

The Movement of Air and Global Circulation System

大氣運動與全球環流

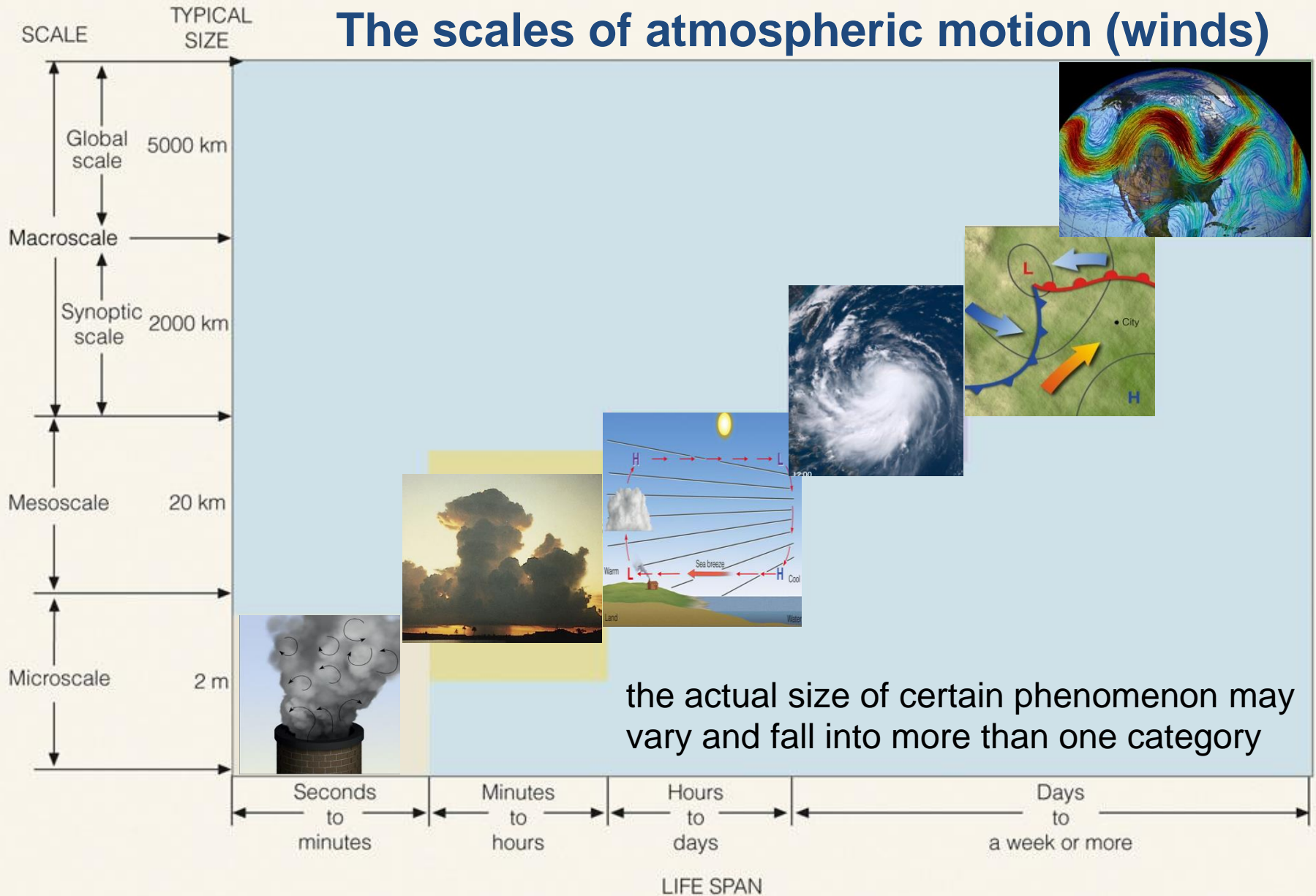
大氣科學概論

Week 5

[Meteorology Today Ch9-10]

與後續課程連結：大氣動力學、天氣學、氣候學

The scales of atmospheric motion (winds)



