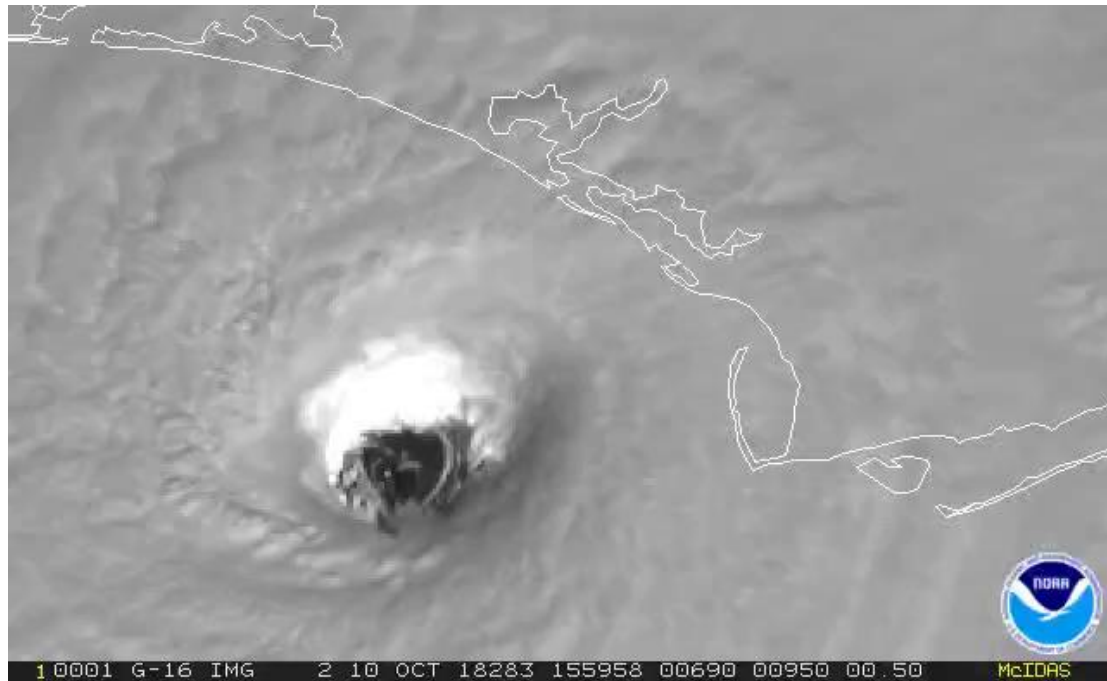
<http://www.pku-atmos-acm.org/>

课件改编自俞妍老师课件

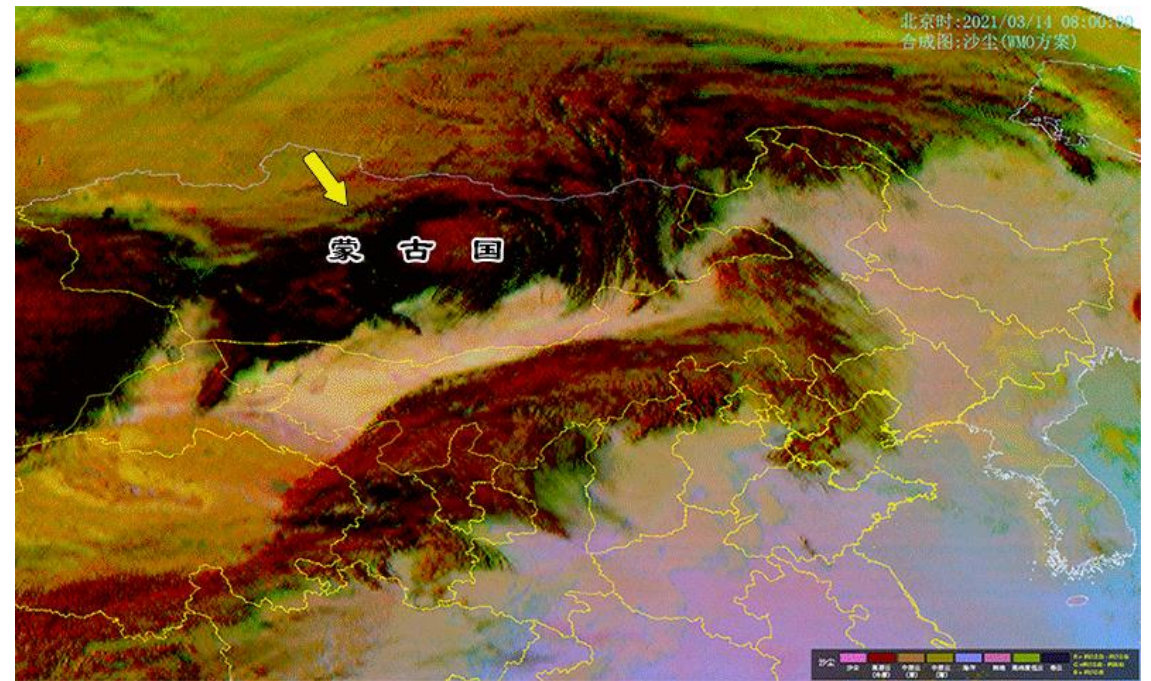


地球大气的运动

美国GOES卫星
对某飓风的高分辨持续观测

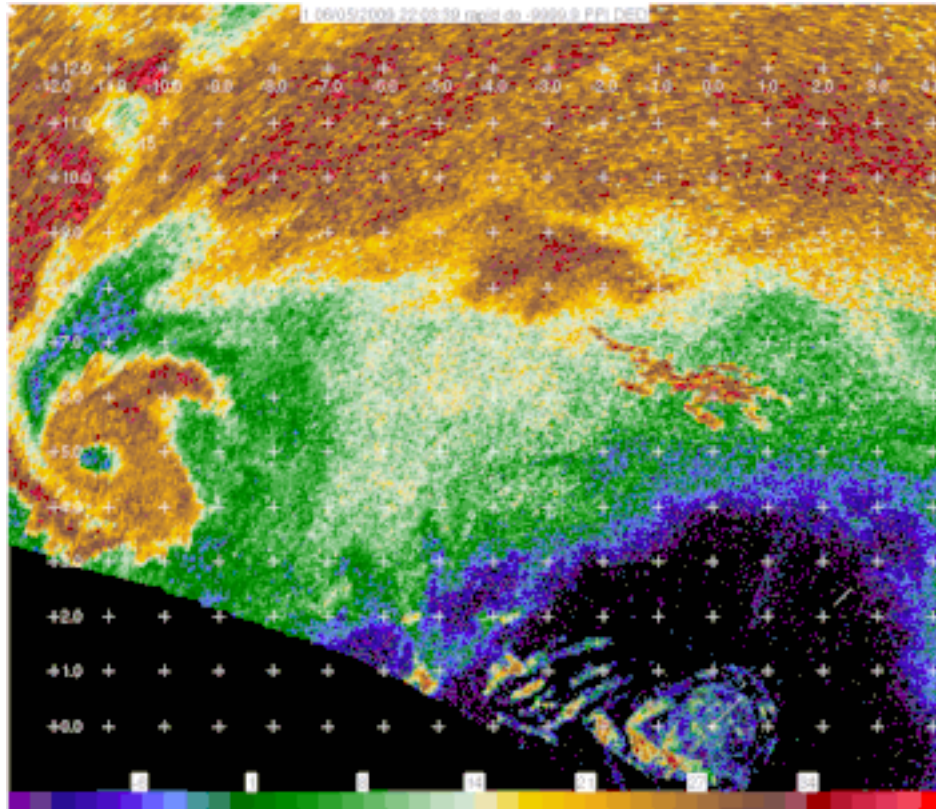


风云4A
对2021年3月沙尘暴持续监测

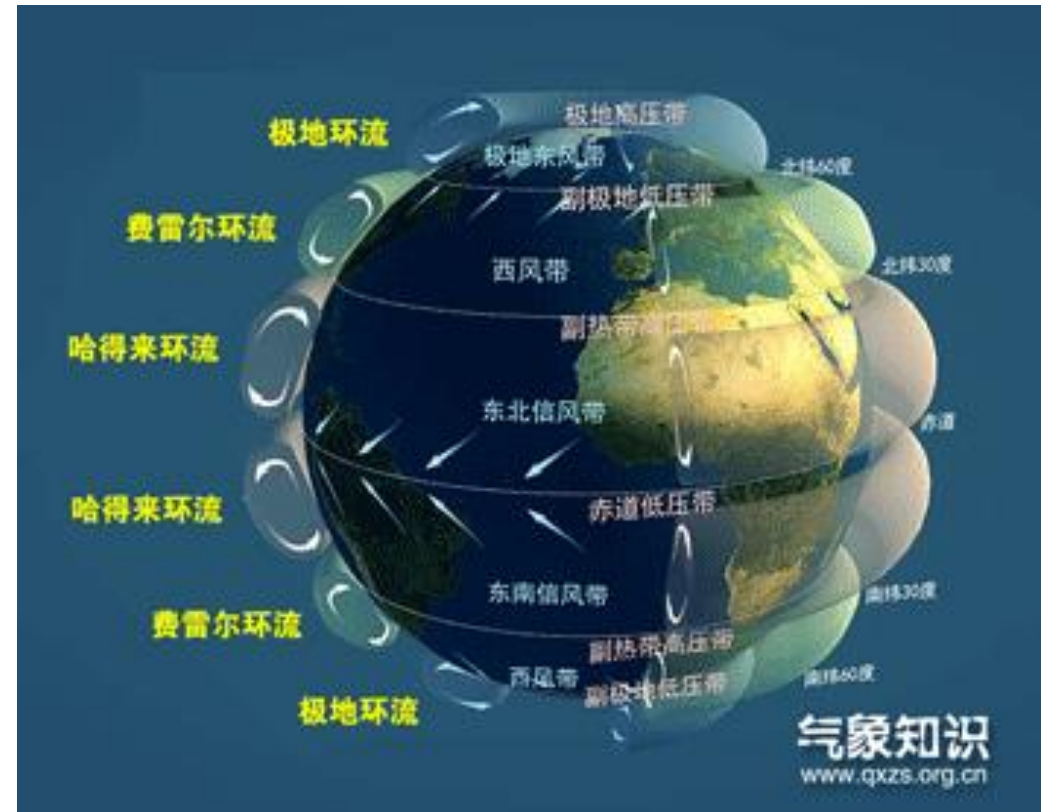


地球大气是旋转球体上的复杂流体

美国怀俄明州龙卷风
雷达观测，2009年6月5日

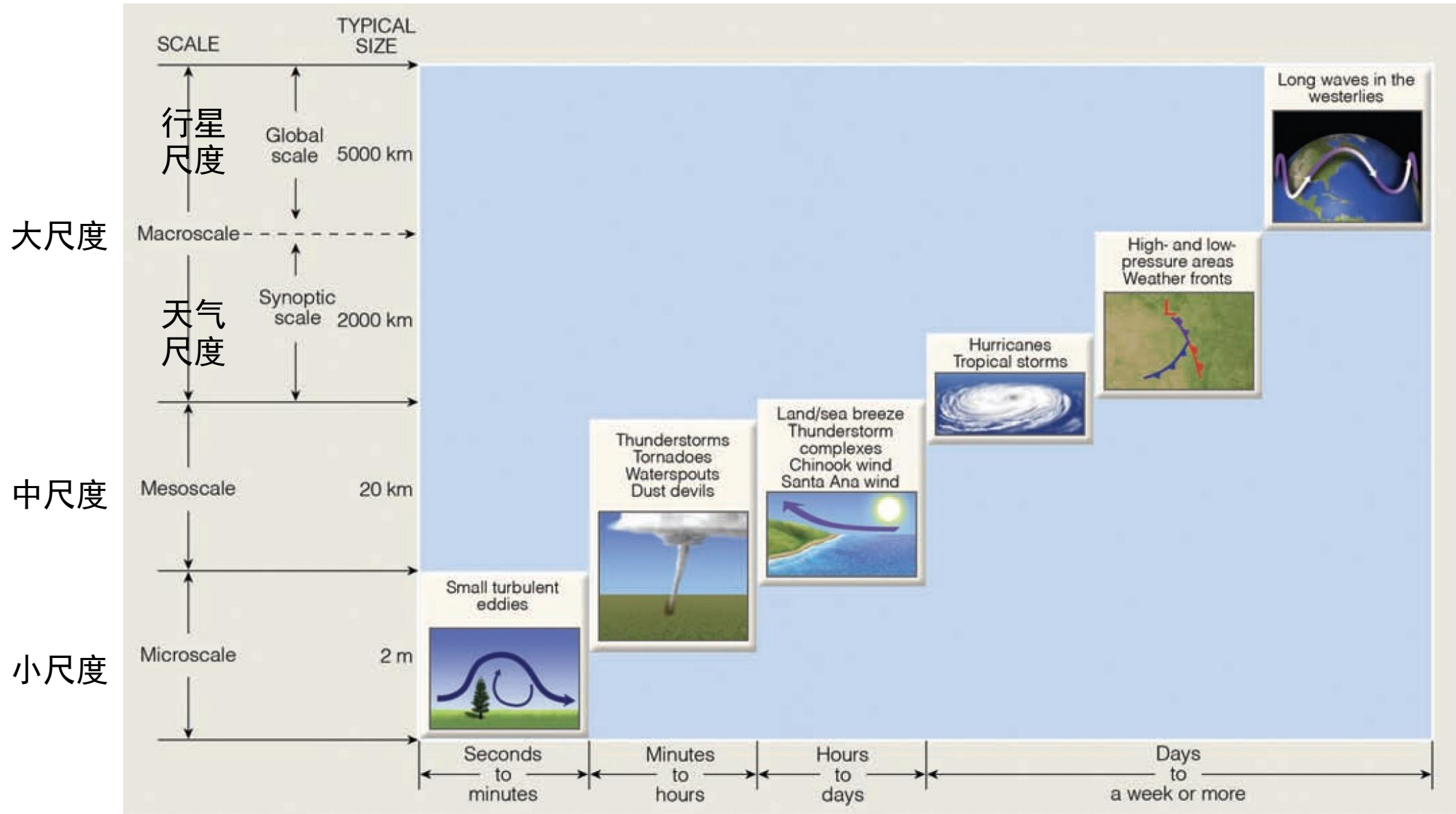


三圈环流



Weather in a tank: <https://www.youtube.com/watch?v=uWdKVpQ94Ns>

地球大气运动的时间和空间尺度



本章主要内容

1. 大气运动的受力情况
2. 大气运动的不同形态
3. 不同空间和时间尺度的大气运动
 - 小尺度：龙卷风、水龙卷、尘卷
 - 中尺度：海陆风、山谷风、热带气旋
 - 大尺度：季风、温带气旋
 - 行星尺度：三圈环流、西风急流、罗斯贝波

大气是一种流体

- 大气是一种流体，我们从流体力学的观点出发来分析大气的运动
- 气体的状态是由3个参数（2个独立）决定的

$$p = \rho RT$$

p : 气压，单位：Pa

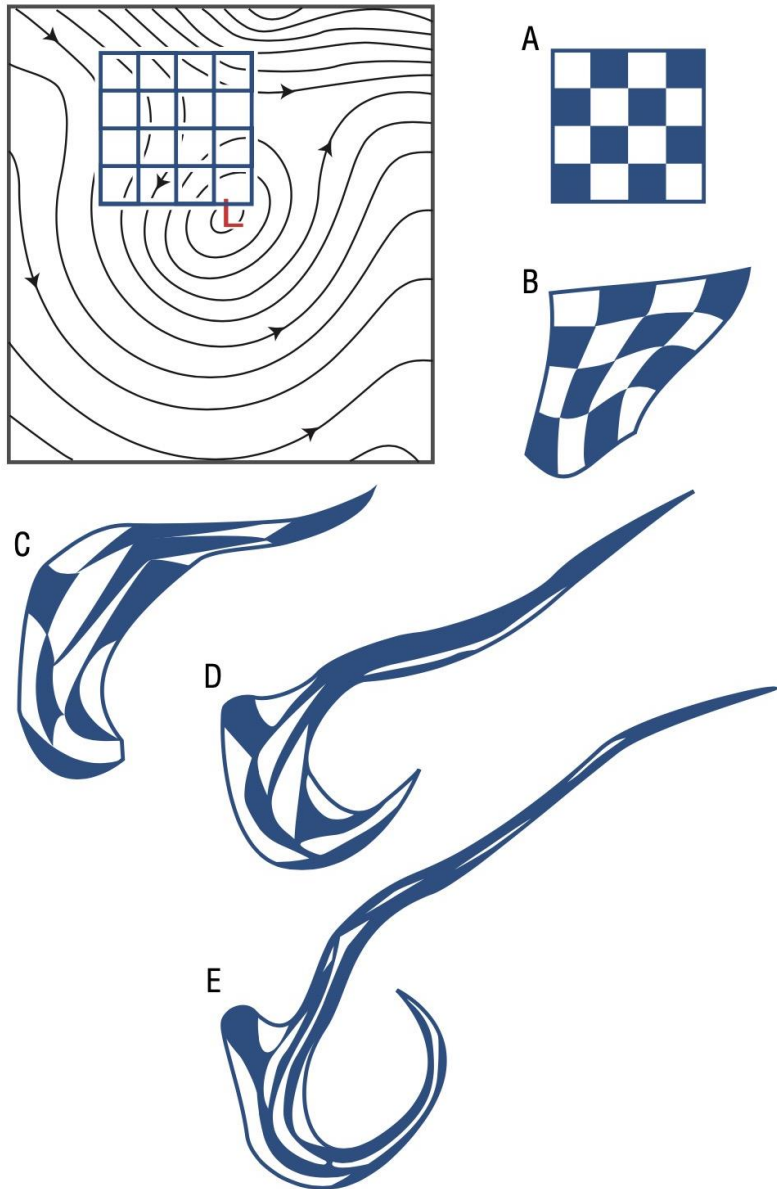
T : 绝对温度，单位：K

ρ : 密度，单位：kg m⁻³

R : 气体常数，对于干空气：287 J kg⁻¹ K⁻¹；对于水汽：461 J kg⁻¹ K⁻¹

- 对于大气运动，需要考虑水汽（绝对湿度、相对湿度等）和水的相变（水循环）所伴随的能量转化

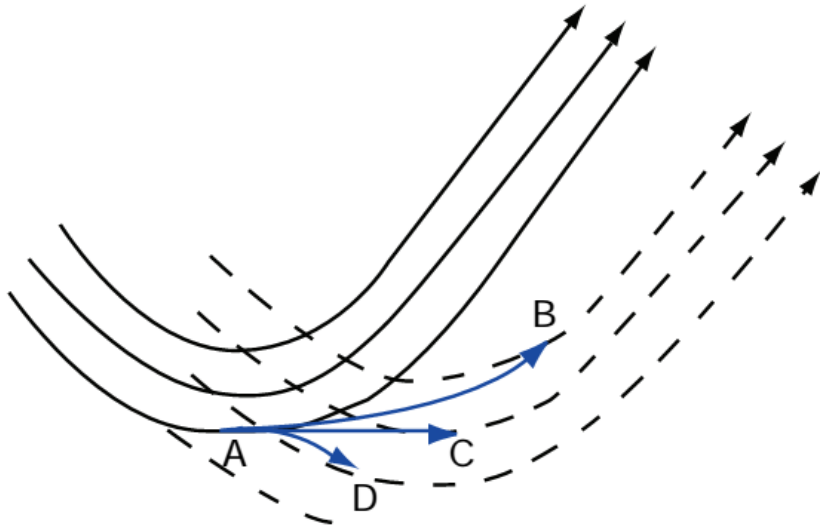
流体与刚体的最大区别：形变



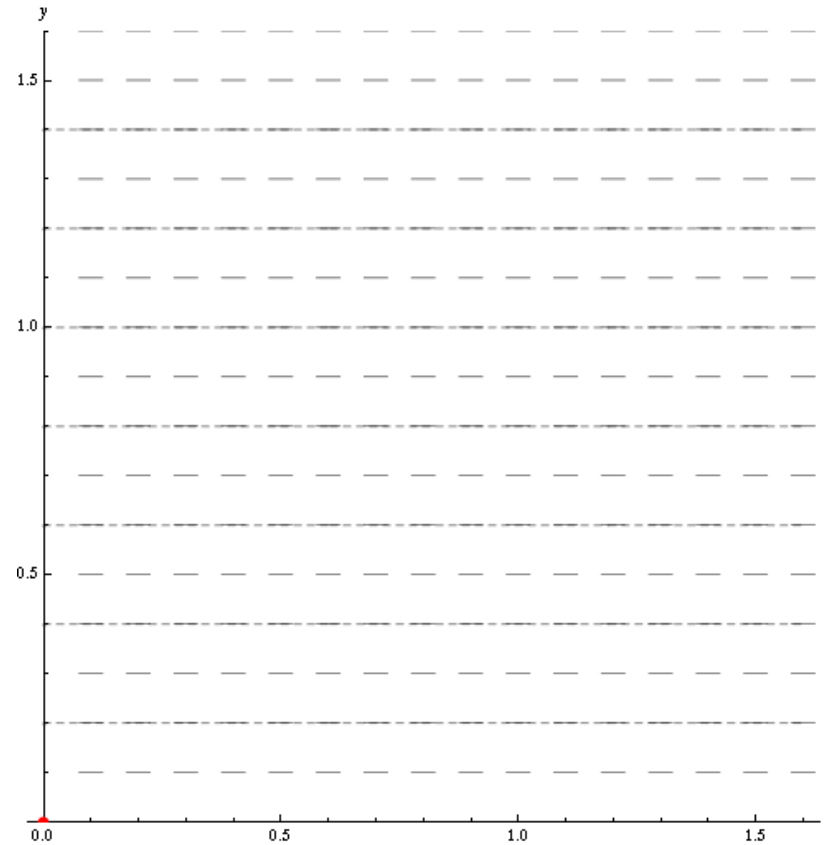
一个气块在运动过程中发生形变

Fig. 7.3 (Top) A grid of air parcels embedded in a steady state horizontal wind field indicated by the arrows. The strength of the wind at any point is inversely proportional to the spacing between the contours at that point. (A-E) How the grid is deformed by the flow as the tagged particles move downstream; those in the upper right corner of the grid moving eastward and those in the lower left corner moving southward and then eastward around the closed circulation. [From *Tellus*, 7, 141-156 (1955).]