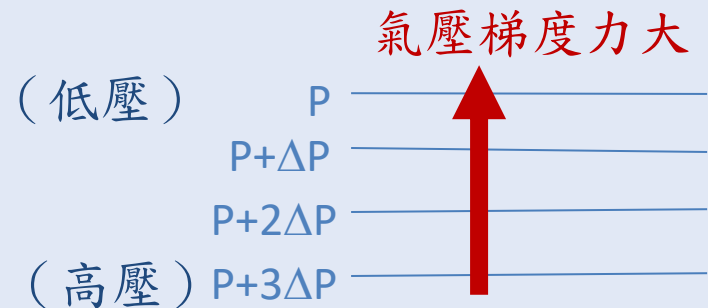
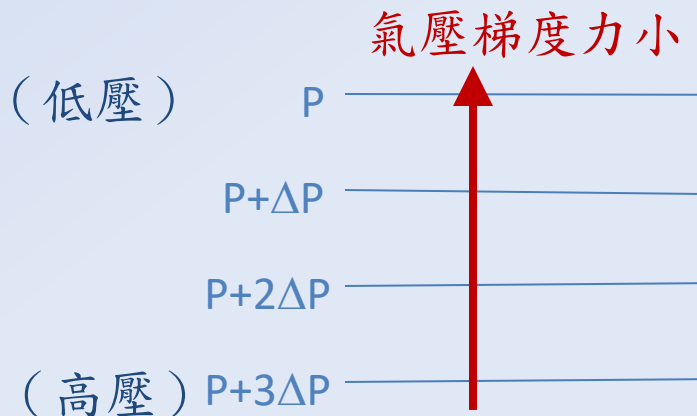
影響大氣水平運動的「力」

- * 氣壓梯度力：來自兩點之間的壓力差
- * 科氏力：地球旋轉造成（假想力）
- * 摩擦力：地表、地形摩擦造成
- * 離心力：運動軌跡明顯彎曲時需考慮（如：颱風）