迹线，流线和脉线



Wallace and Hobbs, 2006



https://en.wikipedia.org/wiki/File:Streaklines_and_pathlines_animation.gif

Pathline: 迹线

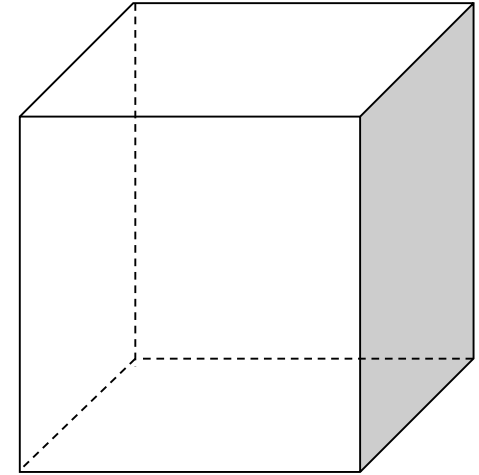
Streamline: 流线 (虚线)

Streakline: 脉线

对定常流场，脉线就是迹线，同时也就是流线

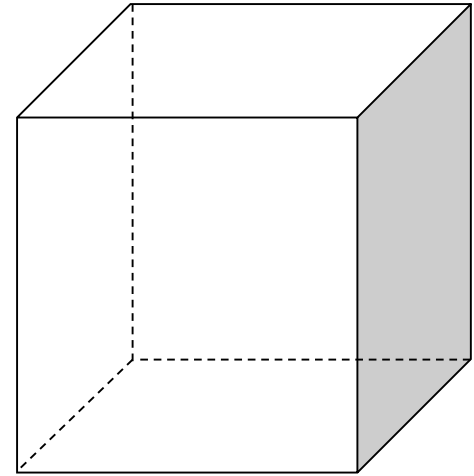
流体的连续性假设

- 流体的连续介质假设认为：流体可以近似看作连续的、充满全空间的介质组成，各部分间无空隙存在，其宏观性质依然受牛顿力学的支配。描述流体的各物理量所引用的数学函数，也均为连续函数。
- 在大气动力学中，我们常选定一个单位质量的气块作为研究对象。
- 我们一般假定这个气块的体积与整个大气的体积相比非常小；同时这个气块包含大量的分子数，满足统计分布，不考察单个分子的具体情况。

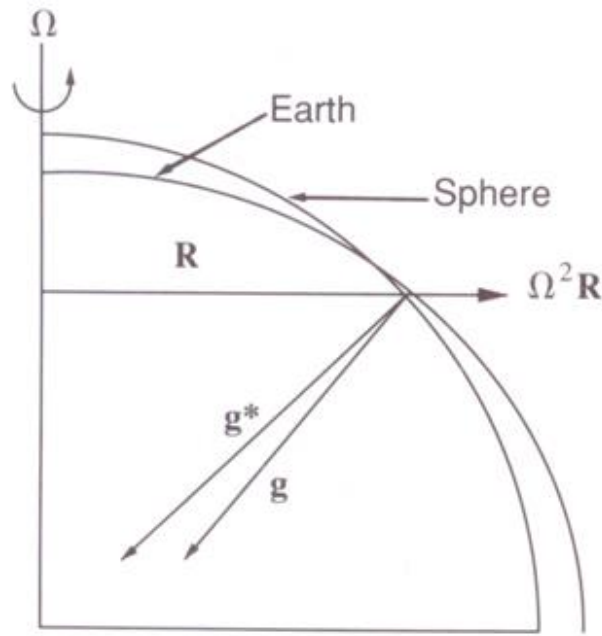


流体的受力分析

- 根据牛顿第二定律，一个物体的运动(或加速度)是由作用于该物体上的各个力共同决定的
- 考虑地球表面放一个气块，它受哪些力？
- 考虑地球旋转？



气块受力分析 I: 地球引力 + 离心力 = 重力



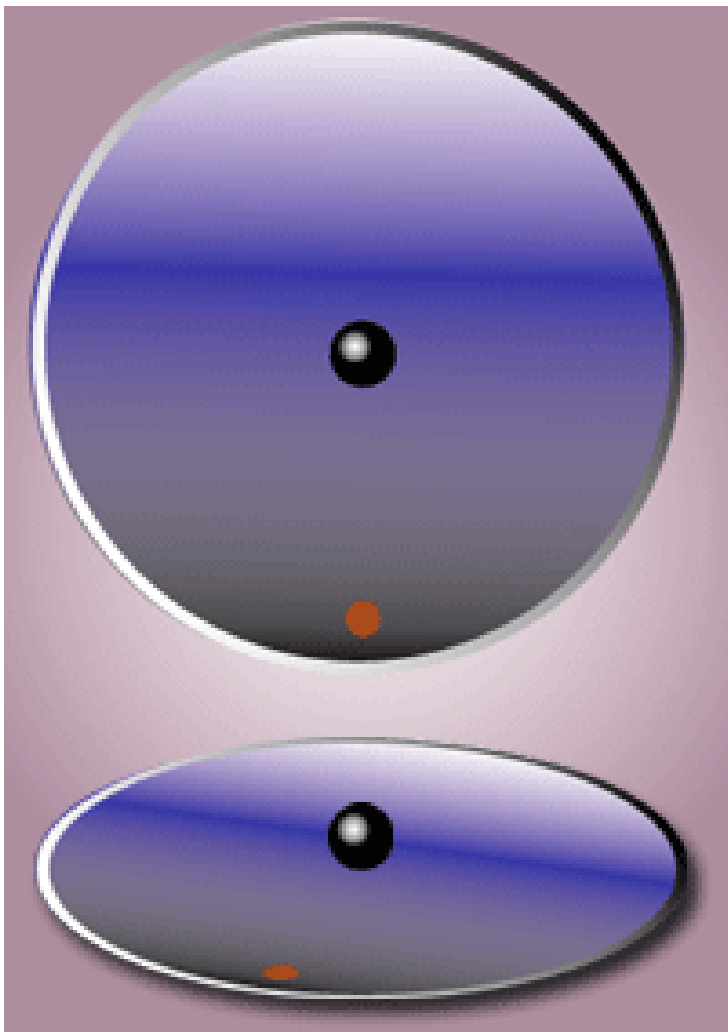
1. **地球引力**: 单位质量气块所受的地球引力 $F_g = -G \frac{M}{r^2} \mathbf{k}$, G 为万有引力常数 $6.674 \times 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$, M 为地球质量, r 为地球半径。 \mathbf{k} 为垂直向上单位向量。

2. **惯性离心力**: 由空气随地球自转而产生, $F_j = \Omega^2 R \mathbf{j}$, R 为气块到地轴的距离, Ω 为地球自转角速度 $7.292 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 。 F_j 方向垂直于地轴向外, \mathbf{j} 为对应单位向量。在极点, $F_j = 0$ 。

- **重力指的是引力和离心力的合力**, 但是由于离心力的大小比引力小2个数量级以上, 因此一般认为地球的重力仍与引力相等, 加速度大小约等于 9.8 m s^{-2} 。
- 在一些情况下, 离心力是不能忽略的, 例如, 由于离心力的作用, 地球在赤道的半径比极地的半径大21公里。

气块受力分析 II: 科氏力 (Coriolis Force)

旋转体系中质点的直线运动



科里奥利力或科氏力，属于惯性力，是一种表观力，它描述了在旋转体系中进行运动的质点由于惯性而相对于旋转体系产生偏移的现象。对于大气的水平运动，其表现为地转偏向力。

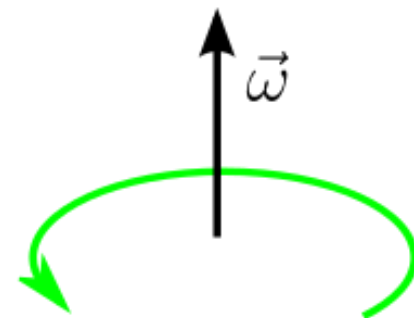
对于单位质量的质点：

$$F_c = -2\omega \times V$$

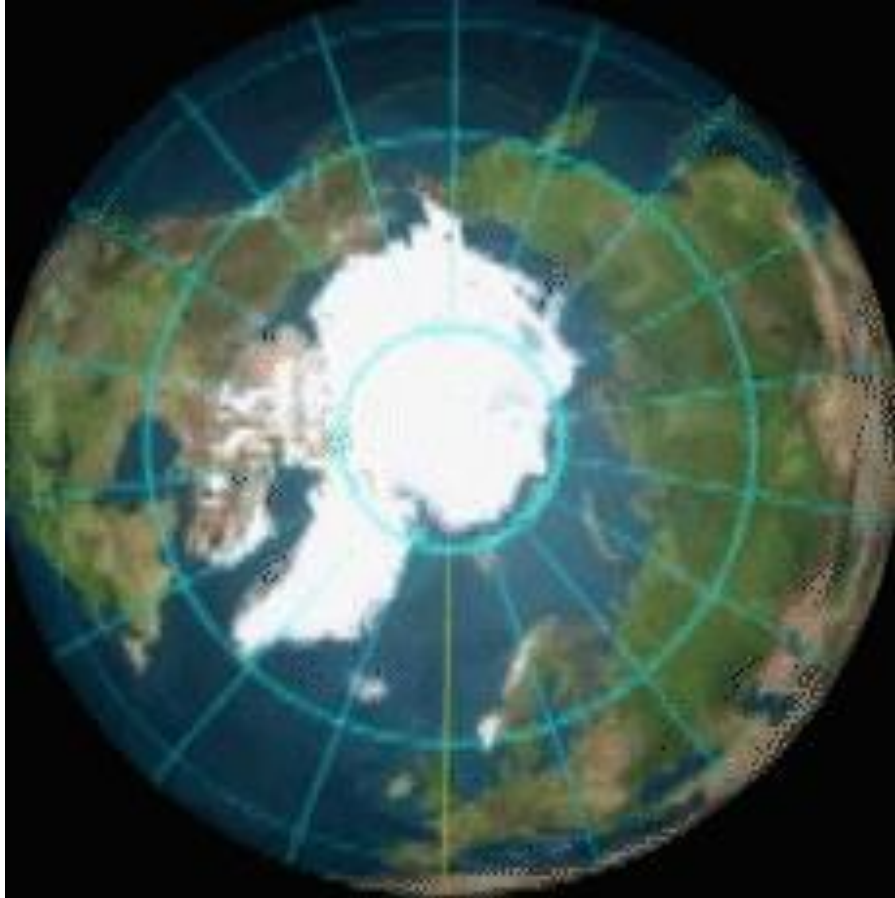
F_c : 科氏力

ω : 旋转参考系的角速度

V : 质点相对于旋转参考系的速度



气块受力分析 II：科氏力



单位质量的气块受到的地转偏向力：

$$F_c = -(2\Omega \sin \phi) \mathbf{k} \times \mathbf{U}$$

Ω ：地球自转角速度

U ：气块的水平运动速度

ϕ ：纬度

在北半球，背风而立，科氏力使风偏向右。

在南半球，背风而立，科氏力使风偏向左。

在赤道，科氏力为0，在两极，科氏力最大。

其中 $2\Omega \sin \phi$ 经常用 f （科里奥利参数）表示

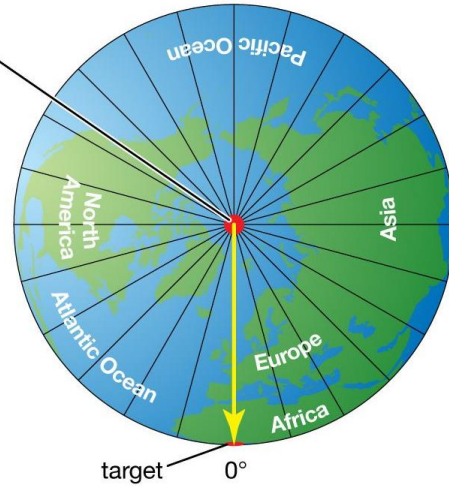
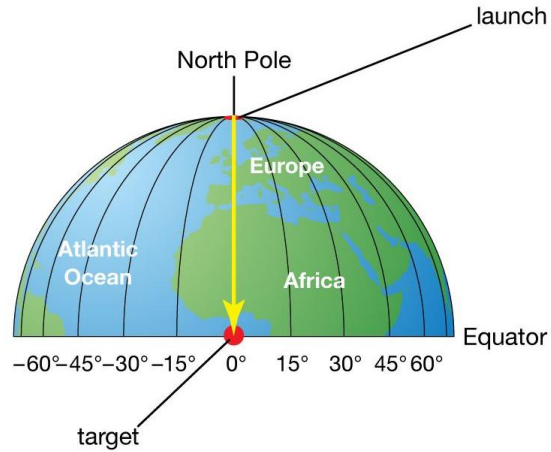
Q：如果地球不是球形的，是柱形的呢？

科氏力存在吗？还能使风向偏移吗？

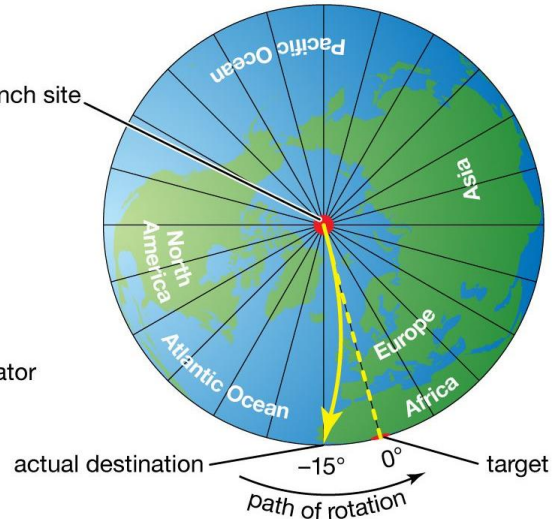
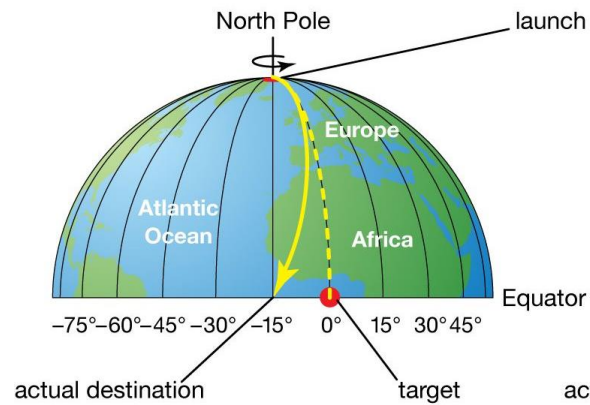
气块受力分析 II: 科氏力

航线偏离

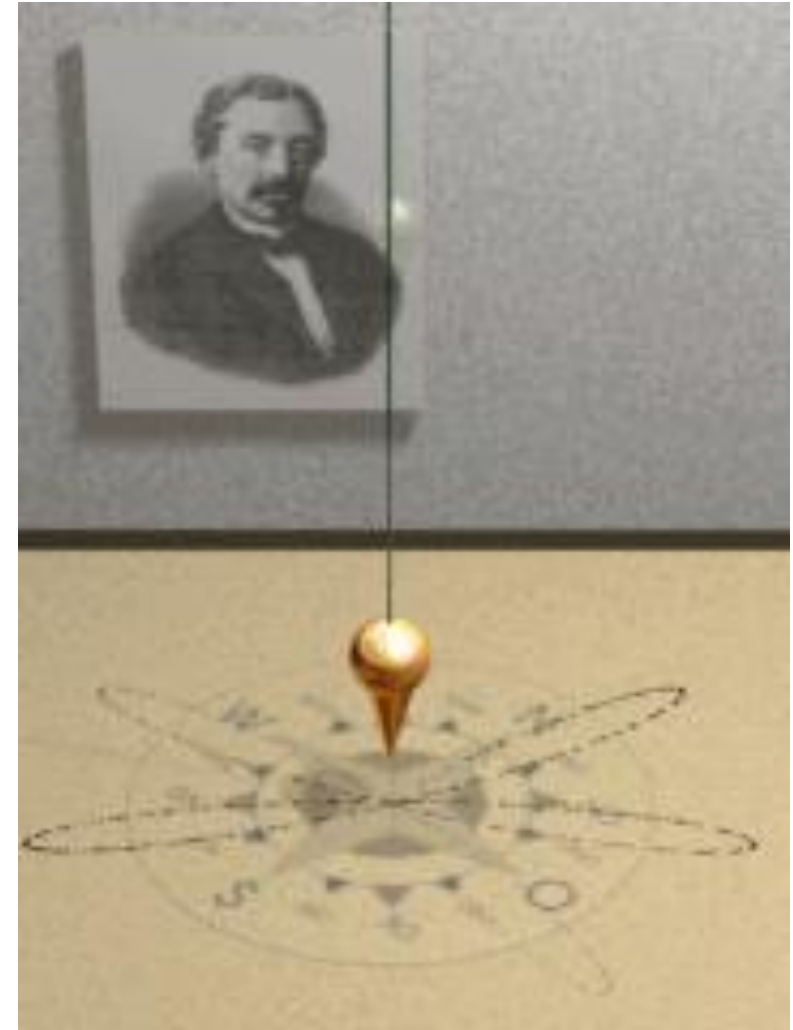
Nonrotating Earth



Earth rotating 15° each hour

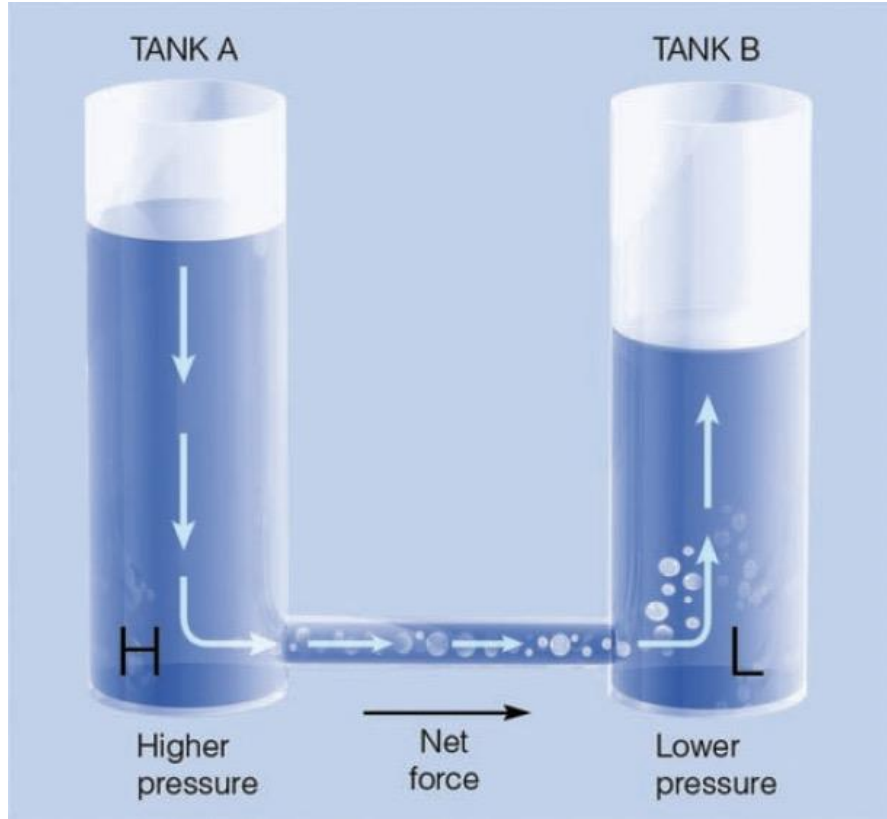


傅科摆 (南/北半球?)

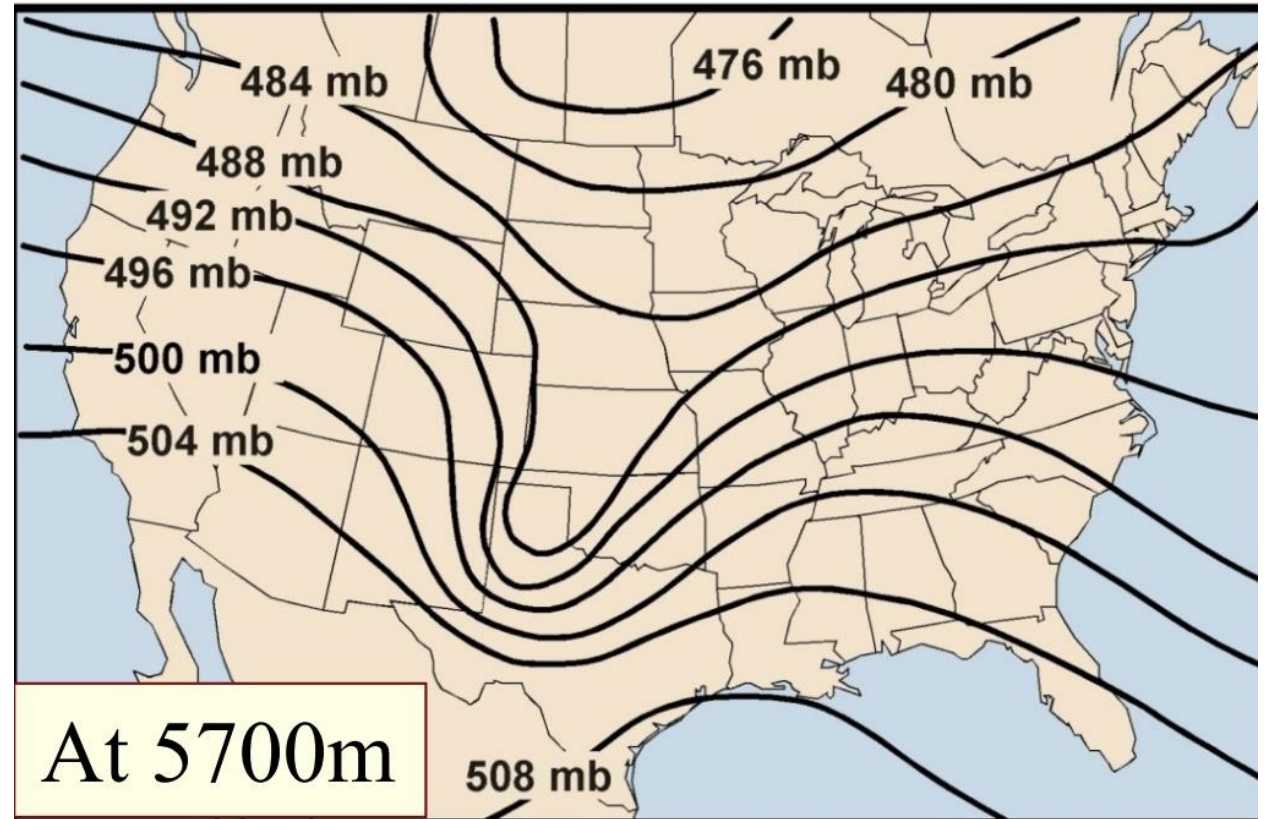


气块受力分析 III：气压梯度力

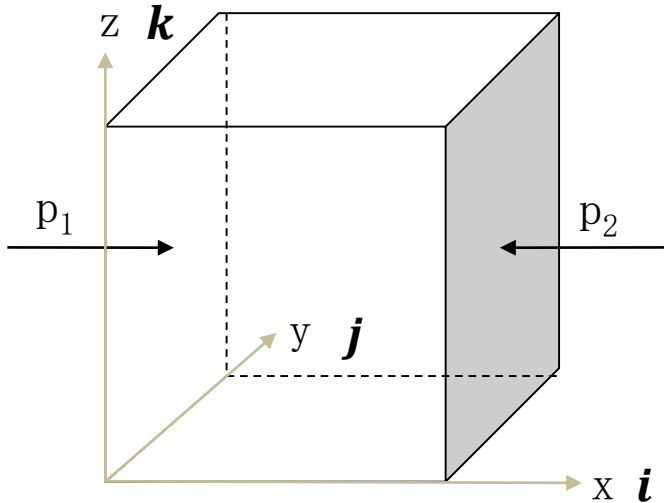
水往低处流



风往低压处吹??



气块受力分析 III：气压梯度力



体积： $\delta V = \delta x \delta y \delta z$

面积： $\delta S = \delta y \delta z$

质量： $\delta m = \rho \delta V = \rho \delta x \delta y \delta z$

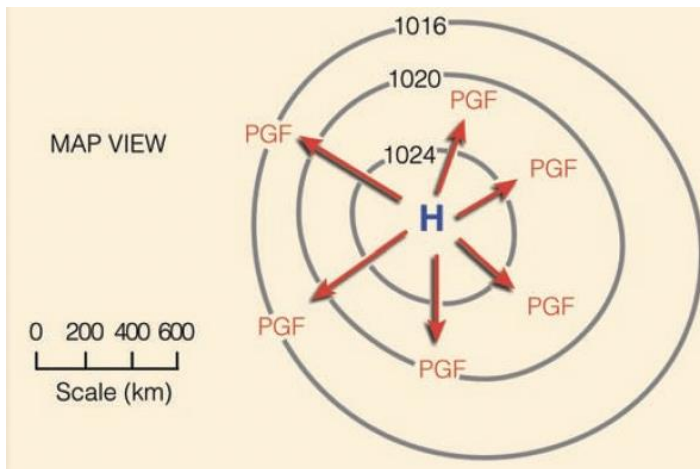
x方向上的压力差为： $\delta F_x = \delta p \delta S = (p_2 - p_1) \delta y \delta z$

x方向上单位质量的气压梯度力： $F_{p,x} = \frac{\delta F_x}{\delta m} \rightarrow -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x}$

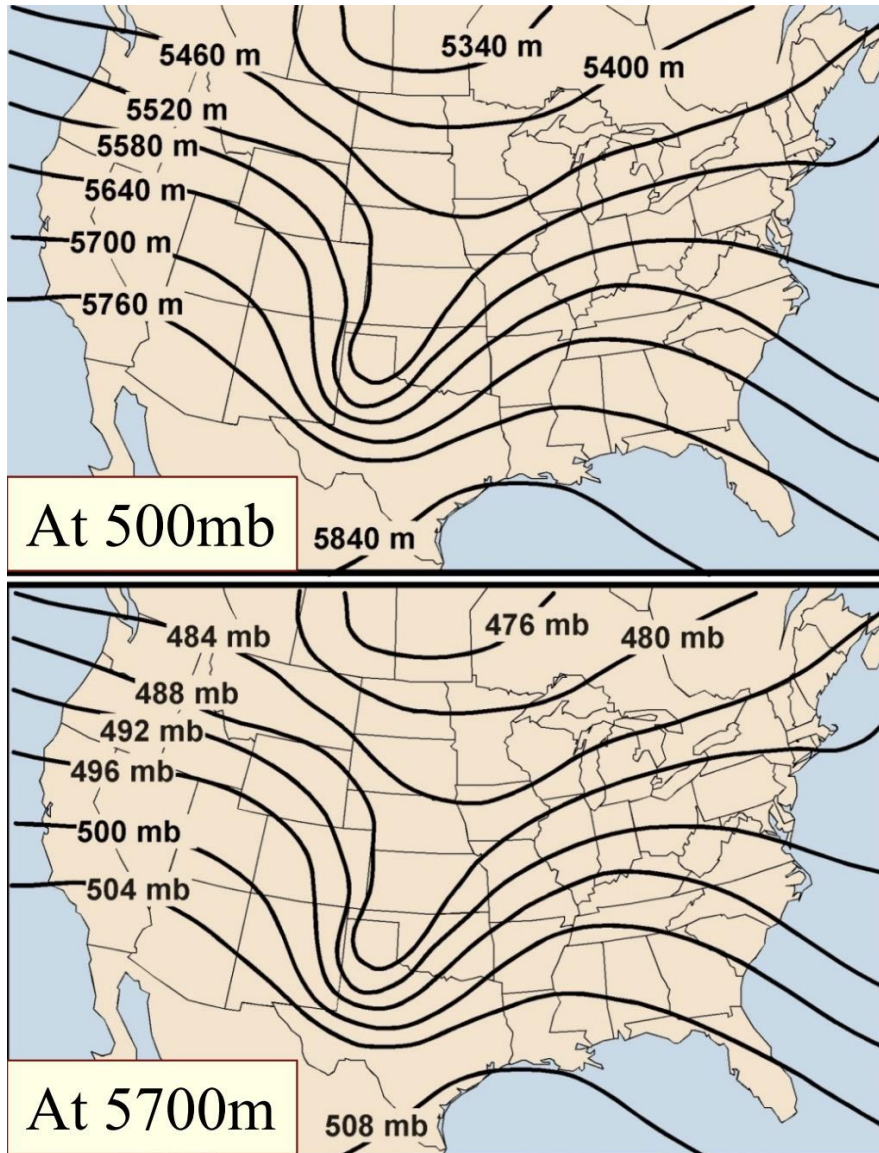
类似地，y方向上单位质量的气压梯度力： $F_{p,y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y}$

用矢量表示： $\mathbf{F}_p = -\frac{1}{\rho} \nabla p$

梯度算子 $\nabla = (\mathbf{i} \frac{\partial}{\partial x}, \mathbf{j} \frac{\partial}{\partial y}, \mathbf{k} \frac{\partial}{\partial z})$



气压梯度力的另一种表达方式



定义高度 z 处的重力位势 $\Phi(z) = \int_0^z g dz$

重力位势 $\Phi(z)$ 代表把单位质量的物体从平均海平面抬升到 z 处所做的功

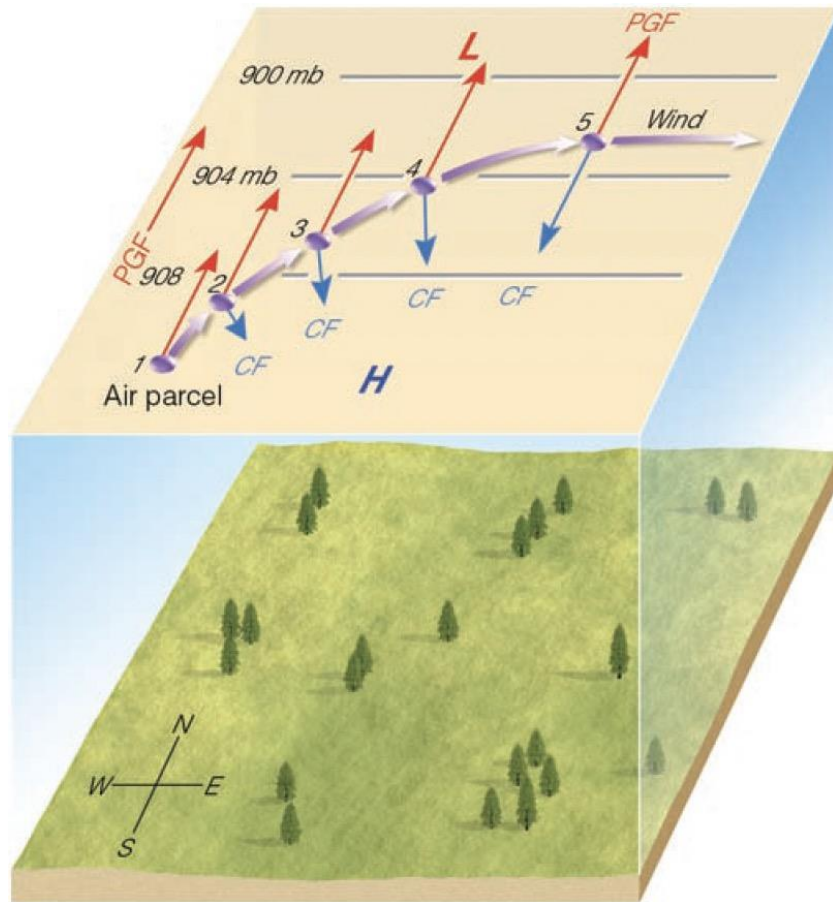
静力平衡时, $\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g$

此时, x 方向上的气压梯度力也可以写成压强坐标下位势梯度的形式

$$-\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)_z = -g \left(\frac{\partial z}{\partial x} \right)_p = - \left(\frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)_p$$

$$\mathbf{F}_p = -\frac{1}{\rho} \nabla p = -\nabla \Phi$$

气压梯度力和科氏力平衡下的气块运动：地转风



- 气压梯度力和科氏力平衡时的水平空气运动称为地转风 (geostrophic wind)
- 地转风 $V_g = iu_g + jv_g$
- 地转风的风向和风速可以由下式计算：

$$fV_g = k \times \frac{1}{\rho} \nabla p$$

$$V_g = k \times \frac{1}{f\rho} \nabla p = k \times \frac{\nabla \Phi}{f}$$

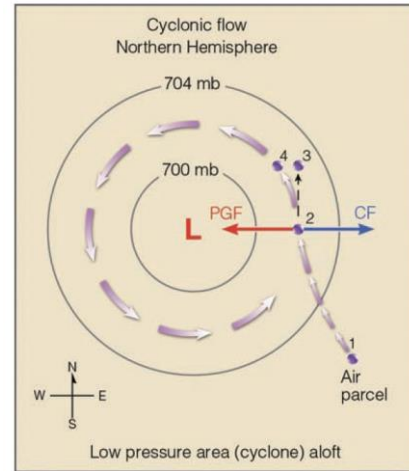
北半球：气压梯度力的方向顺时针旋转90度
南半球：气压梯度力的方向逆时针旋转90度

Q：气压梯度力和科氏力平衡这一近似（地转近似）适用于什么样的运动？
远离赤道和边界层的大尺度（千公里以上）运动

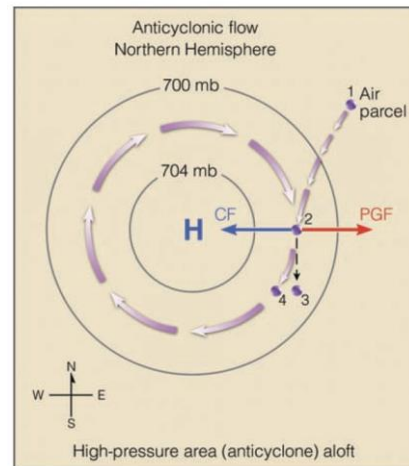
气压梯度力和科氏力导致的气块曲线运动：梯度风

科氏力和气压梯度力引起向心加速度

北半球低压
(气旋)



北半球高压
(反气旋)



$$\frac{V^2}{R} = \left| -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} \right| - fV$$

$$V = -\frac{fR}{2} + \sqrt{\left(\frac{f^2 R^2}{4} + \left| -\frac{R}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} \right| \right)} < V_g$$

$$\frac{V^2}{R} = fV - \left| -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} \right|$$

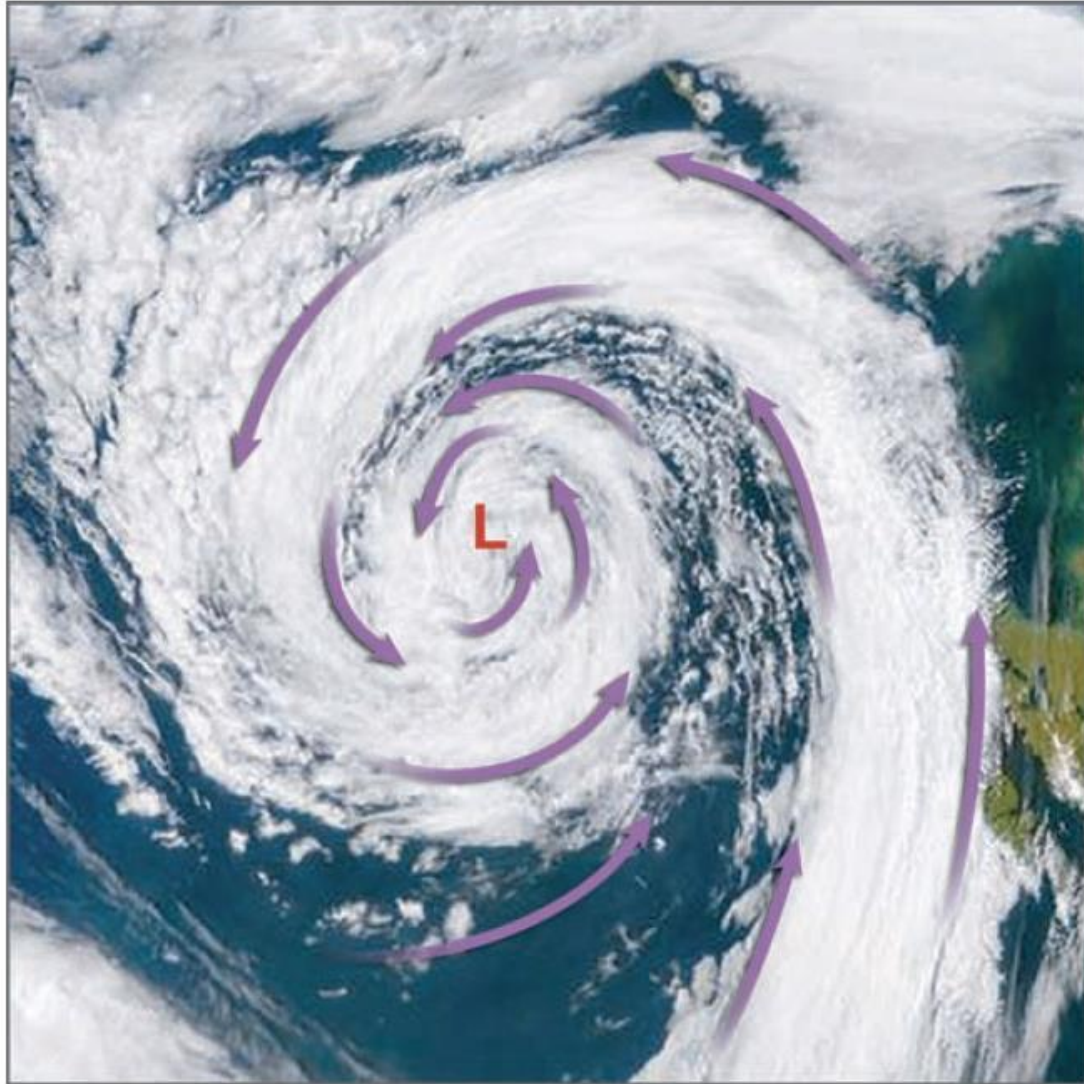
$$V = \frac{fR}{2} - \sqrt{\left(\frac{f^2 R^2}{4} - \left| -\frac{R}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} \right| \right)} > V_g$$

n为法线方向坐标

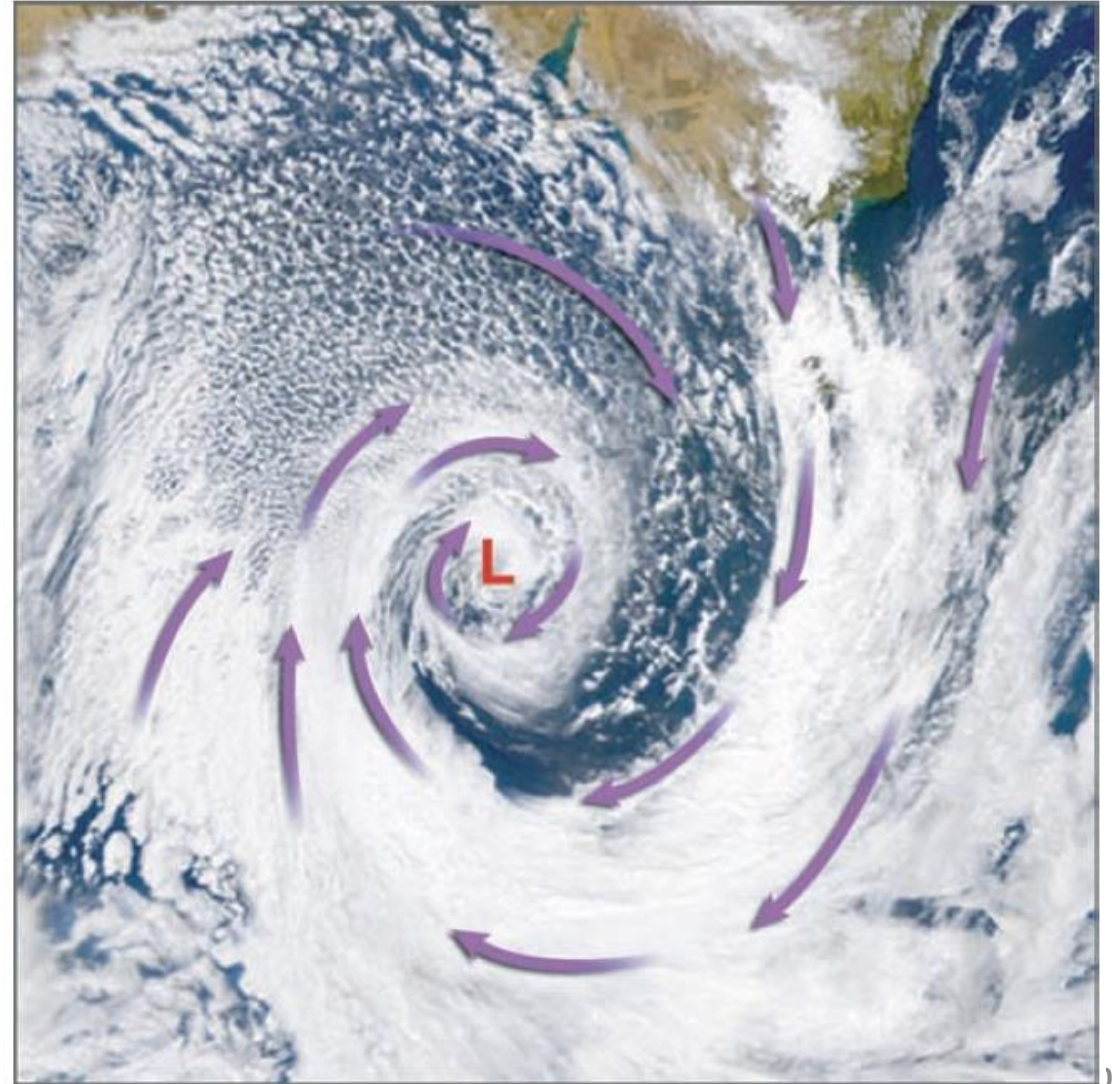
$$\left| -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} \right| \leq \frac{f^2 R}{4}$$

北半球和南半球的气旋运动

北半球



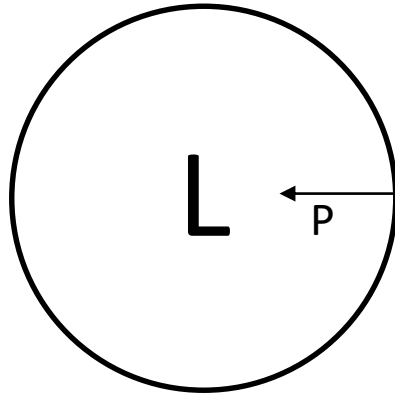
南半球



气压梯度力导致向心加速度的运动：旋转风

- 空间尺度 (R) 较小，科氏力变得不重要，气压梯度力导致向心加速度。
- 龙卷风属于这种运动。

$$\frac{V^2}{R} = \left| -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} \right|$$
$$V = \sqrt{\left(\left| -\frac{R}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} \right| \right)}$$



- 低压中心还是高压中心？
- 顺时针还是逆时针运动？
- 在北半球观测到的大多数龙卷风都是逆时针旋转（气旋），这是因为它们处于有利于气旋性旋转的环境中。
- 尺度更小的涡旋，如尘卷、水龙卷等，并没有明确的旋转方向，它们发生气旋和反气旋性旋转的可能性基本相同。

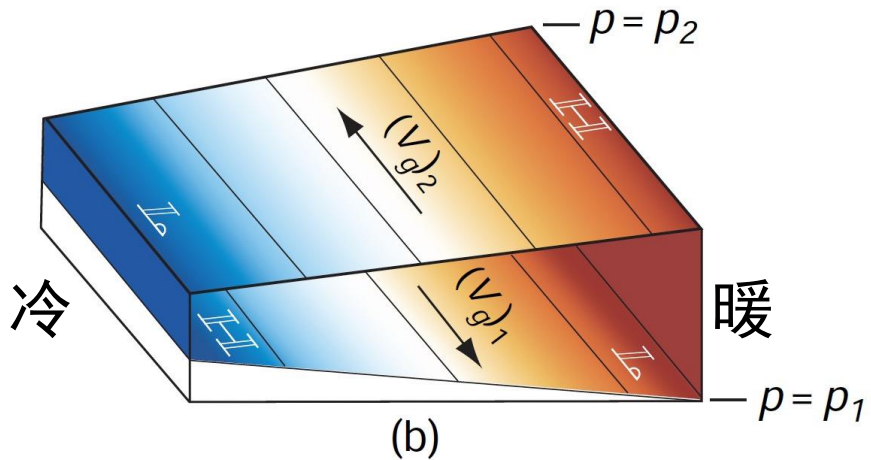
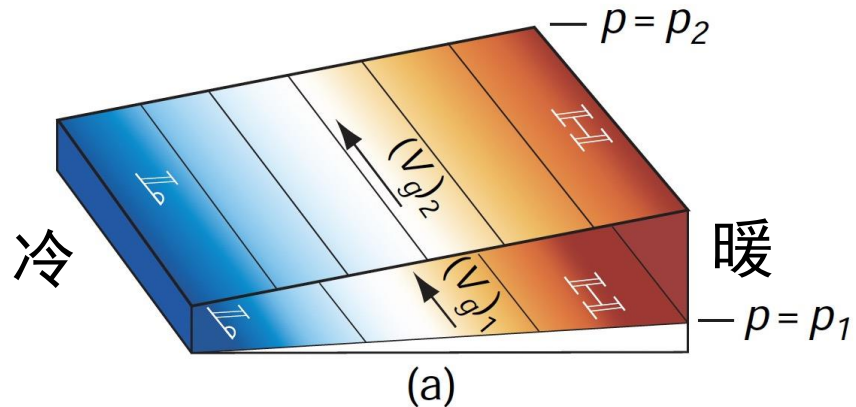
一个典型的中纬度龙卷风， $R = 300 \text{ m}$, $V = 30 \text{ m s}^{-1}$

科氏力加速度 $-2\Omega \sin \phi \mathbf{k} \times \mathbf{U}$ 的大小 $\sim 10^{-3} \text{ m s}^{-2}$

向心加速度大小 $\frac{V^2}{R} \sim 3 \text{ m s}^{-2}$

地转风的垂直梯度：热成风 Thermal Wind

热成风 (V_T) 是由于水平温度梯度引起的地转风随高度发生风速或风向的变化。



$$V_{g1} = k \times \frac{1}{f\rho} \nabla p = k \times \frac{\nabla\Phi_1}{f}$$

$$V_{g2} = k \times \frac{1}{f\rho} \nabla p = k \times \frac{\nabla\Phi_2}{f}$$

$$V_T = V_{g2} - V_{g1} = k \times \frac{\nabla(\Phi_2 - \Phi_1)}{f}$$

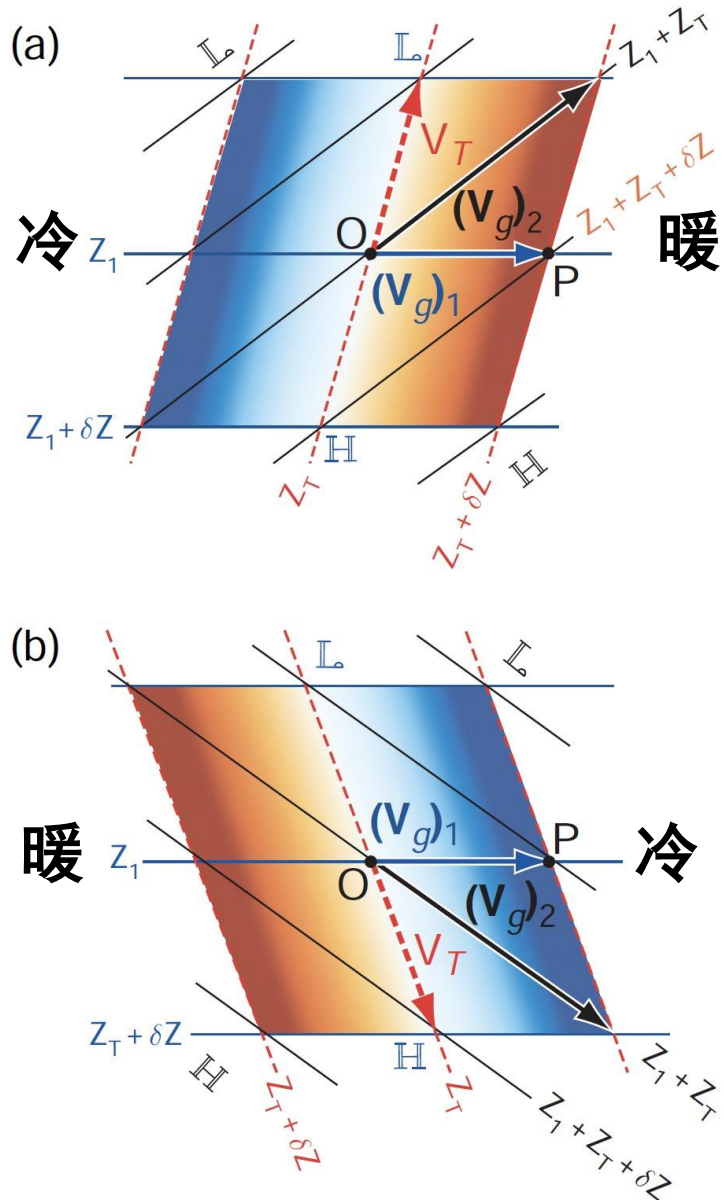
根据大气热力学，两等压面间的气层厚度（位势差）反映该气层平均温度的高低。

$$\Phi_2 - \Phi_1 = R\bar{T} \ln \frac{p_1}{p_2}$$

$$V_T = V_{g2} - V_{g1} = \left(\frac{R}{f} \ln \frac{p_1}{p_2}\right) k \times \nabla\bar{T}$$