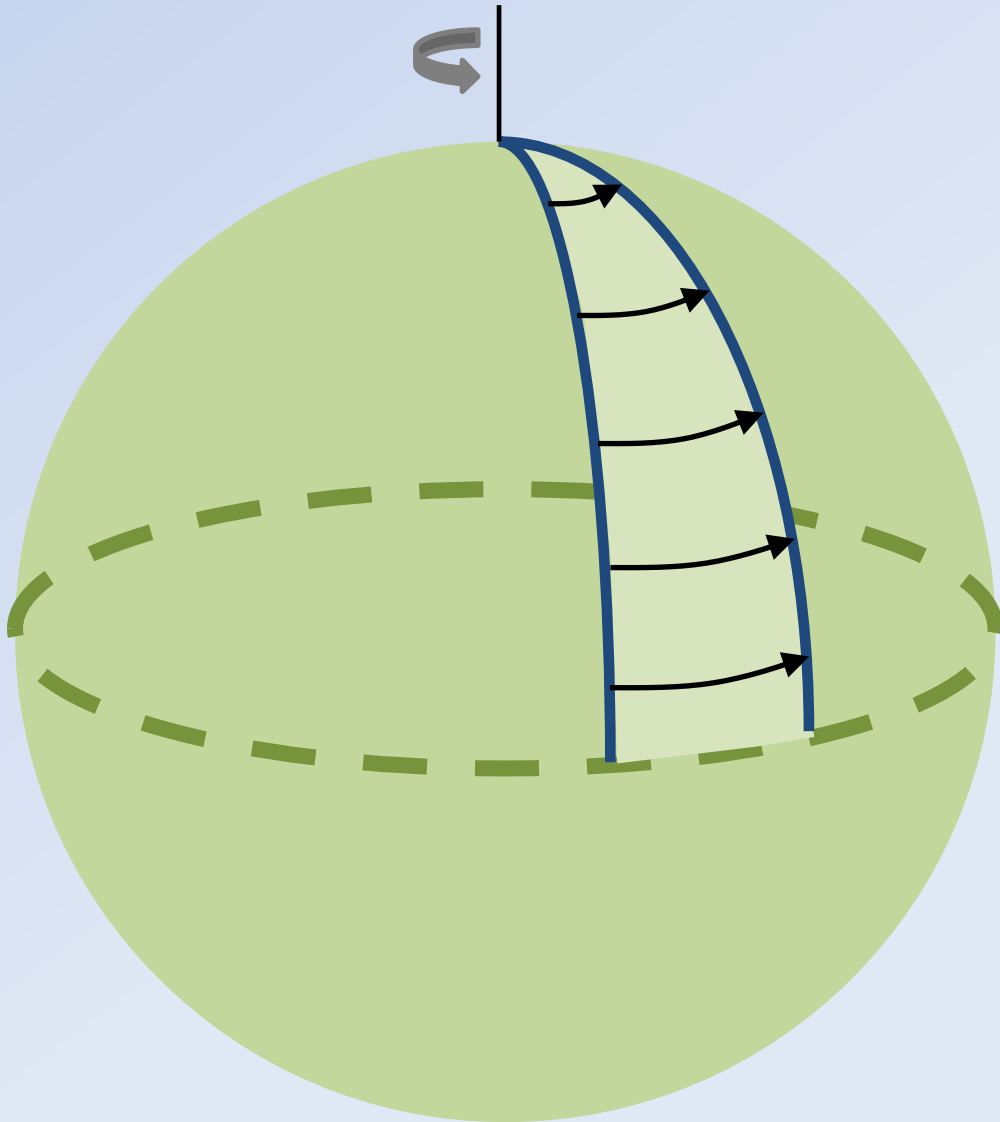
- * 各種力平衡的結果：
 - * 地轉風（Geostrophic Wind）：氣壓梯度力與科氏力平衡（大尺度高空風場）
 - * 地轉風受摩擦力影響：氣壓梯度力、科氏力、摩擦力平衡（大尺度近地面風場）
 - * 梯度風（Gradient Wind）：氣壓梯度力、科氏力、離心力三者平衡（環繞天氣系統高、低壓中心的風場）