热成风方向垂直于温度梯度，在北半球是低温 → 高温方向逆时针旋转90度，南半球相反。

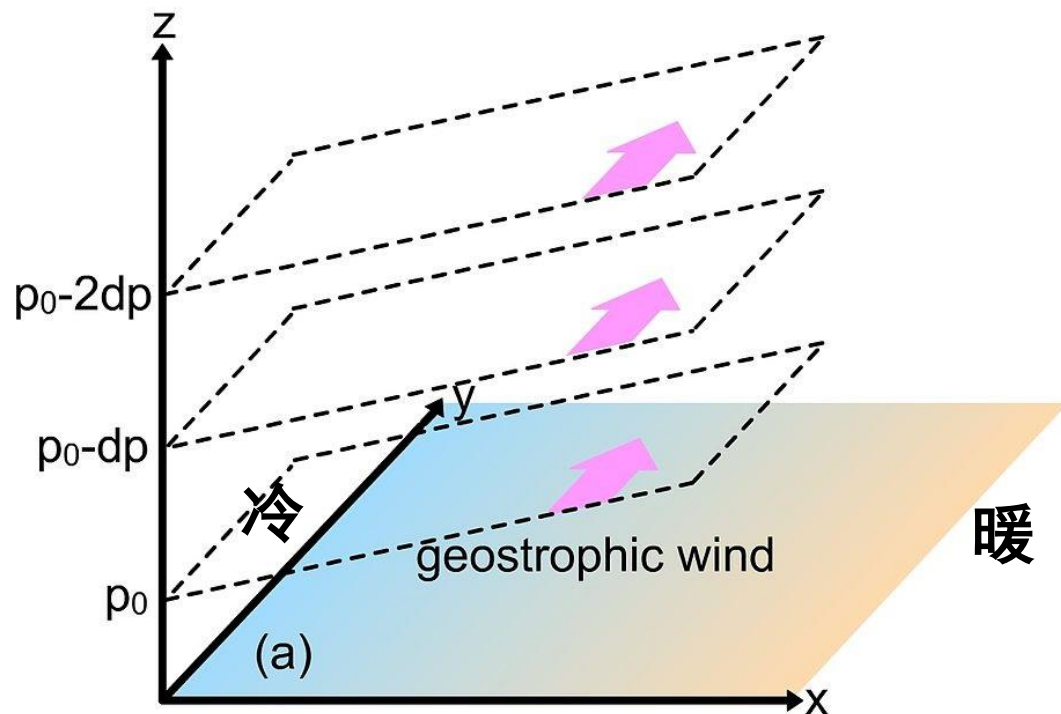
热成风与冷/暖平流



- 如果地转风沿着温度梯度方向的分量不为零，热成风将导致地转风随高度旋转。
 - ✓ 如果地转风从冷空气吹向暖空气（**冷平流**），地转风将**随高度逆时针旋转**（在北半球）。
 - ✓ 如果地转风从暖空气吹向冷空气（**暖平流**），风将**随高度顺时针旋转**。
- 据此可以使用大气运动的探测数据来估计水平温度梯度；或由水平温度梯度和某一层大气的运动估算上一层或者下一层大气的运动。
- 另外，冷/暖平流可能导致温度梯度锐化，形成锋面。

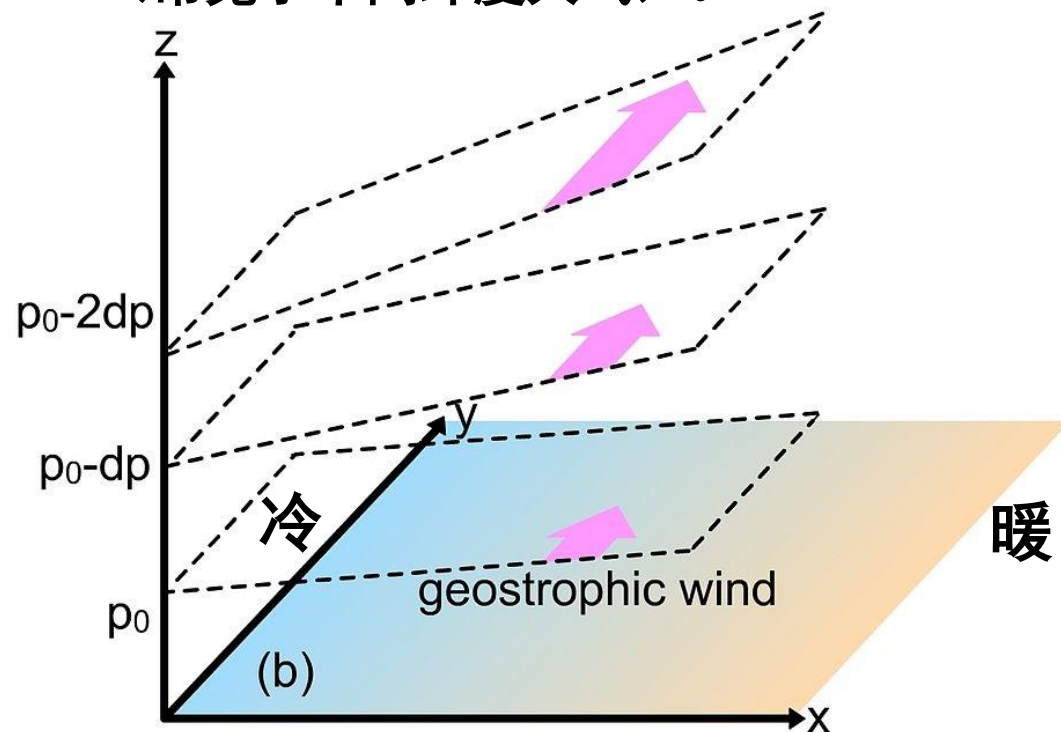
热成风、斜压不稳定与温带气旋发展

正压大气: Barotropic atmosphere, 大气密度只是压力的函数, 等压面也是等密度面和等温面 (常见于热带大气)。



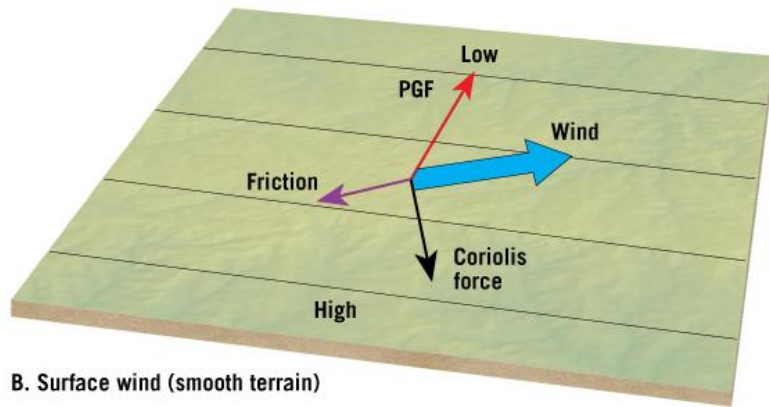
地转风与高度无关, 大尺度运动只依赖水平位置和时间, 不依赖于高度。

斜压大气: Baroclinic atmosphere, 大气密度是压力和温度的函数, 等压面不平行, (常见于中高纬度大气)。

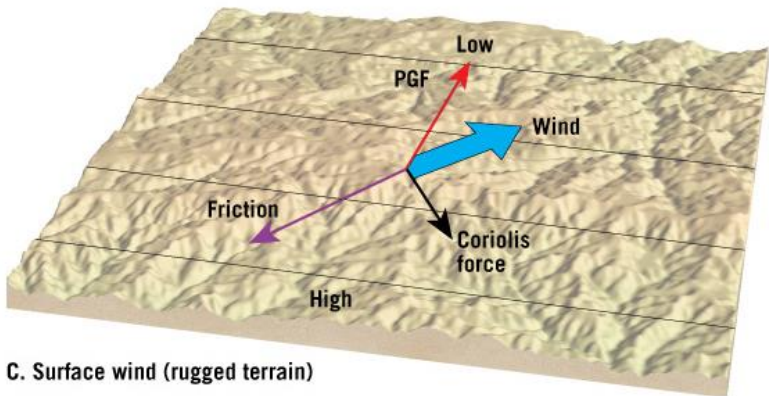


温度梯度大 \rightarrow 斜压性大、水平风的垂直切变大 \rightarrow 斜压不稳定 \rightarrow 温带气旋发展

气块受力分析 IV：边界层摩擦力



B. Surface wind (smooth terrain)



C. Surface wind (rugged terrain)

在**大气边界层内**(0-1000米)，由于**地面的摩擦**而产生摩擦力。

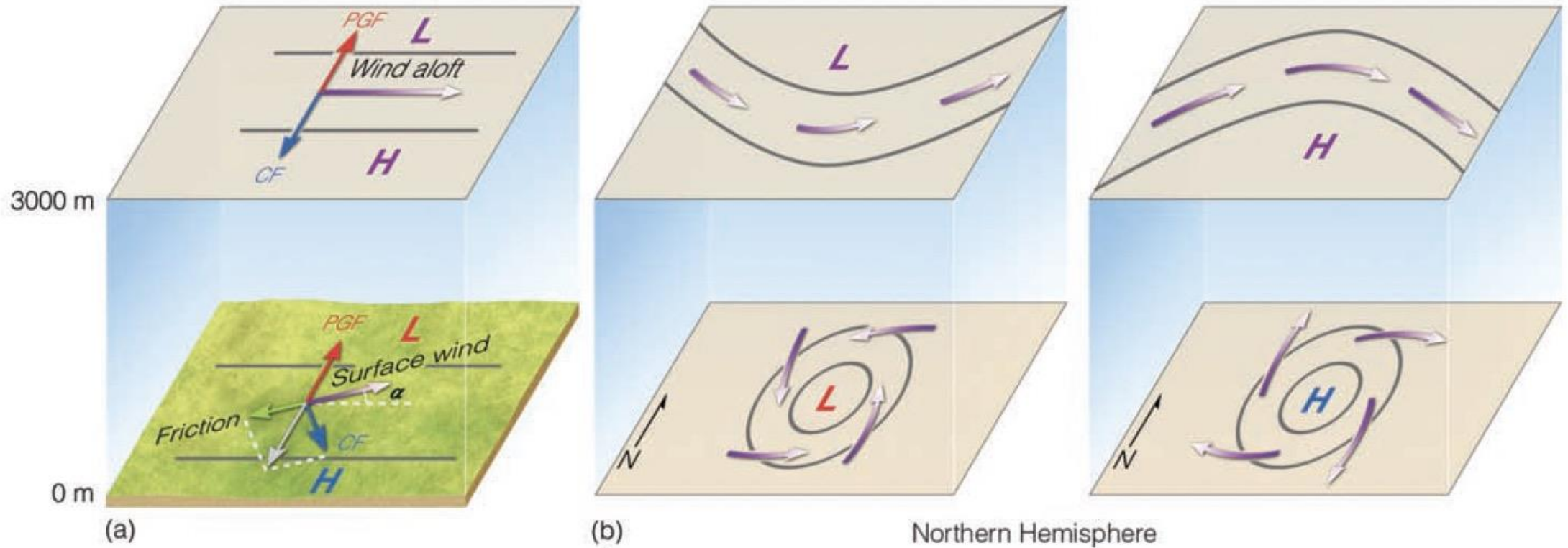
摩擦力大小与水平风速的垂直梯度有关，方向与风向相反：

$$F_f = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau}{\partial z}$$
$$\tau \approx -\rho C_D V|V|$$

τ 是切向应力（表征水平动量的垂直交换速率）， C_D 是摩擦系数（跟地表的粗糙程度和近地面大气的稳定度有关）， V 是速度。

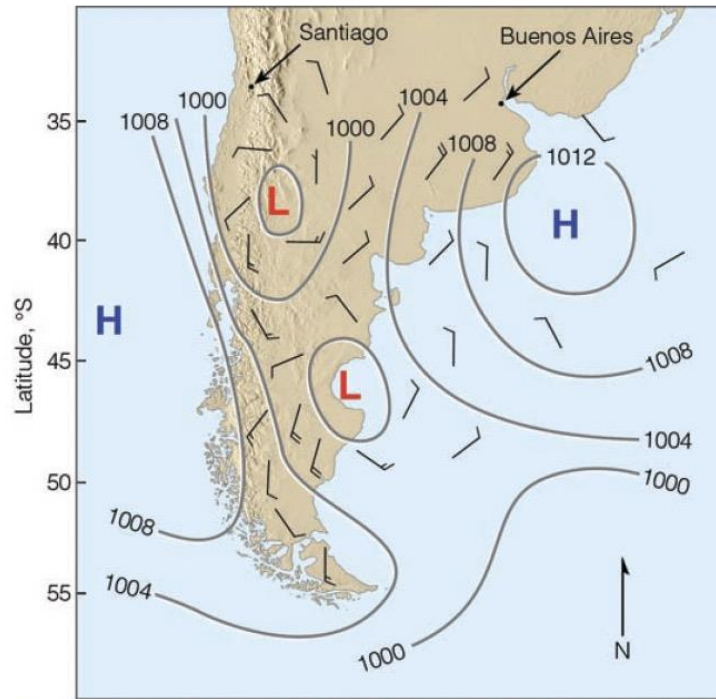
北半球气压梯度力、科氏力和摩擦力作用下的运动

中高层大气在没有摩擦力的情况下，大气运动基本上是气压梯度力和科氏力作用下的运动。

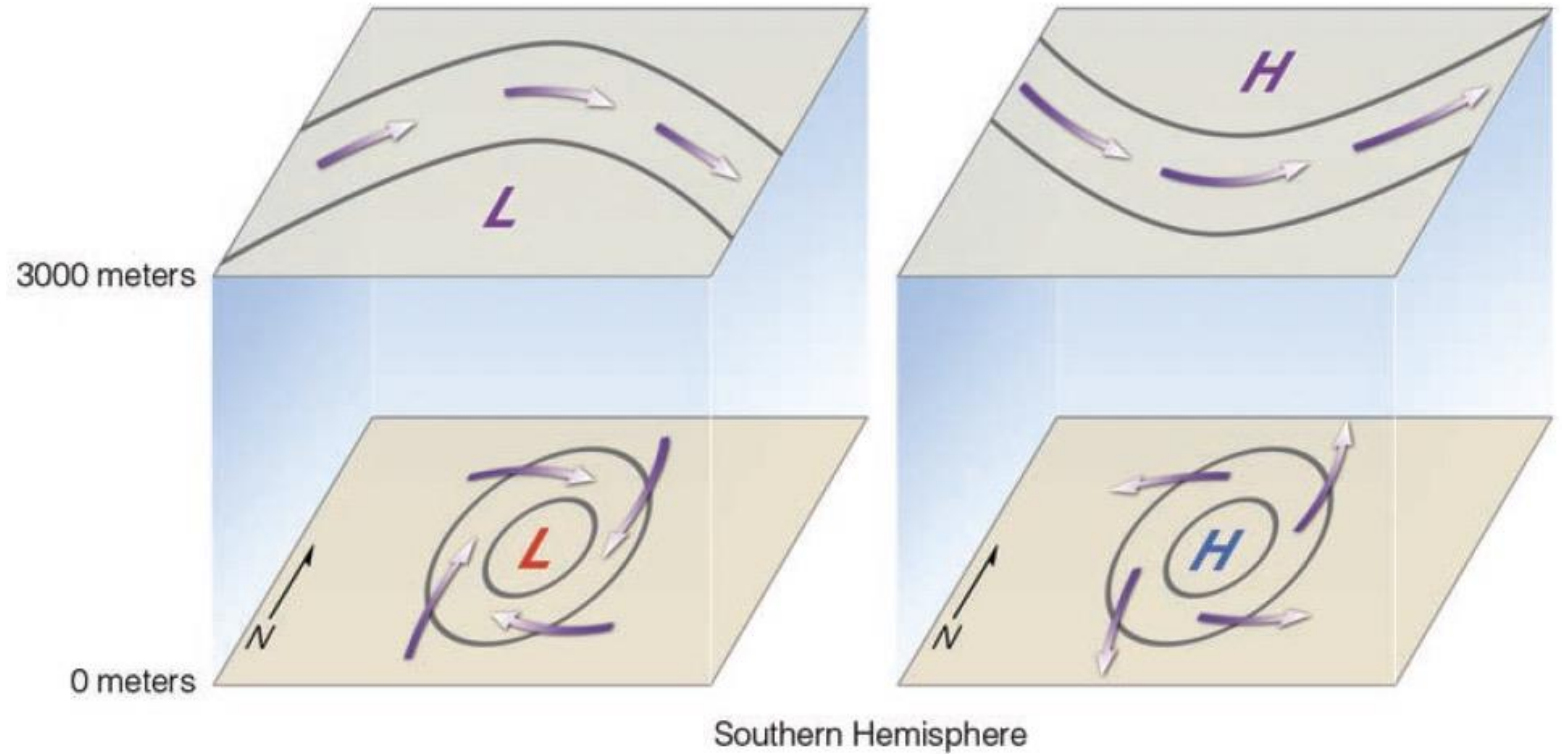


近地面层的大气在有摩擦力的情况下，大气运动是气压梯度力、科氏力和摩擦力三者作用下的运动。

南半球气压梯度力、科氏力和摩擦力作用下的运动

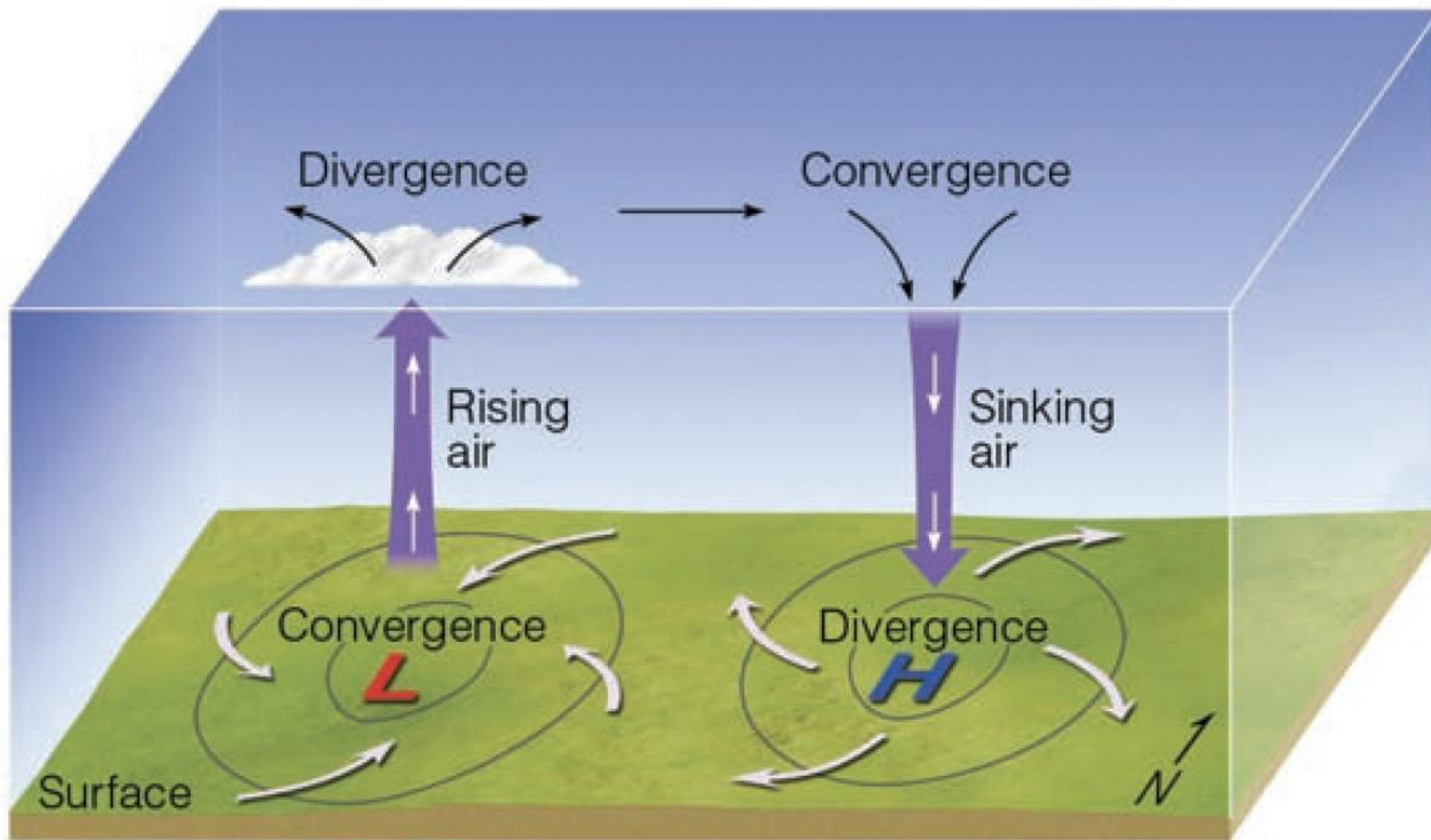


● FIGURE 8.33 Surface weather map showing isobars and winds on a day in December in South America.

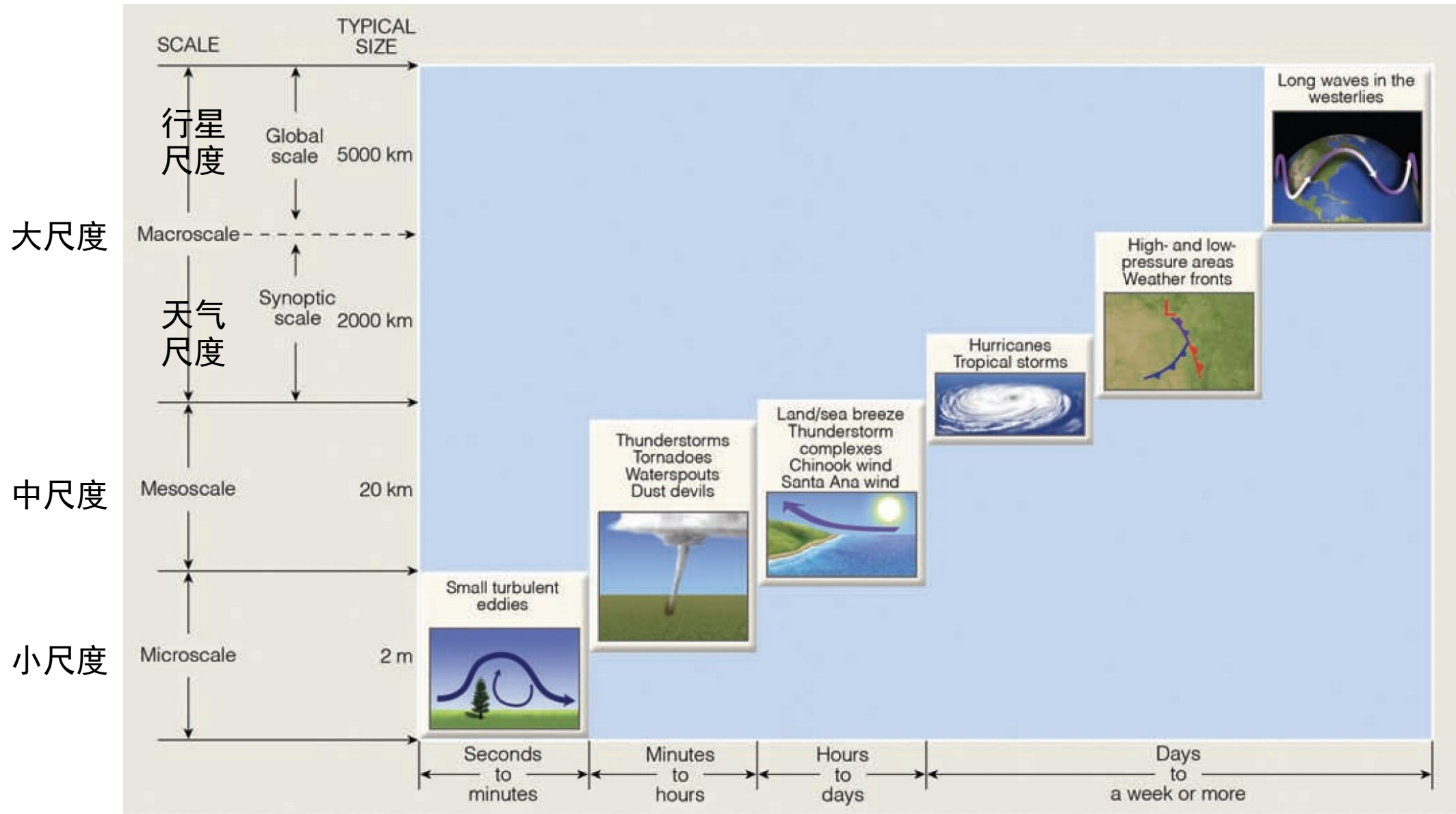


Q: 我们怎么知道这是地面天气图?

垂直运动：地面低压对应着辐合上升，地面高压对应着辐散下沉



地球大气运动的时间和空间尺度



描述大尺度大气运动的原始方程 Primitive Equations

水平运动

$$\frac{d\mathbf{V}}{dt} = -\nabla\Phi - f\mathbf{k} \times \mathbf{V} + \mathbf{F} \quad \mathbf{V} = (u, v)$$

垂直运动（静力平衡时）

$$\frac{\partial\Phi}{\partial p} = \frac{-RT}{p}$$

测高方程

能量守恒

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\kappa T}{p} \omega + \frac{J}{c_p} \quad \kappa = R/c_p$$

质量守恒（静力平衡时）

$$\frac{\partial\omega}{\partial p} = -\nabla \cdot \mathbf{V}$$

连续性方程

下边界条件

$$\frac{\partial p_s}{\partial t} = -\mathbf{V}_s \cdot \nabla p_s - w_s \frac{\partial p}{\partial z} - \int_0^{p_s} (\nabla \cdot \mathbf{V}) dp$$

未知变量

$$u, v, \omega, \Phi, T$$

J 和 F 需要作参数化

小尺度运动：空间尺度~米，时间尺度~分钟

龙卷



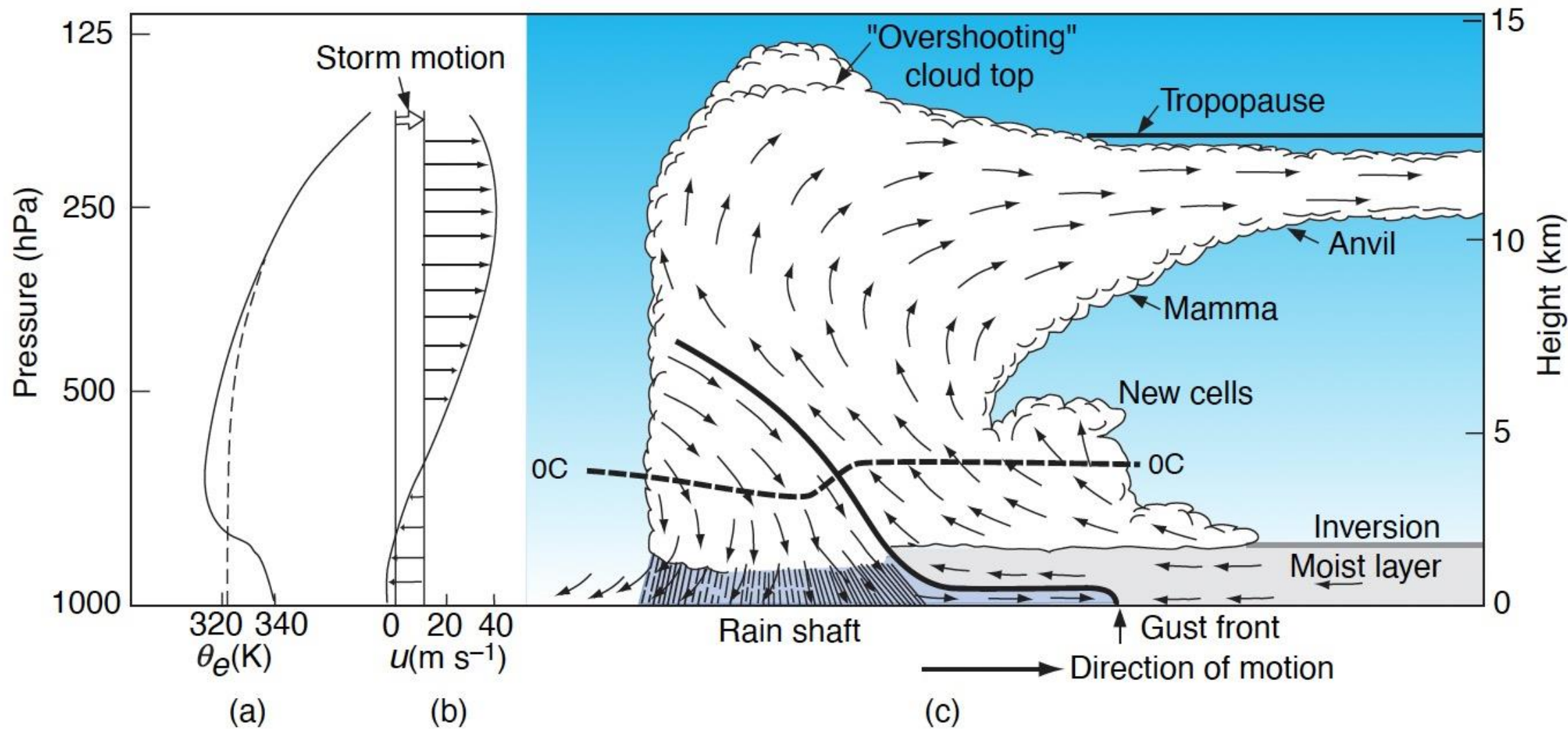
水龙卷



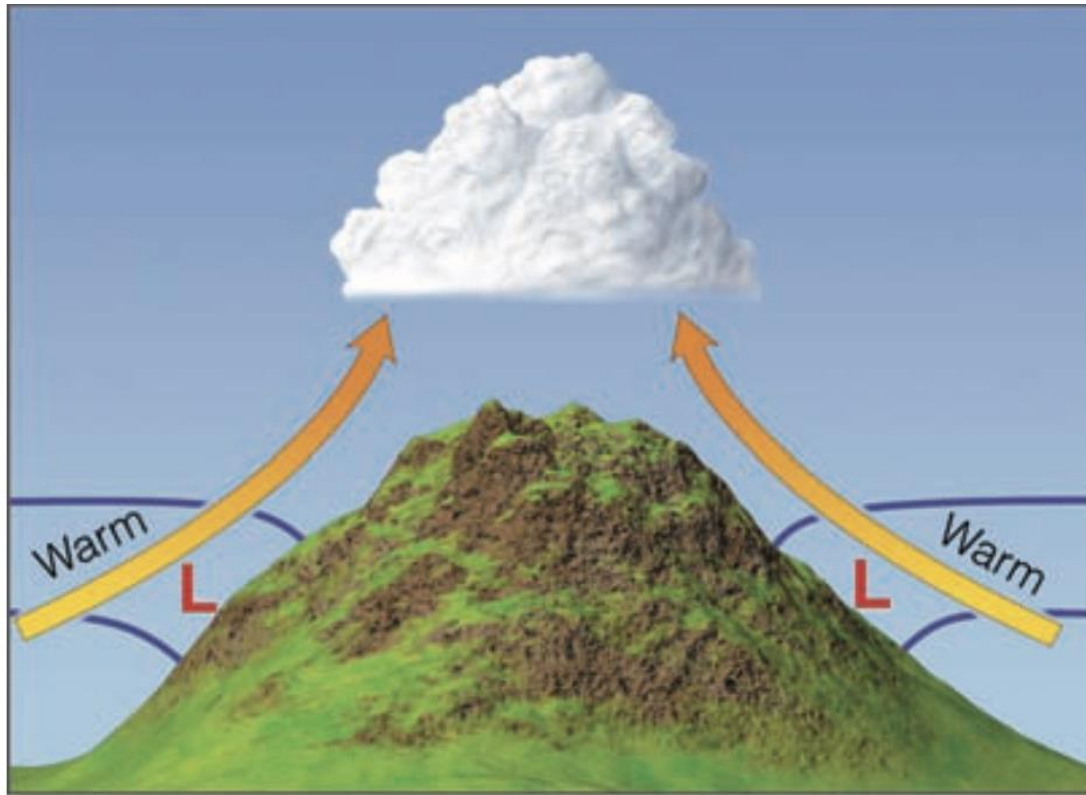
尘卷



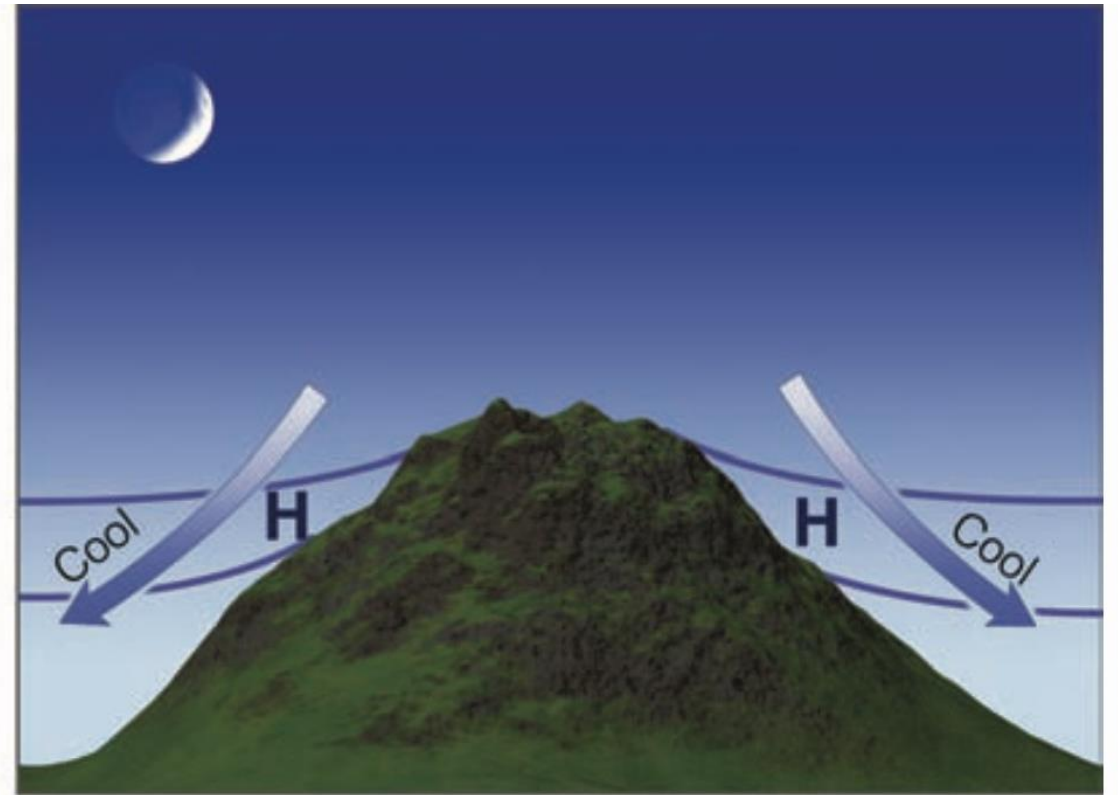
中尺度运动 I: 雷暴, 空间尺度~十千米, 时间尺度~小时



中尺度运动 II: 山谷风



Valley breeze

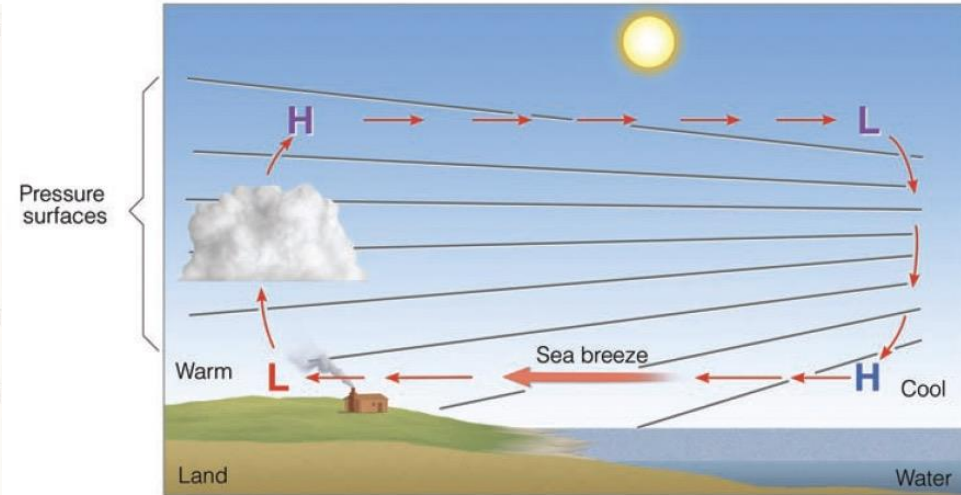
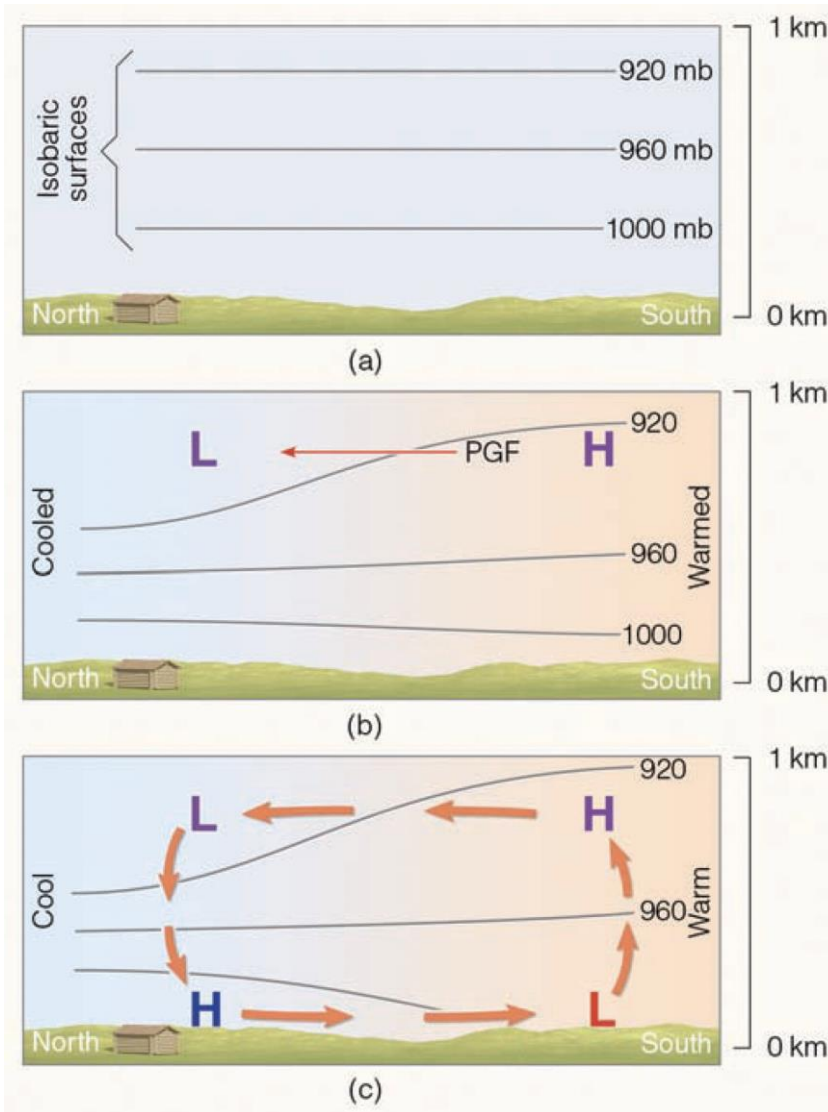


Mountain breeze

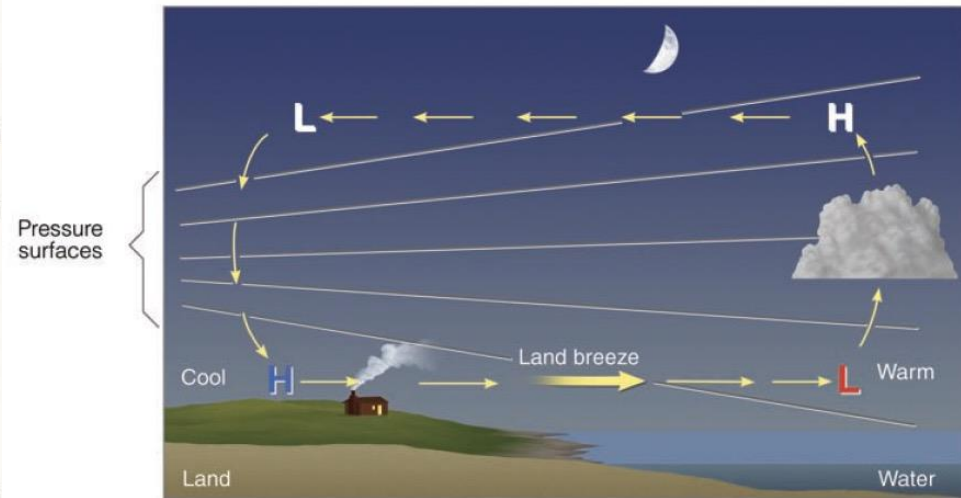
弱背景风下:

- 白天, 山坡受热, 山坡上方的空气抬升, 形成 (自下而上的) 谷风, 午后达到强度峰值。
- 晚上, 情况相反, 形成 (自上而下的) 山风, 日出之前达到强度峰值。

中尺度运动 III: 海陆风, 空间尺度~十公里, 时间尺度~小时



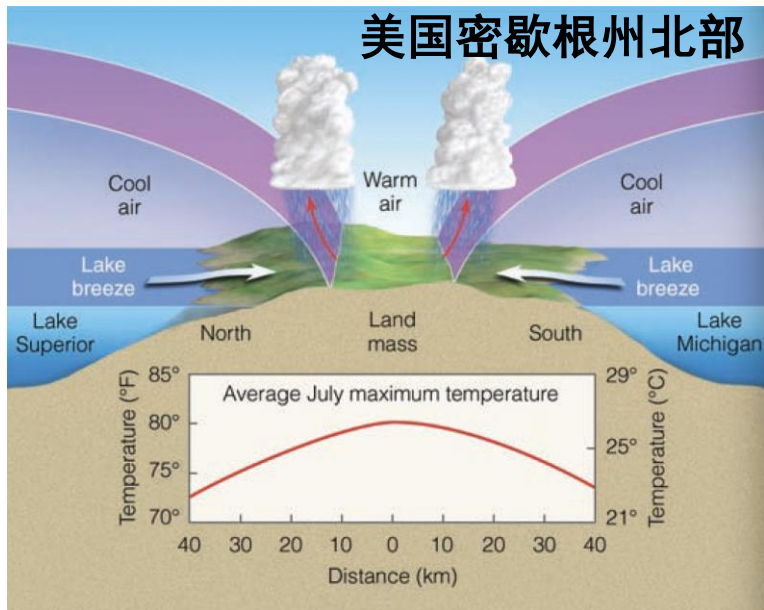
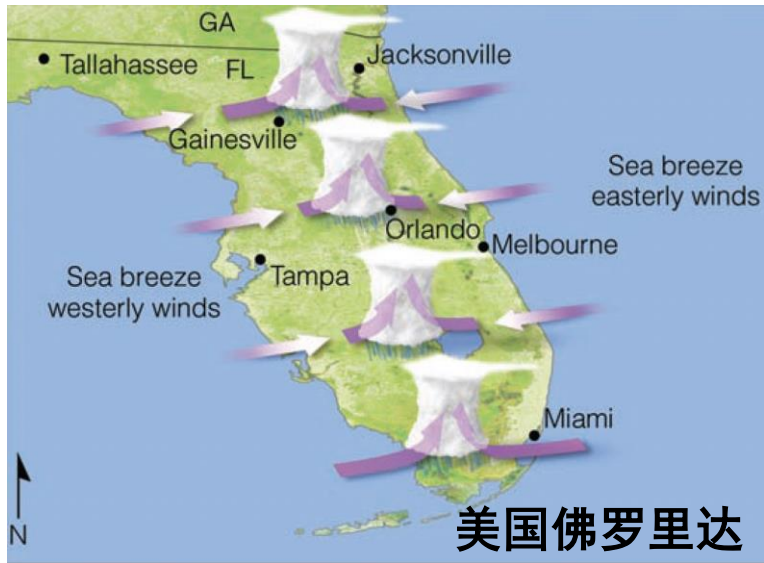
(a) Sea breeze



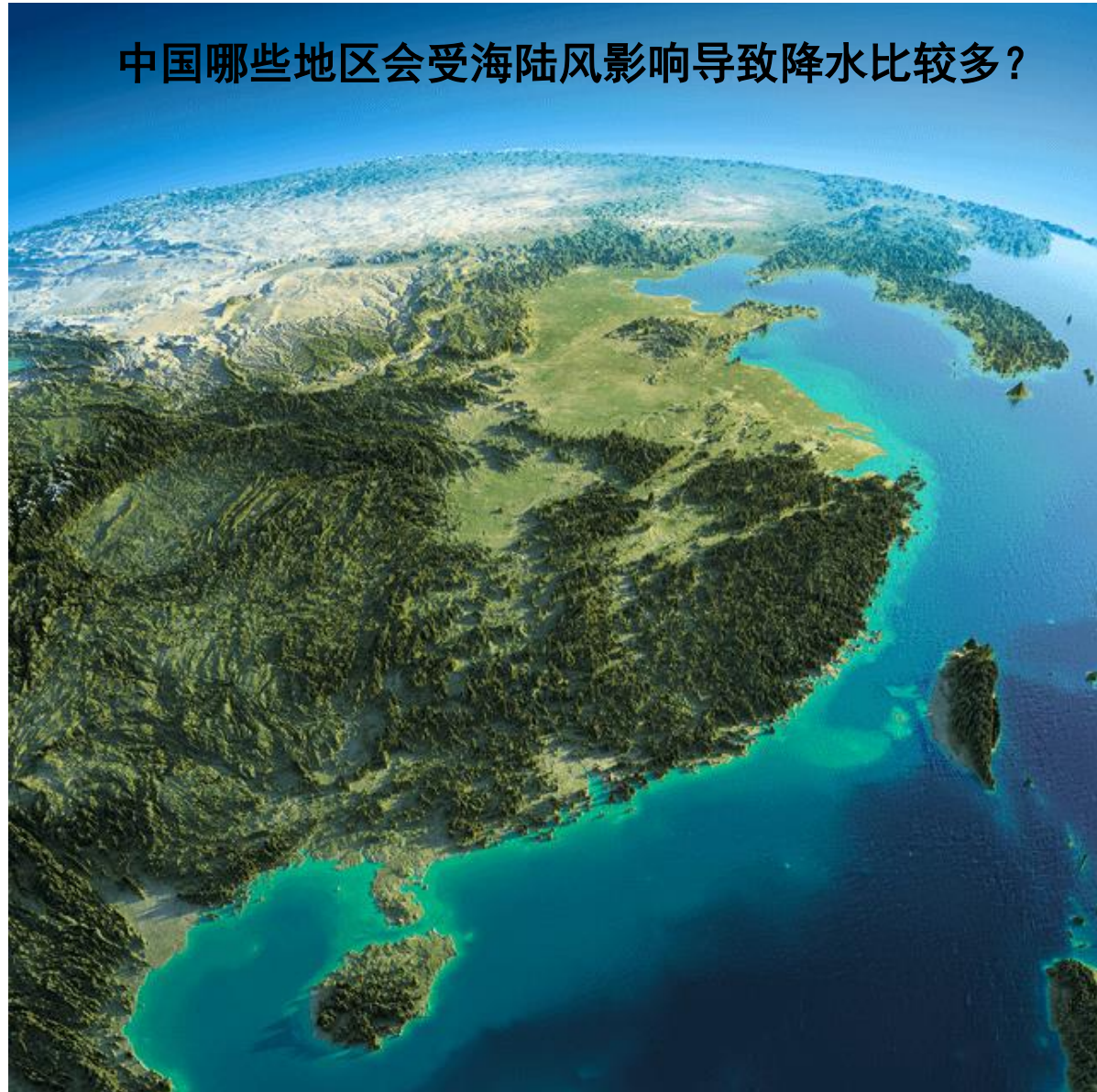
(b) Land breeze

- 白天, 陆面气温高气压低, 海面相反, 气压梯度力方向由水面指向陆面, 出现向岸风; 边界层高层的风向相反。同时, 陆面一侧形成上升气流, 水面一侧形成下沉气流。如空气中水汽较多, 可在陆面一侧形成对流云。
- 晚上, 情况相反。
- 海陆风和山谷风都属于中尺度热力环流。