風從哪裡來？氣壓梯度力

- * 空氣由高壓流向低壓，形成「風」，風速正比於氣壓梯度力（pressure gradient force）
- * 兩點之間的氣壓梯度力 = 氣壓差 / 距離
 - * 相同的距離下，兩點之間的氣壓差越大，風速越大
 - * 相同的氣壓差下，兩點的距離越近，風速越大
- * 在地面天氣圖中，等壓線的疏密程度代表了氣壓梯度力的大小

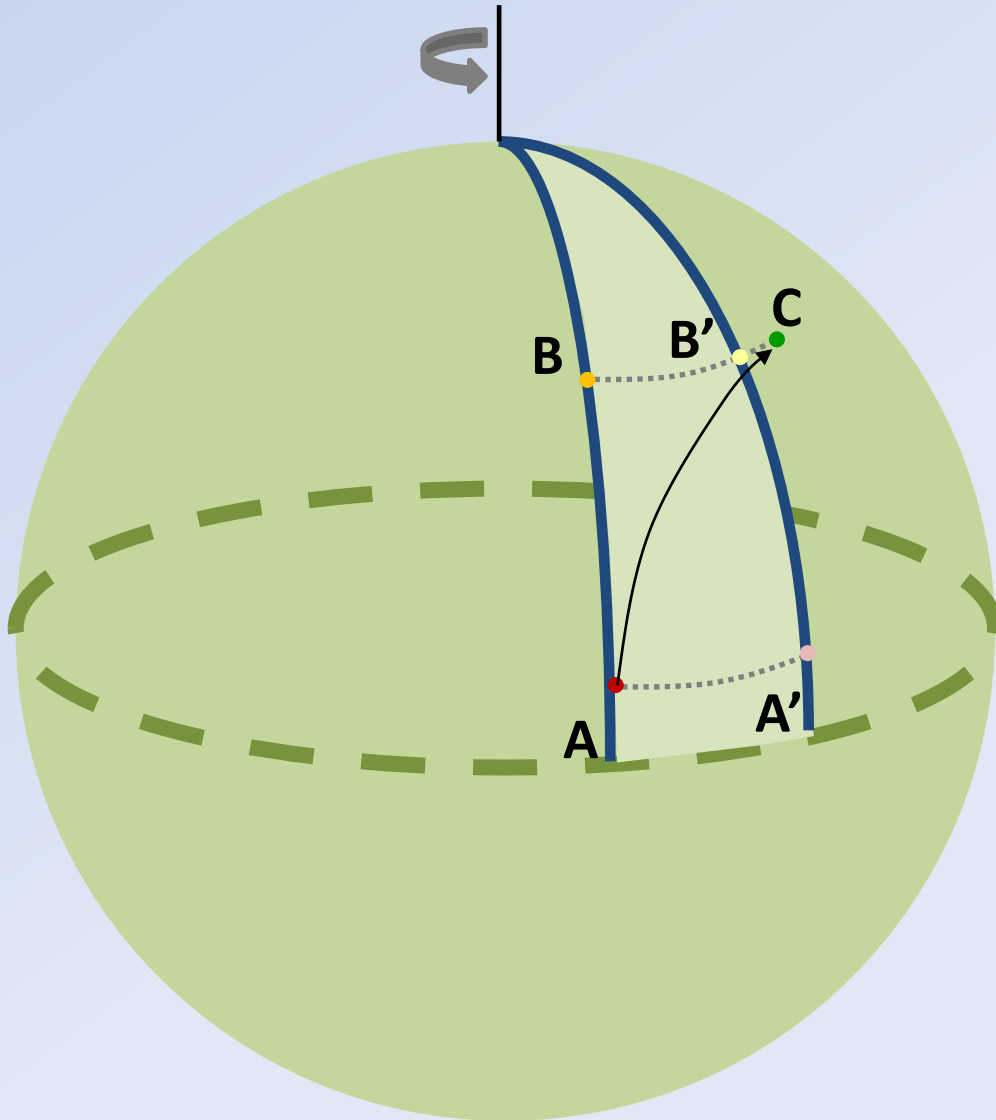


如何思考科氏效應（The Coriolis Effect）？



- * 在地球的物體都隨著地球一起轉動
- * 各緯度旋轉的角速度相同，但切線速度在赤道最大，兩極最慢
- * 位於特定緯度的靜止物體，從地球上看到並未移動，但從地球以外看卻是隨著地球做慣性運動，運動的速度就是地球在該緯度的切線速度

在旋轉座標下的物體水平運動軌跡



- * 假設物體從低緯度A點往高緯度B點水平移動，要考慮從A點往北的速度，以及物體在A點隨地球旋轉帶有的切線方向慣性速度
- * 物體到達B點所在緯度時，A點已旋轉到A'點，B點已旋轉到B'點
- * 由於地球在低緯的切線速度快，所以物體實際到達的位置C，會比B'更往東（右）偏

科氏效應對大氣水平運動的影響

✱ Rossby Number $R = U / (f L)$

$R \leq 1$ 需考慮科氏效應

$R \gg 1$ 不需考慮科氏效應

✱ U : 物體運動的速度尺度

✱ L : 物體運動的距離尺度

✱ f : 科氏參數 Coriolis parameter $f = 2\Omega \sin(\phi)$ [radian/s]

Ω : 地球旋轉角速度 ($2\pi/86400 = 7.3 \times 10^{-5}$ radian/s)

ϕ : 緯度

✱ 例如：緯度 25° ，以 40 m/s （王建民的伸卡球）前進 18 m

$$f = 2 \times 7.3 \times 10^{-5} \times \sin(25^\circ) \sim 6 \times 10^{-5} \text{ radian/s}$$