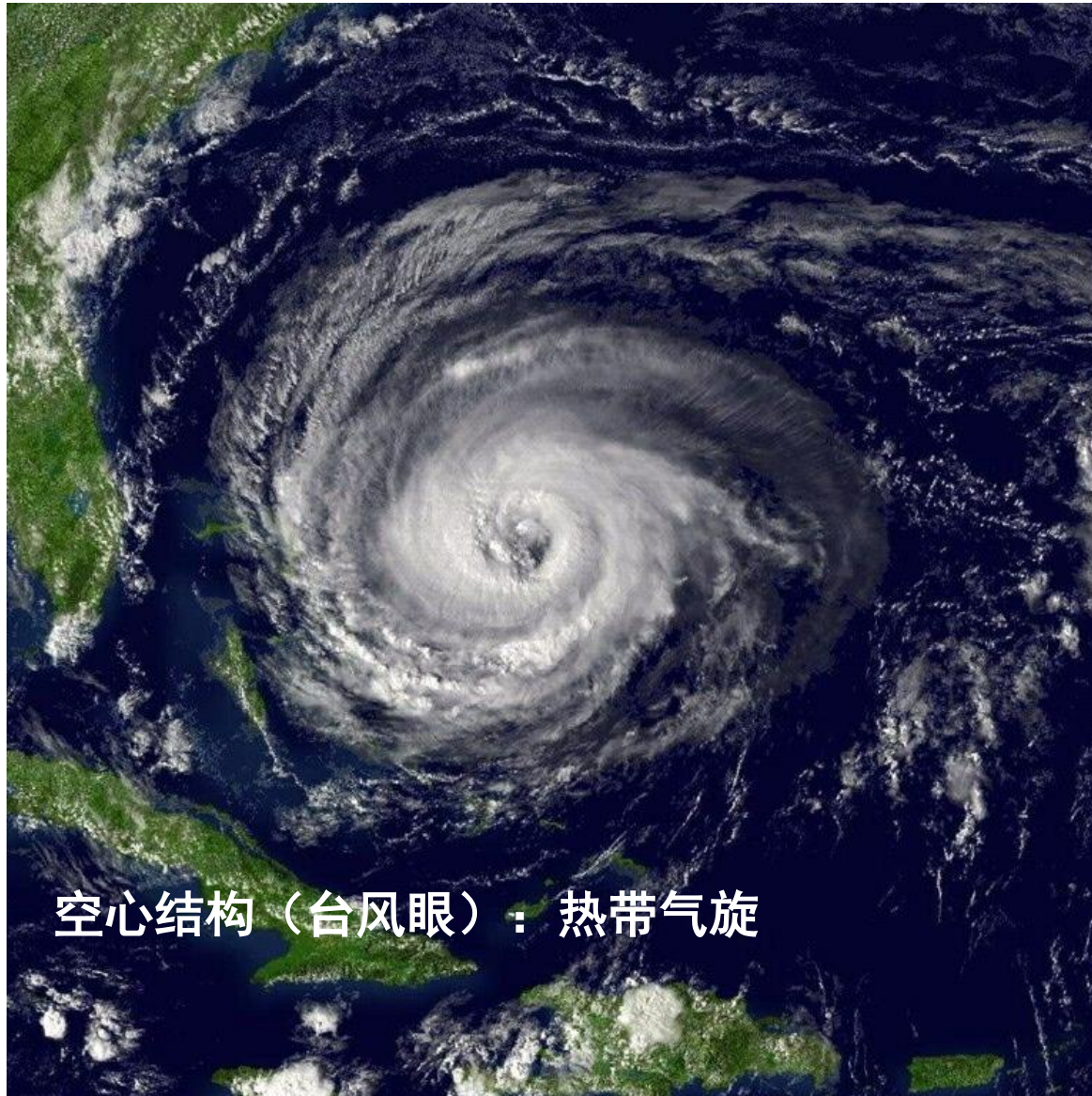
海陆风与降水



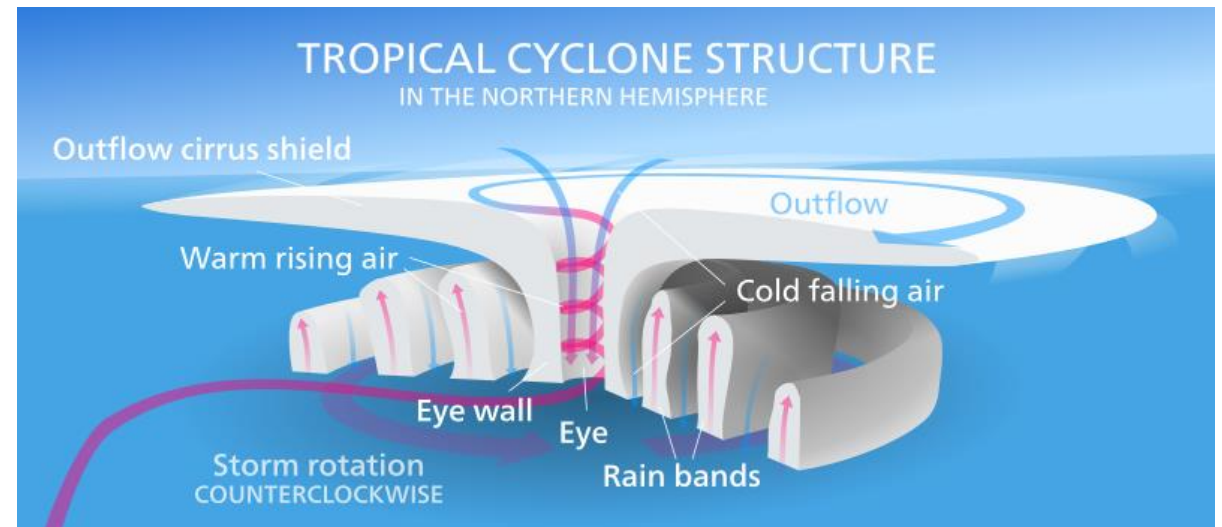
中国哪些地区会受海陆风影响导致降水比较多？



中尺度运动 IV：热带气旋，空间尺度~百-千公里，时间尺度~周

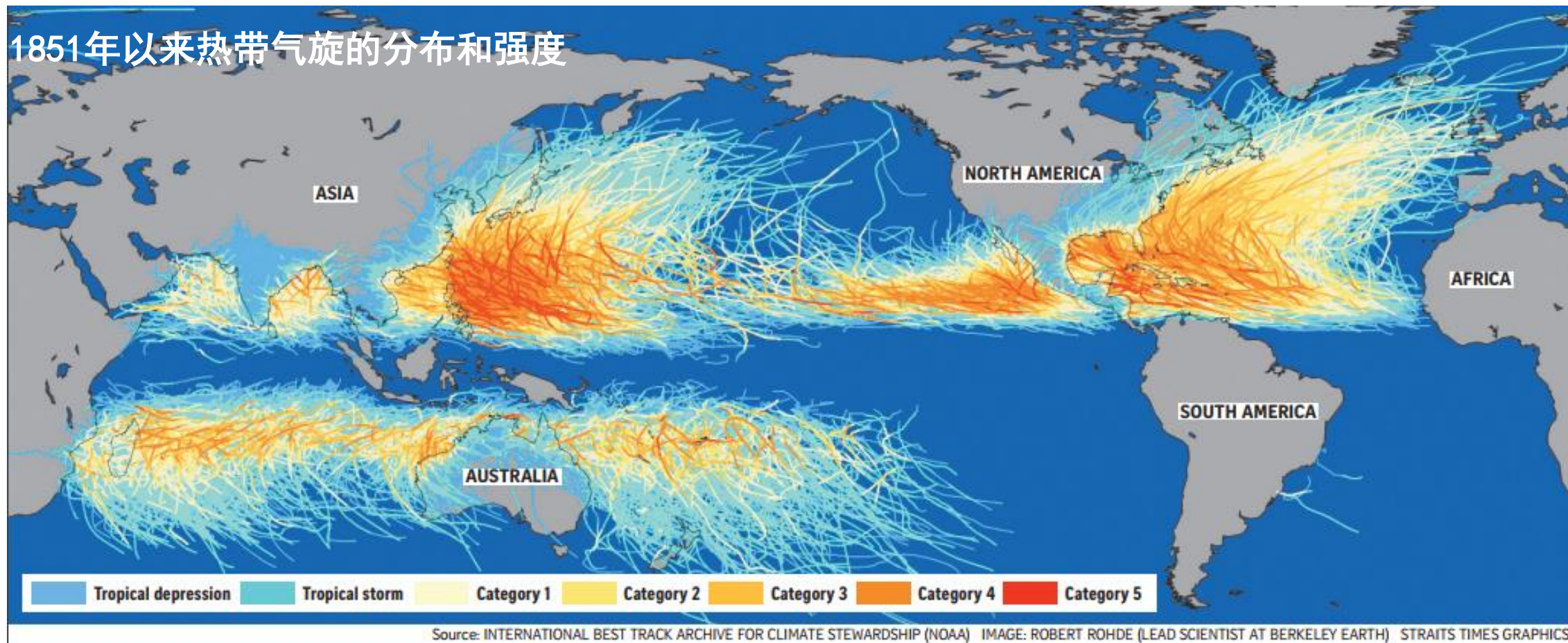


- 热带气旋是发生在热带与亚热带地区海面上的气旋性环流
- 台风是剧烈的热带气旋，是指近中心最大持续风速达到12-13级(即32.7-41.4米/秒)的热带气旋
- 热带气旋具有由水蒸气冷却凝结放出潜热发展而出的暖心结构



热带气旋与台风的分布

1851年以来热带气旋的分布和强度

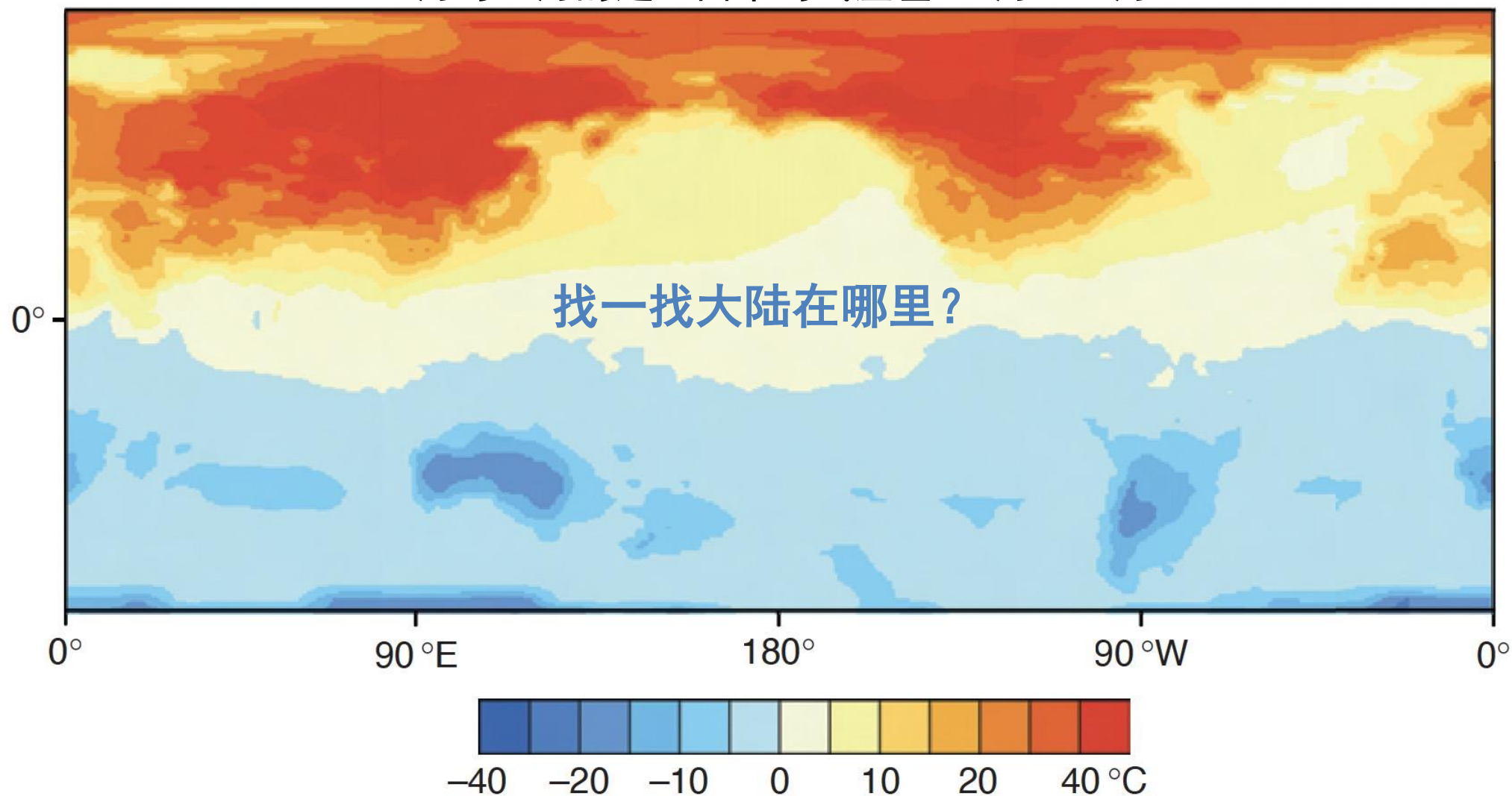


Q: 为何热带气旋几乎没有产生于赤道附近?

大尺度运动 I: 季风, 空间尺度 > 千公里, 时间尺度 ~ 季节

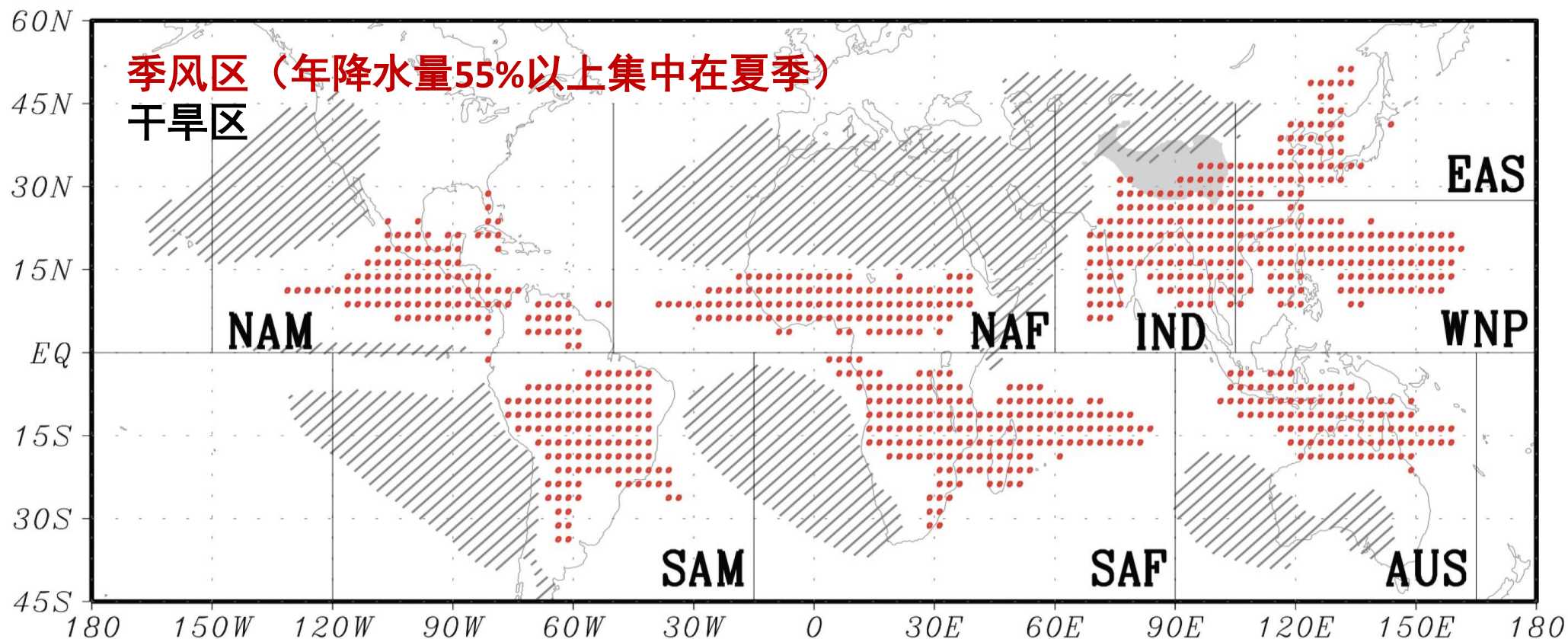
- 季风是由于海陆温差及其季节变化所引起的: 夏季风、冬季风。

七月与一月的近地面平均气温差 (7月 - 1月)

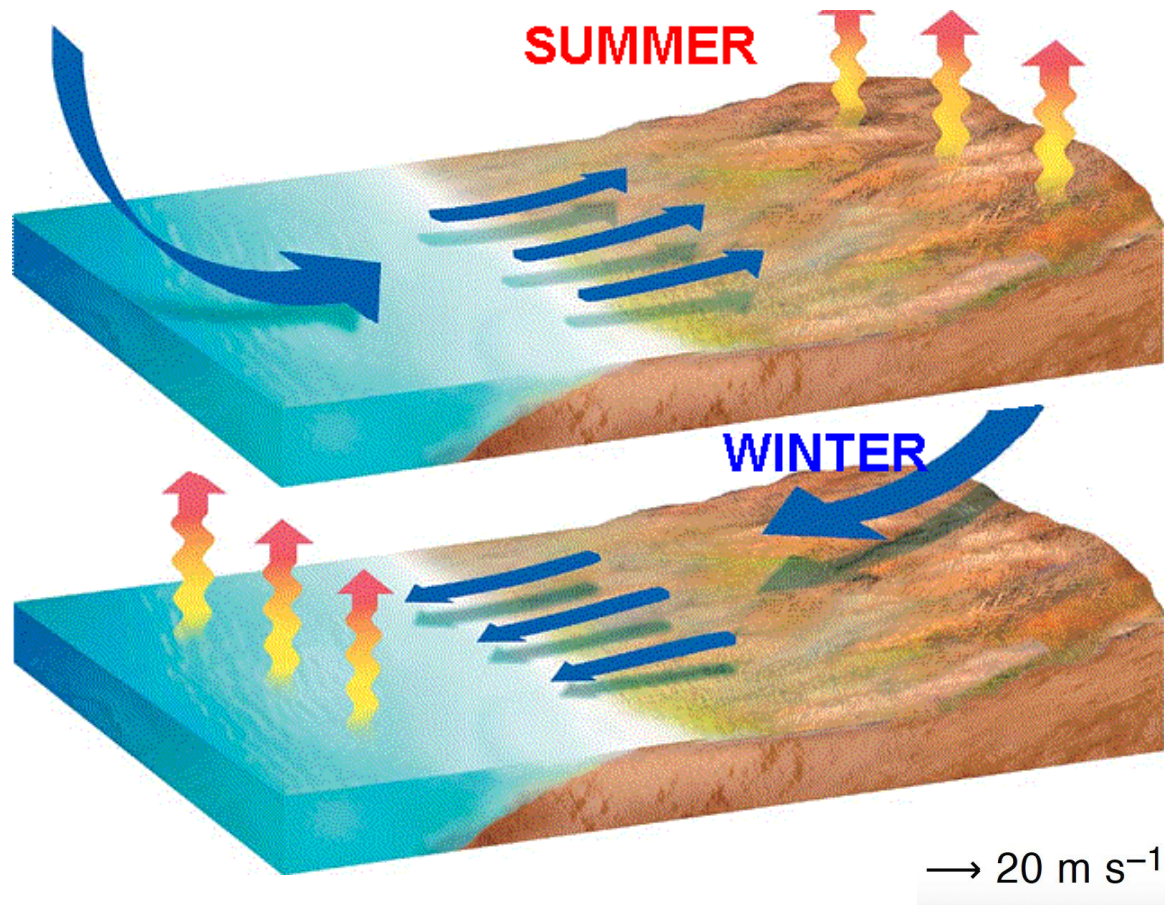


季风，空间尺度 > 千公里，时间尺度~季节

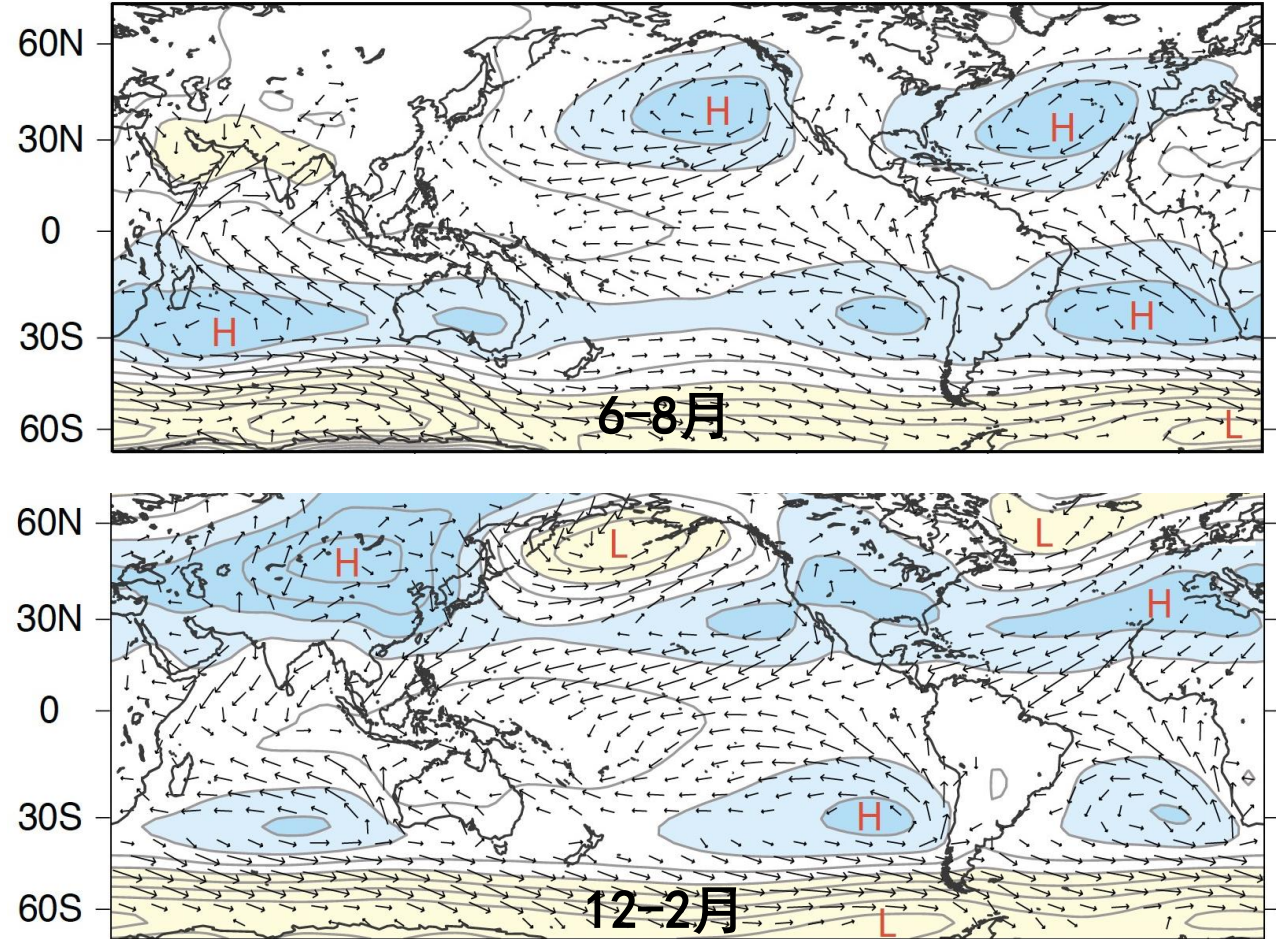
- 我国是受季风影响最大的地区之一，其降水在很大程度上受季风系统控制。



亚洲季风



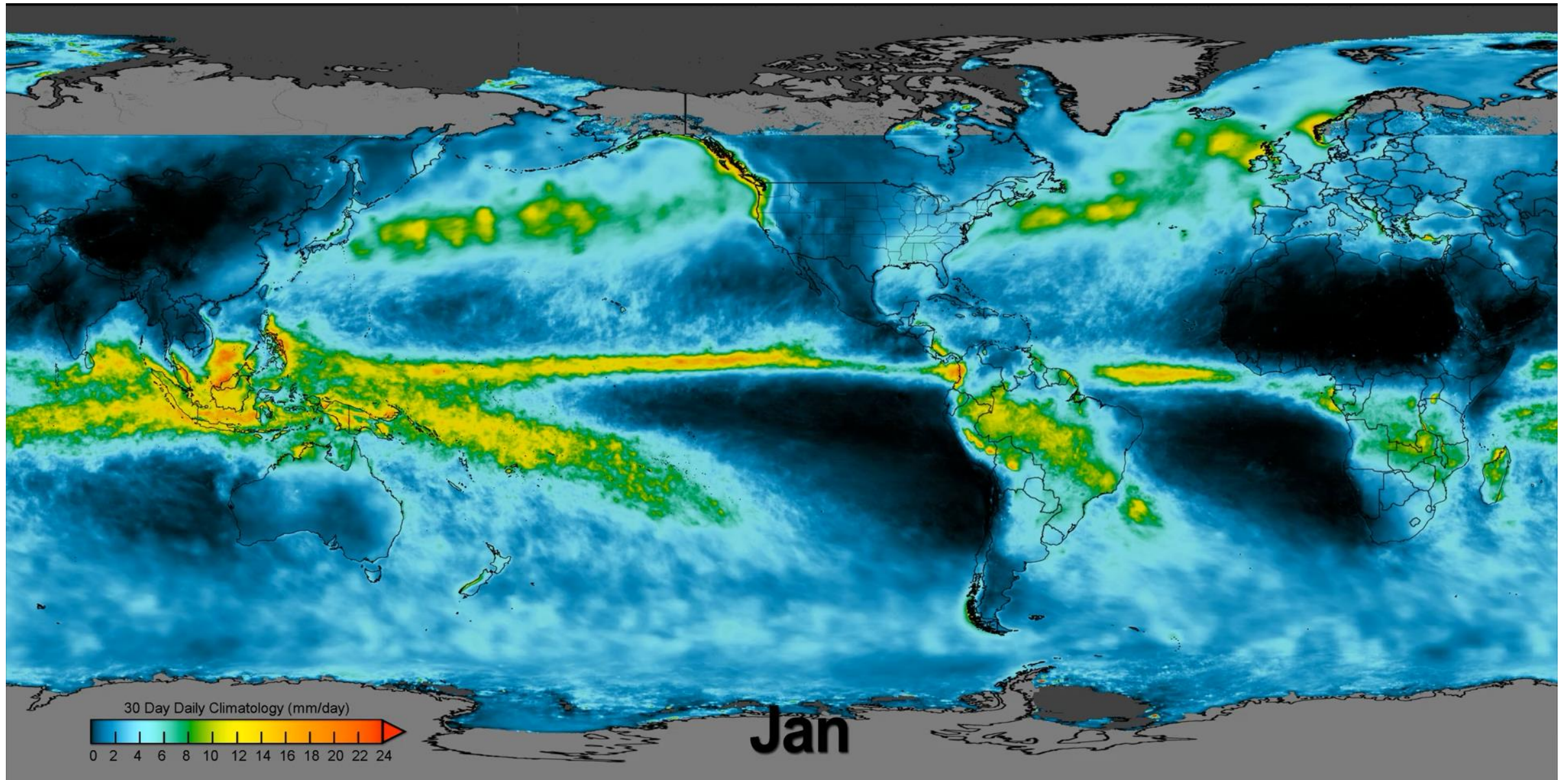
近地面风速和风向



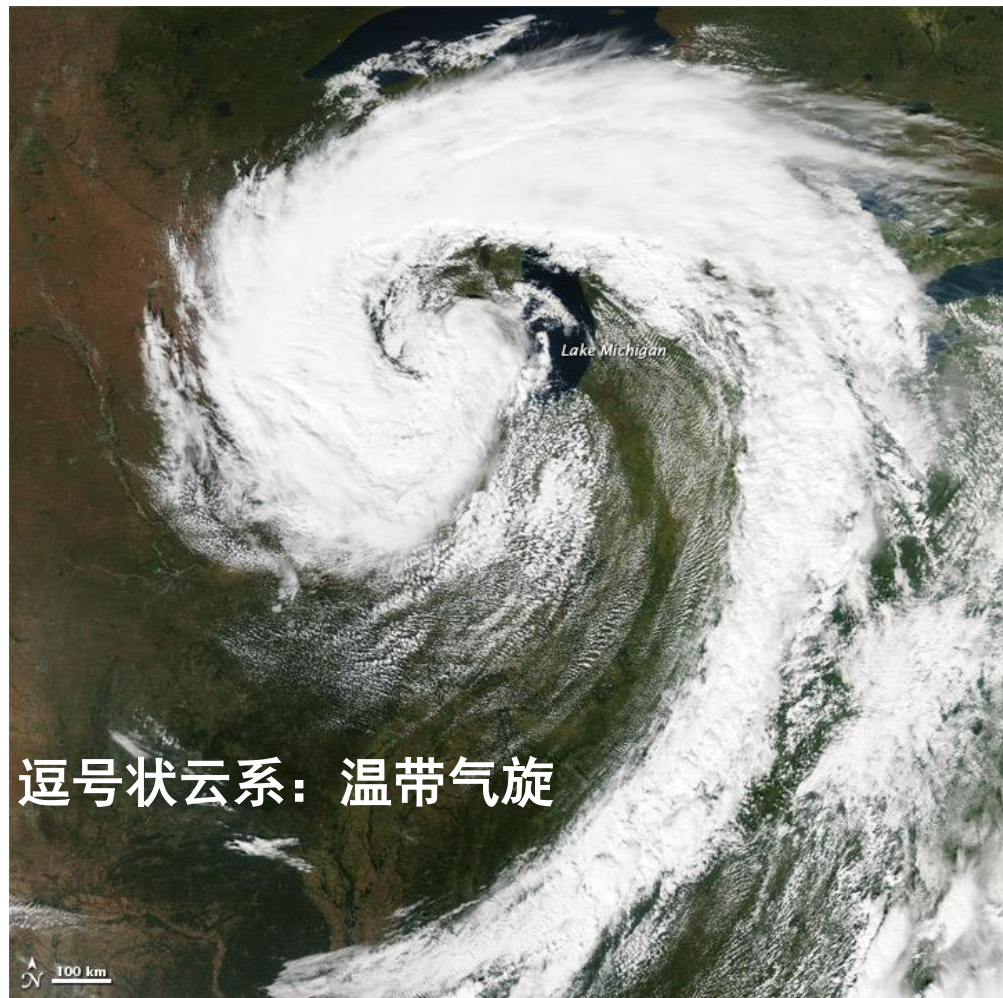
The Asian Monsoon - The World's Largest Weather System

<https://www.youtube.com/watch?v=1nstixjMS7A&t=2s>

季风影响下的全球降水季节变化

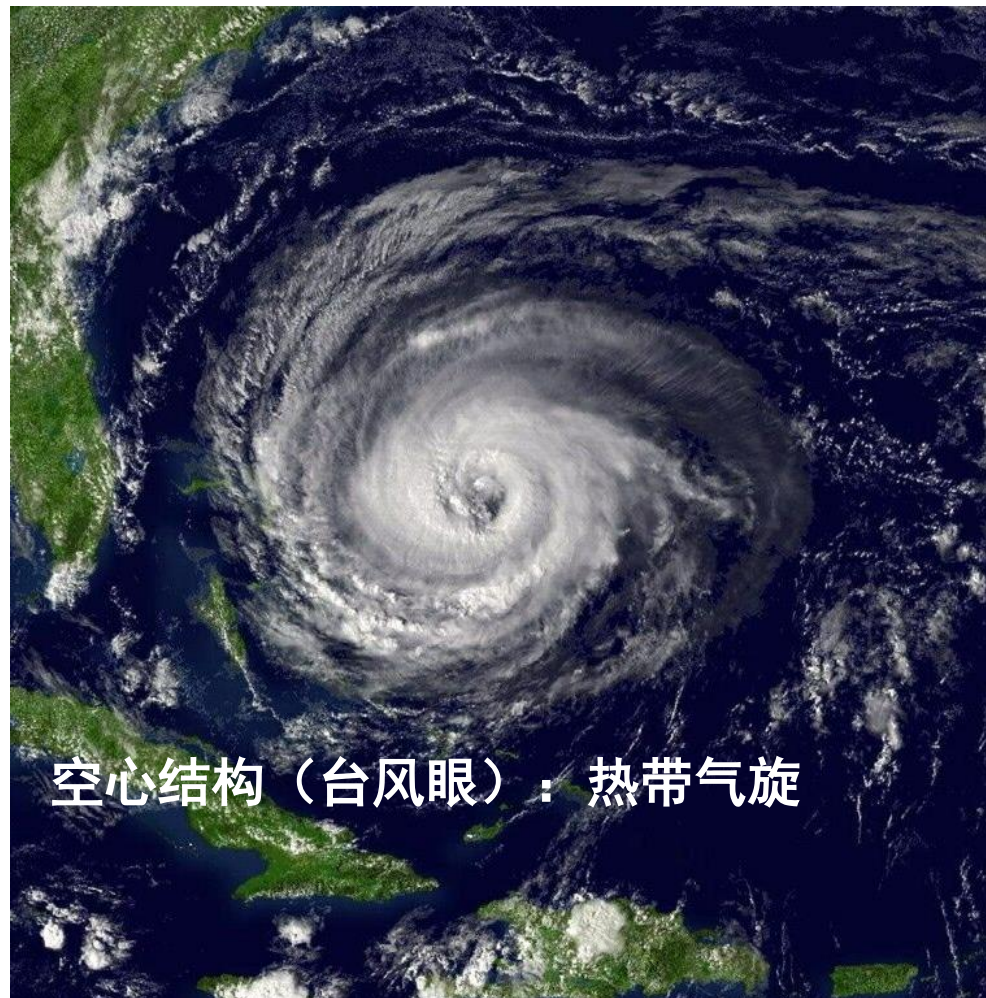


大尺度运动 II: 温带气旋, 空间尺度 > 千公里, 时间尺度 ~ 周



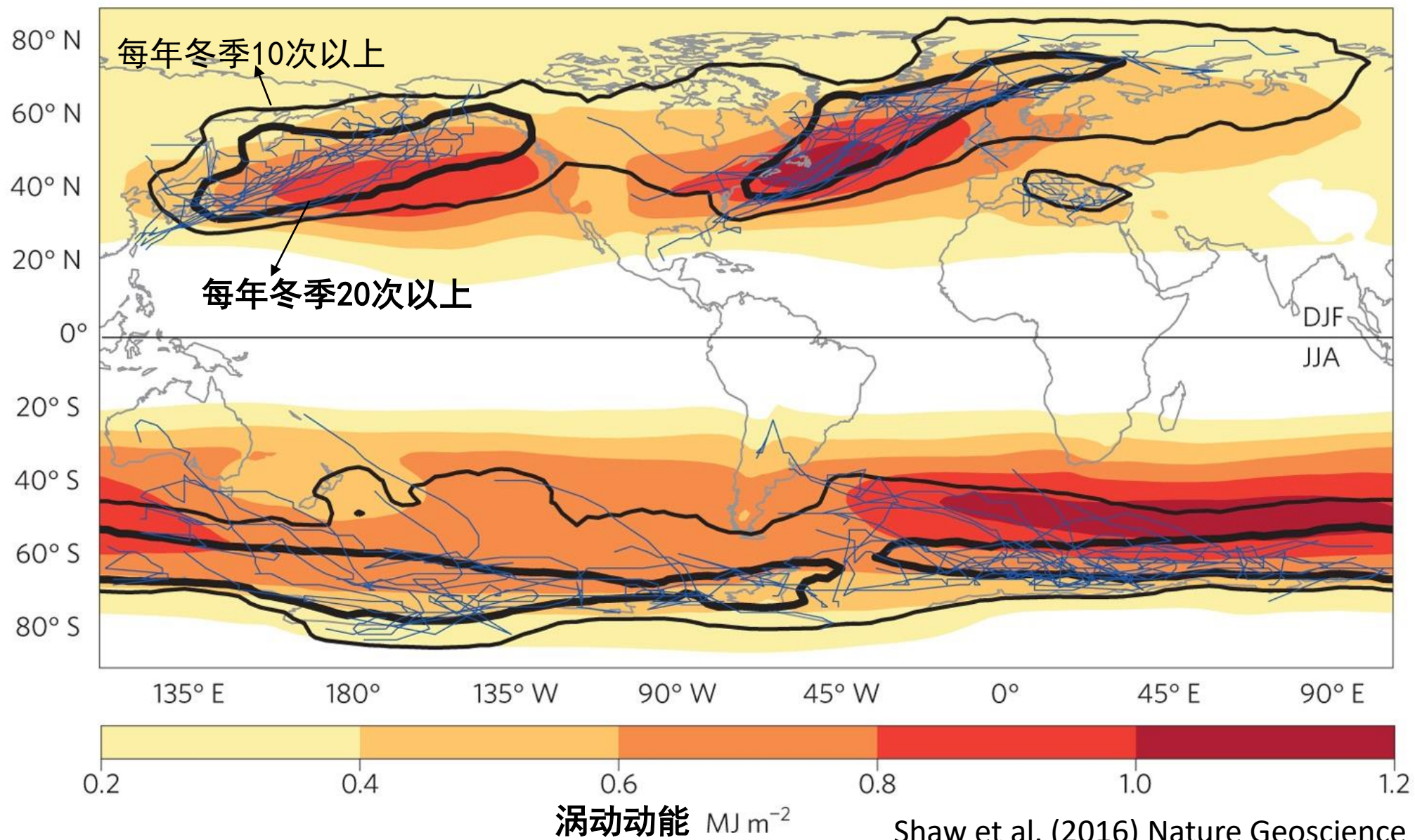
逗号状云系: 温带气旋

versus



空心结构 (台风眼): 热带气旋

温带气旋



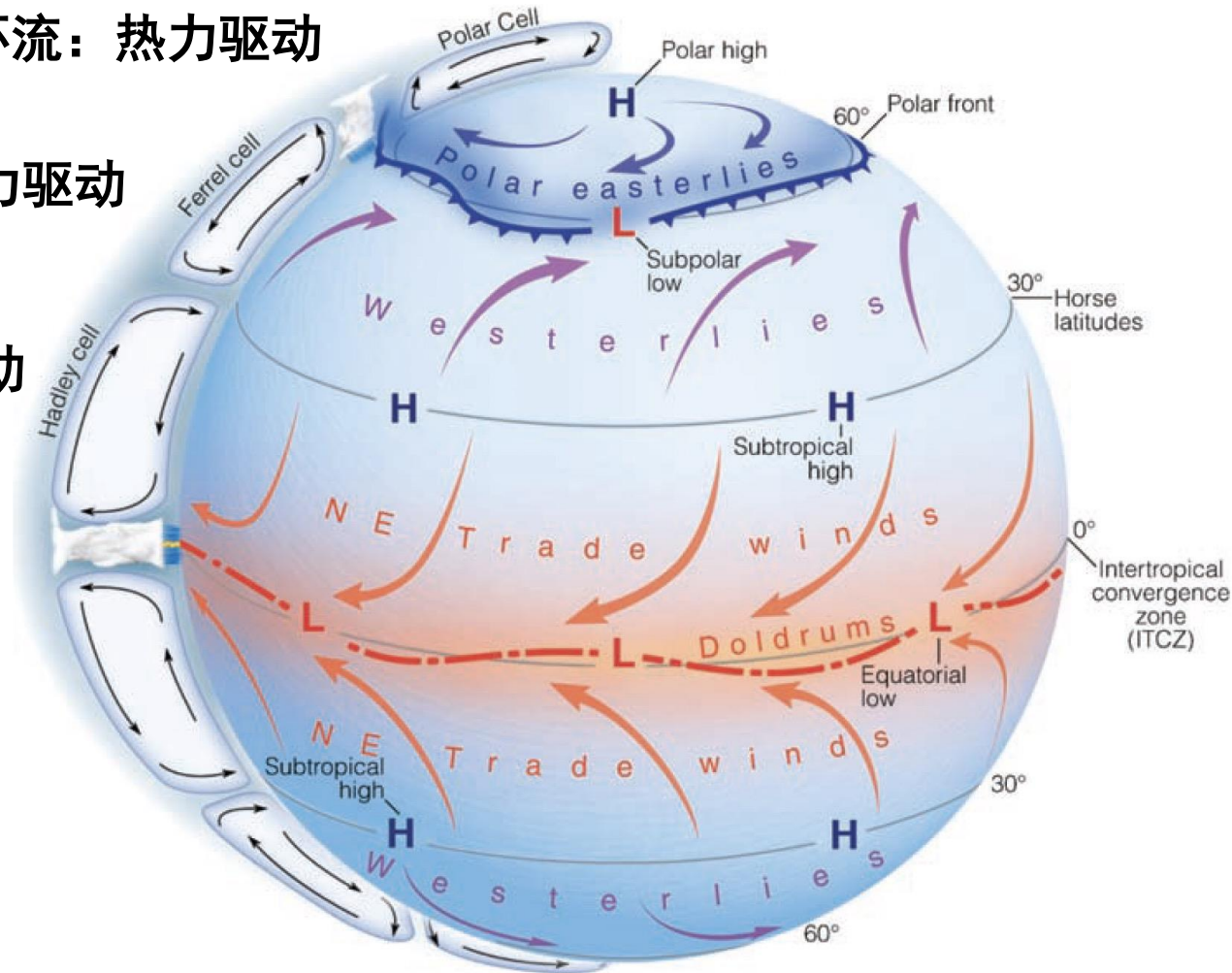
全球（行星）尺度的运动 I：三圈环流

在20世纪20年代，人们提出了旋转地球上三圈环流的理论模型：

极区环流：热力驱动

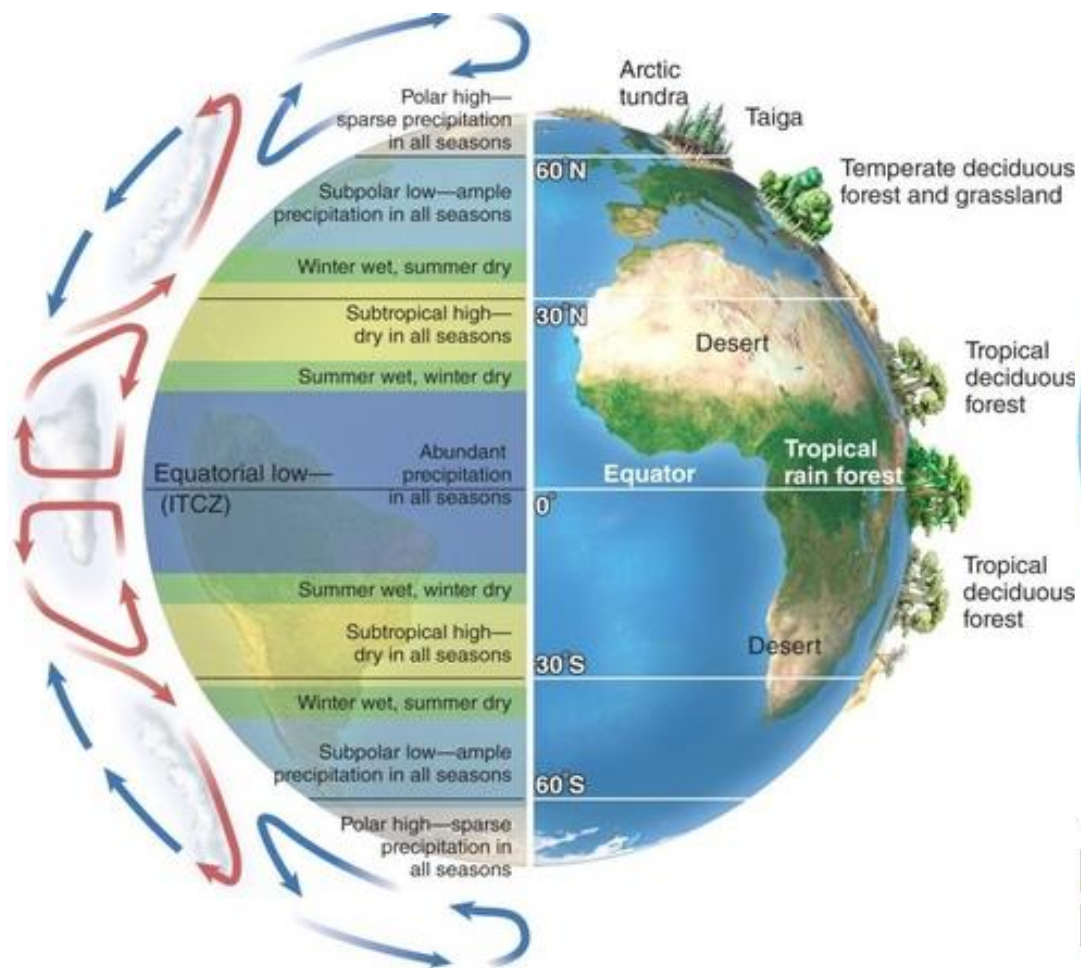
费雷尔环流：动力驱动

哈德雷环流：热力驱动

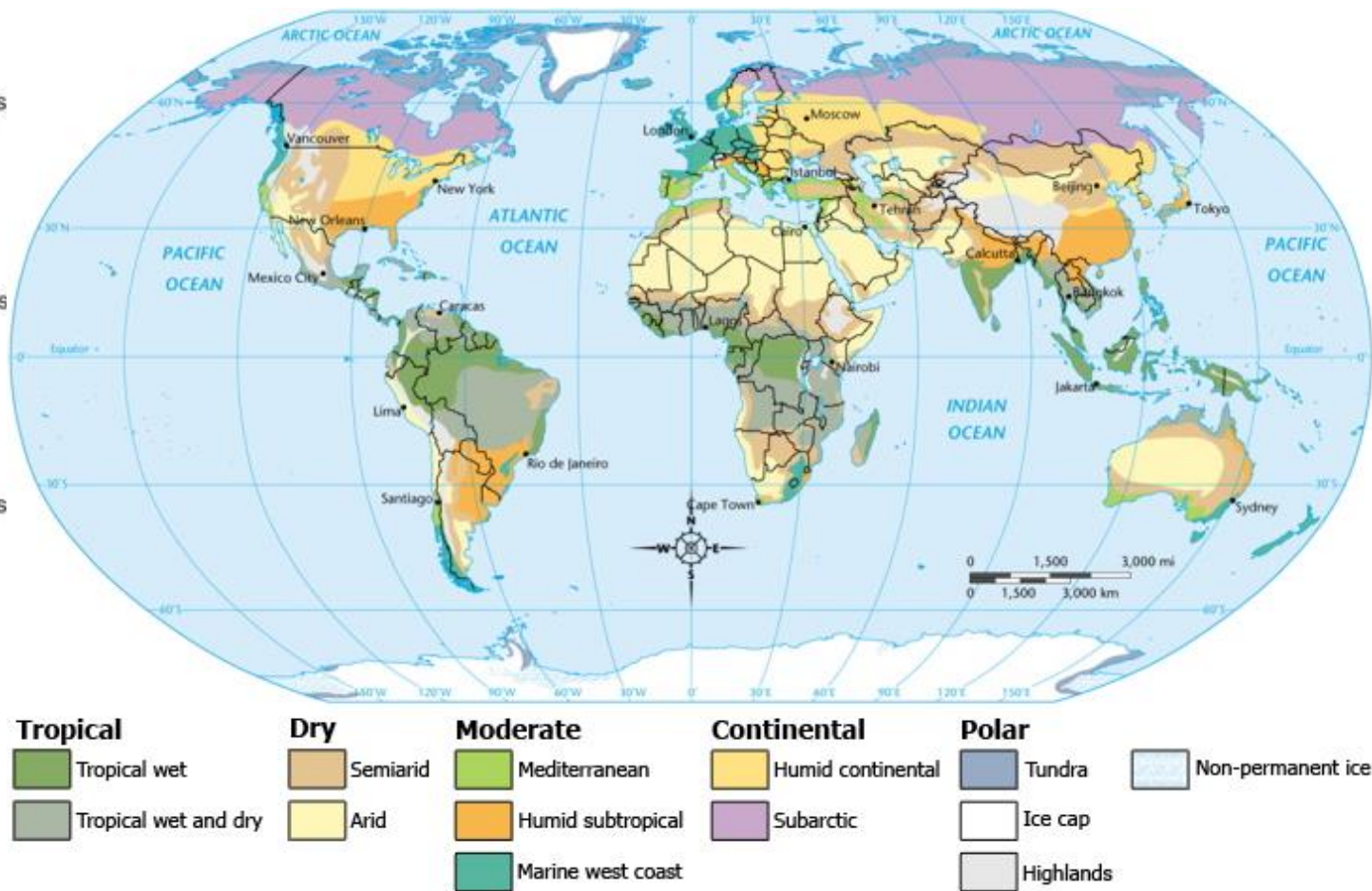


热力驱动：冷的地方大气下沉，暖的地方大气上升

三圈环流与气候带的纬向分布

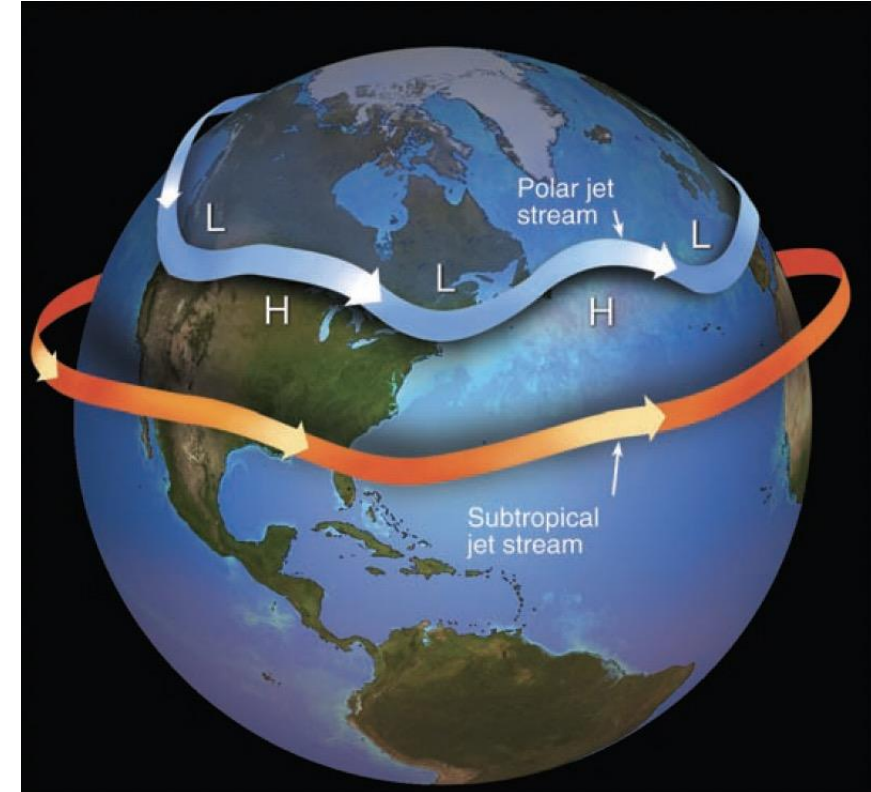
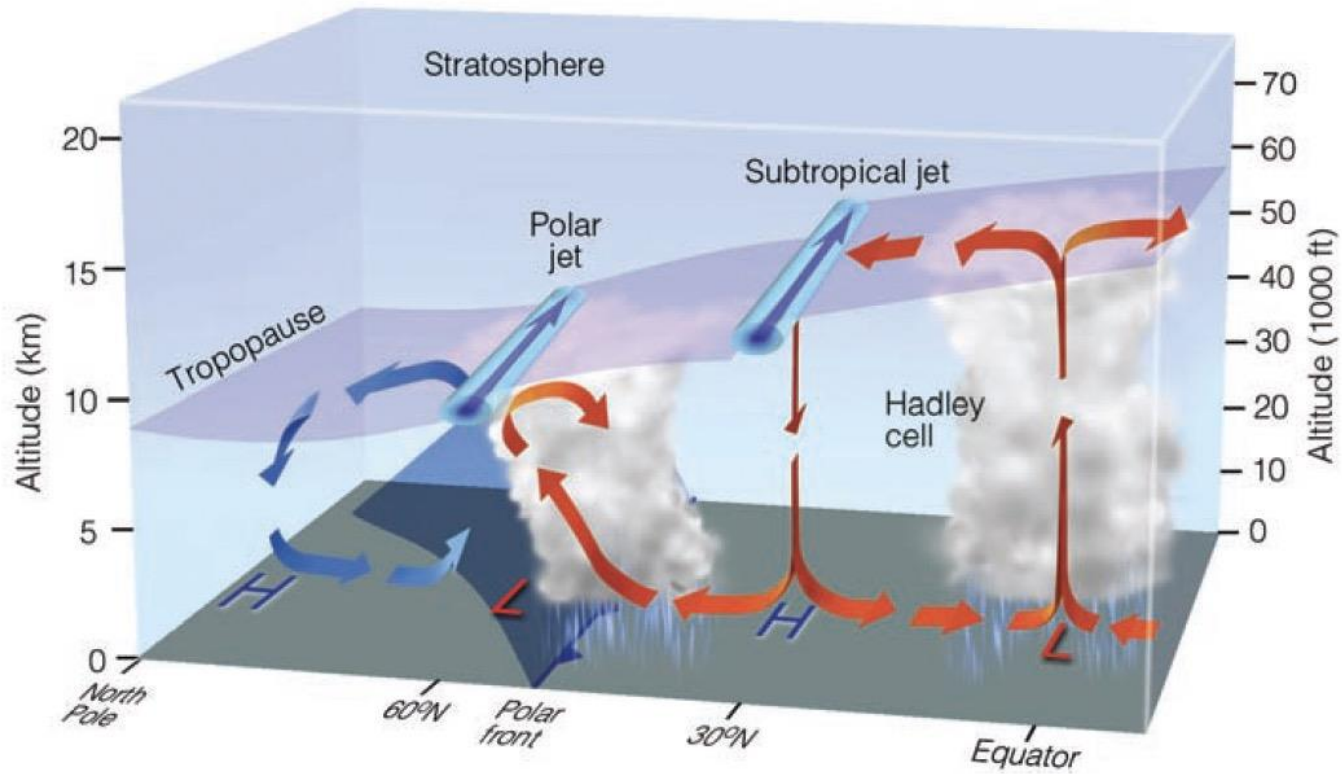


气候类型



Q: 除了三圈环流, 还有哪些因素影响气候的地区分布?

行星尺度运动 II： 中高纬度西风带急流



高空急流

9:48 携程旅行

上海 = 旧金山

去程 11-15 周三 总时长11h5m 出行提醒 >

23:15 PVG 上海 浦东国际机场 T2

18:20 SFO 旧金山国际机场 国际航站楼
美国联合航空UA890 | 波音777-300ER(大) | 有餐食 >

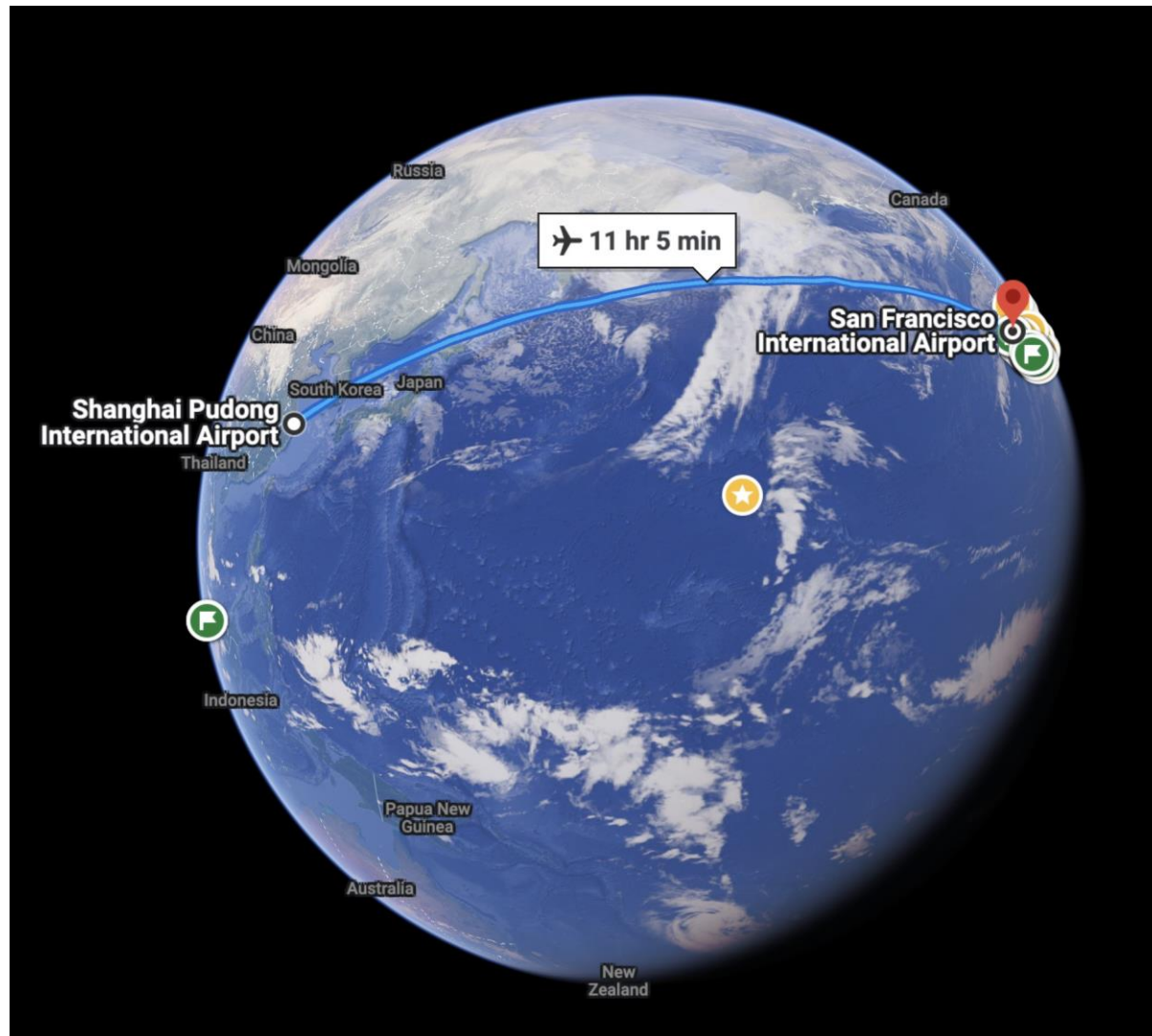
返程 11-17 周五 总时长14h20m

12:15 SFO 旧金山国际机场 国际航站楼

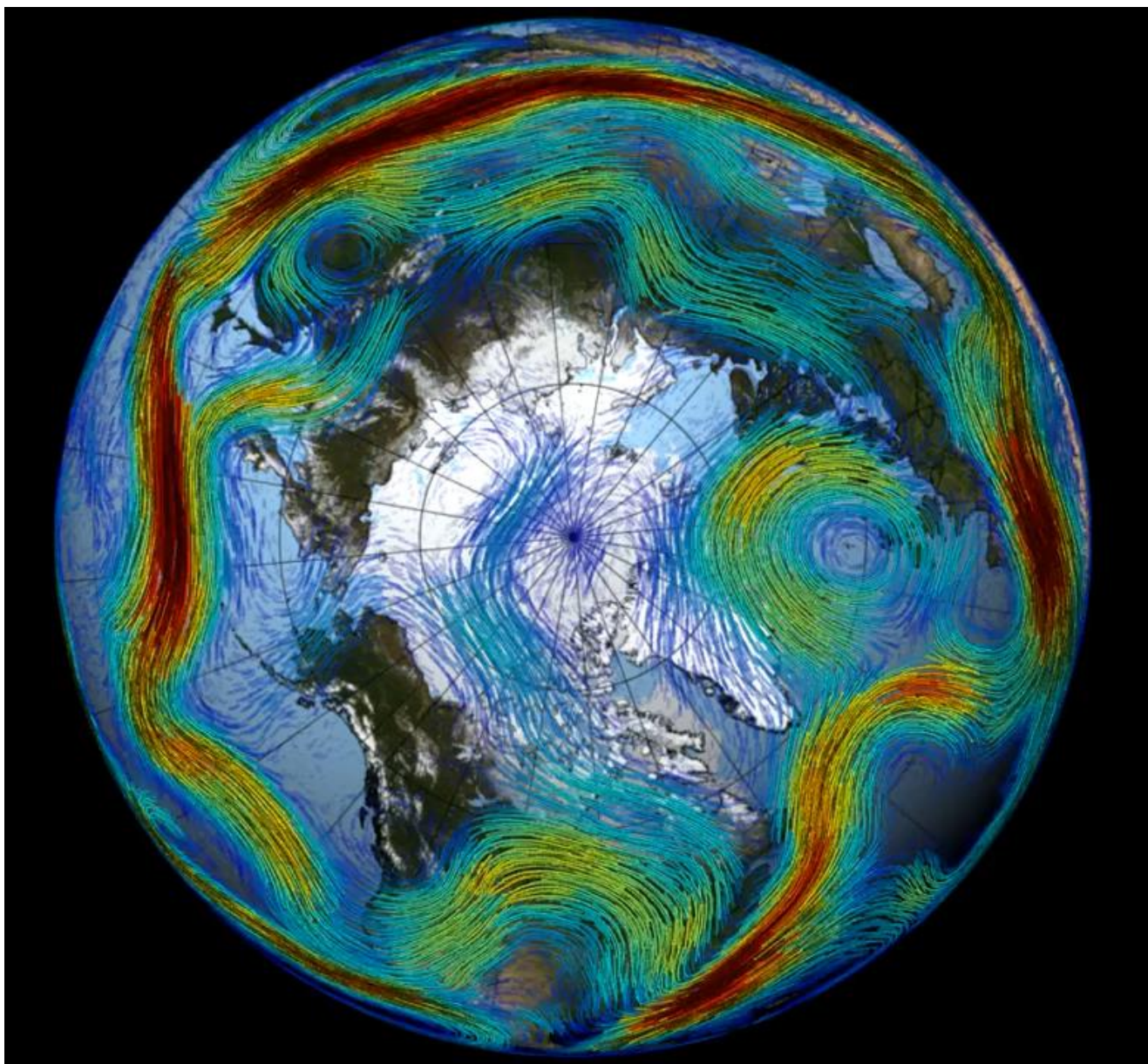
11-18
18:35 PVG 上海 浦东国际机场 T2
美国联合航空UA857 | 波音777-300ER(大) | 有餐食 >

美国入境提醒: 持中国大陆护照并获10年有效B1、B2或B1/B2美国签证的旅客, 出行前请确认已登记EVUS (签证更新电子系统), 以免无...

经济舱	超级经济舱	公务舱
¥18298起	¥24634起	¥168562起



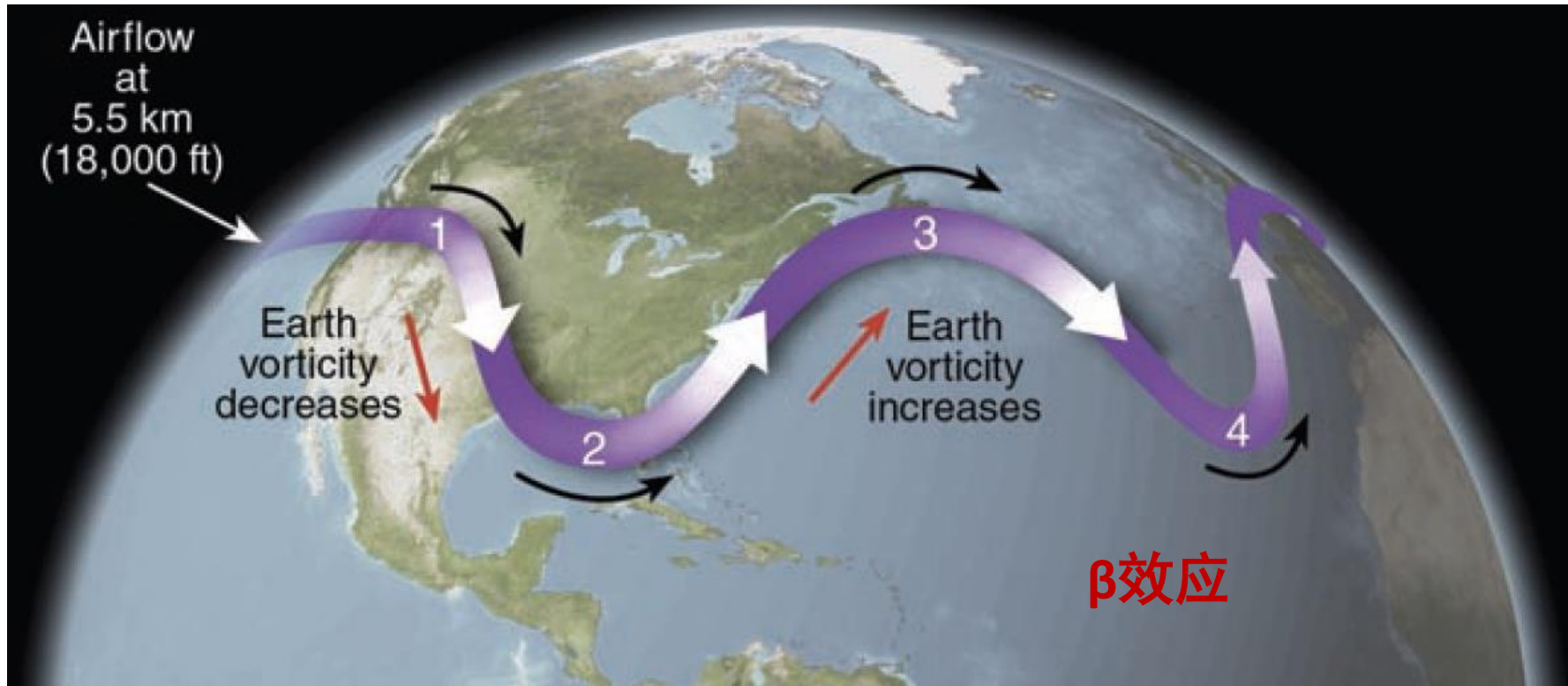
中高纬度西风急流和罗斯贝波



- 在中高纬度，西风气流呈现曲折的波动特征，波长大约为几千公里，这样的波动称为 Rossby（罗斯贝）波。
- 罗斯贝波也称为大气长波、行星波，其水平尺度与地球半径相当。

位涡守恒（角动量守恒）与罗斯贝波产生

位涡=绝对涡度/高度=常数 \oplus 大尺度条件下高度变化可忽略 \equiv 绝对涡度=常数

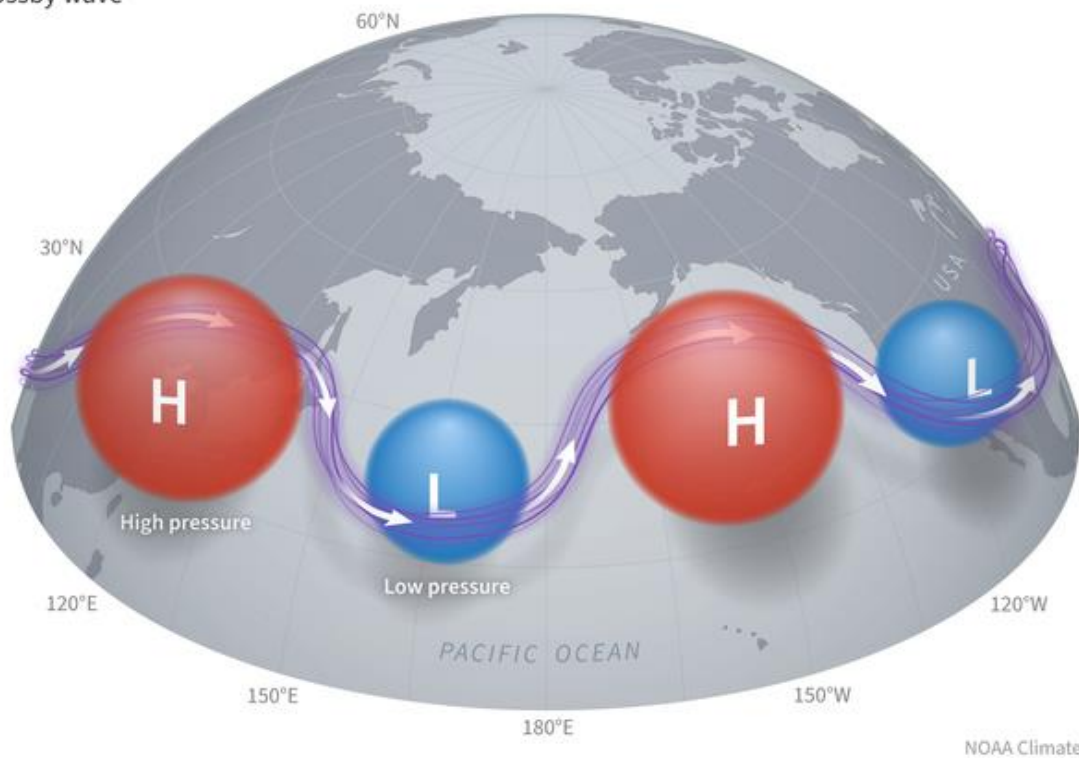


- 500 hPa左右辐合辐散很小，所以气柱高度变化很小。
- 大尺度运动速率的水平梯度很小，所以相对涡度主要来自运动曲线的曲率效应。
- 如果地形或者温度梯度导致大气运动有一个偏向南的扰动，那么相对涡度必须增加，在最南边位置出现一个向北的速度分量。由此形成罗斯贝波。

罗斯贝波、大气遥相关、中纬度极端天气

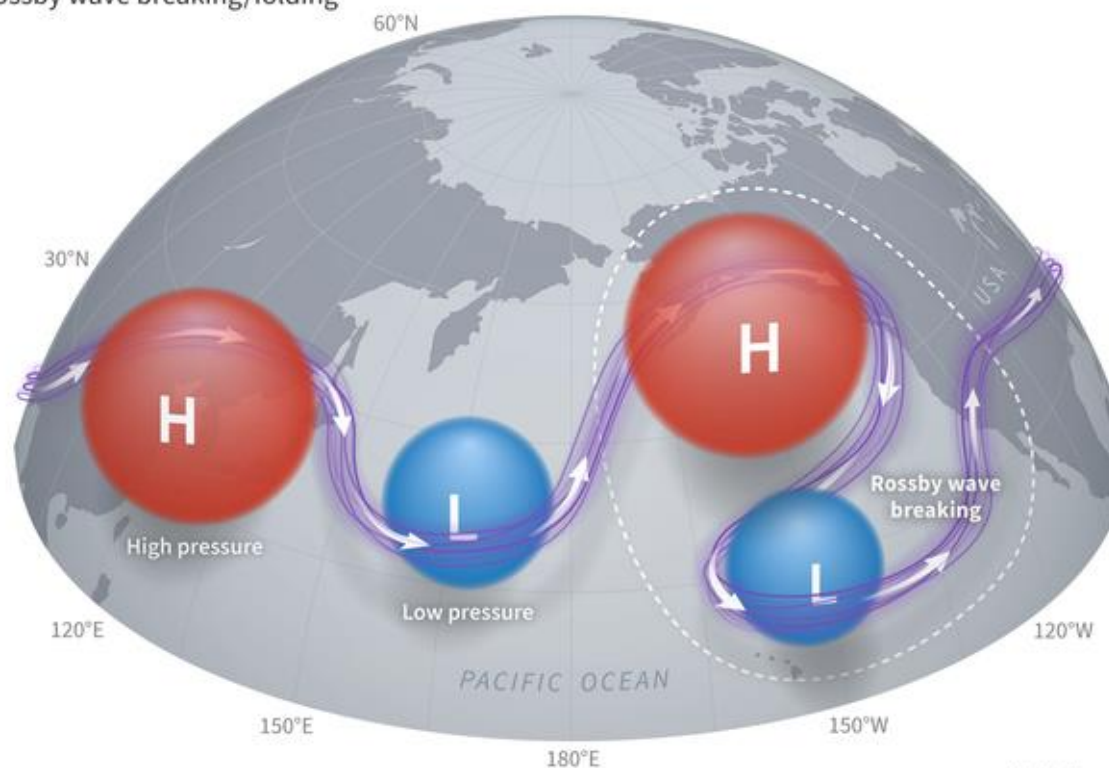
罗斯贝波传递大气温度和气压的扰动

Rossby wave



罗斯贝波的折叠和破裂导致中纬度极端天气

Rossby wave breaking/folding



大气遥相关 (teleconnection)

https://en.wikipedia.org/wiki/Rossby_wave

<https://www.climate.gov/news-features/blogs/enso/what-are-teleconnections-connecting-earths-climate-patterns-global#:~:text=Guided%20along%20by%20the%20jet,places%20thousands%20of%20miles%20away>

阻塞高压 (blocking high)
炸弹气旋 (bomb cyclone)

本章作业 ddl = 2024年5月13日 13:00

1. 对于北半球龙卷风、水龙卷、尘卷，他们的旋转方向是否一定是逆时针的？为什么？
2. 相比于欧洲、美洲，为什么亚洲地区存在更为广泛、更为显著的季风区？青藏高原的作用是什么？
3. 为什么大气的经向环流没有形成从赤道到极地的“单圈环流”？为什么费雷尔环流在较冷的地方上升，而在较暖的地方下沉？