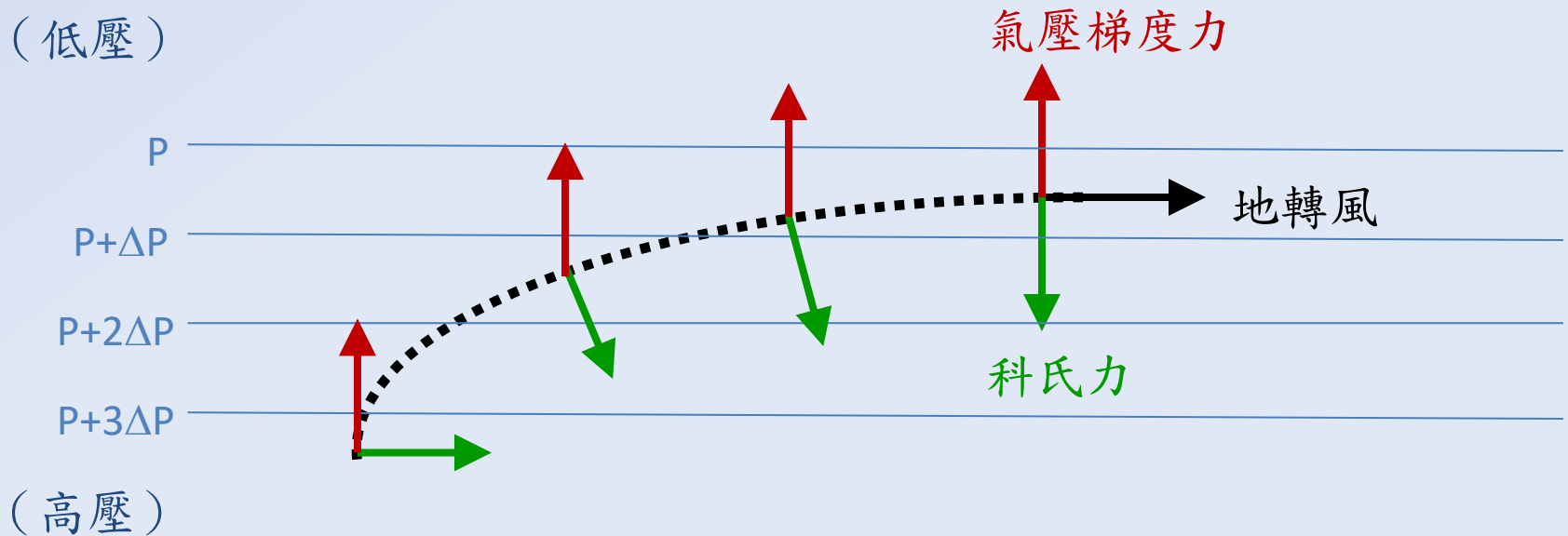
$$R = 40 / (18 \times 6 \times 10^{-5}) \sim 3.7 \times 10^4 \rightarrow \text{不需考慮科氏效應}$$

緯度 25° ，以 20 m/s （輕度颱風）前進 400 km

$$R = 20 / (400 \times 10^3 \times 6 \times 10^{-5}) \sim 0.83 \rightarrow \text{需考慮科氏效應}$$

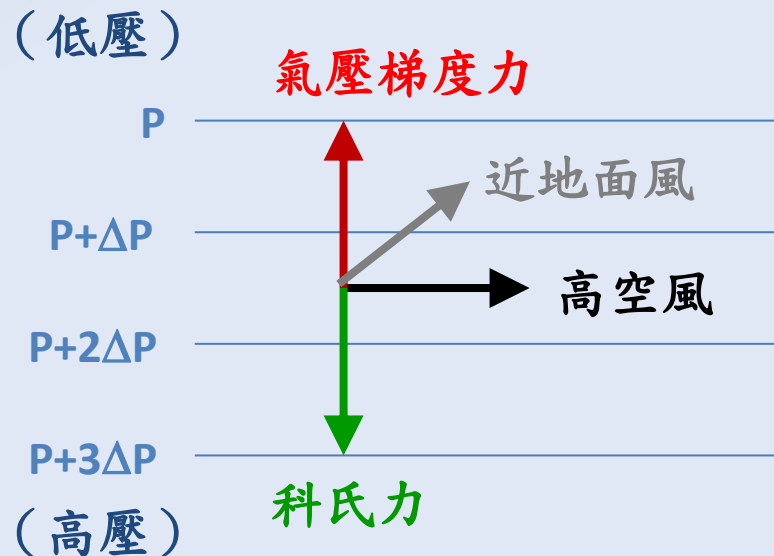
地轉平衡：氣壓梯度力與科氏力平衡的結果

- * 氣壓梯度力讓空氣傾向由高壓往低壓流動，方向垂直等壓線
- * 北半球科氏力讓空氣運動往右偏轉，其作用方向與運動方向垂直
- * 僅考慮氣壓梯度力與科氏力達成平衡（地轉平衡），則風向會平行等壓線，稱為「地轉風」geostrophic wind



地轉風

- * 地轉風是理論下兩力平衡的結果，必須在完全沒有摩擦作用、等壓線不彎曲的情況才能發生。真實大氣很少出現完美的地轉風。
- * 高空的大尺度風場，在長時間平均下非常接近地轉平衡狀態，風向與等壓線平行
- * 近地面風受到地表摩擦、對流、紊流作用的影響，偏離地轉平衡，長期平均的風向通常會偏向低壓的方向

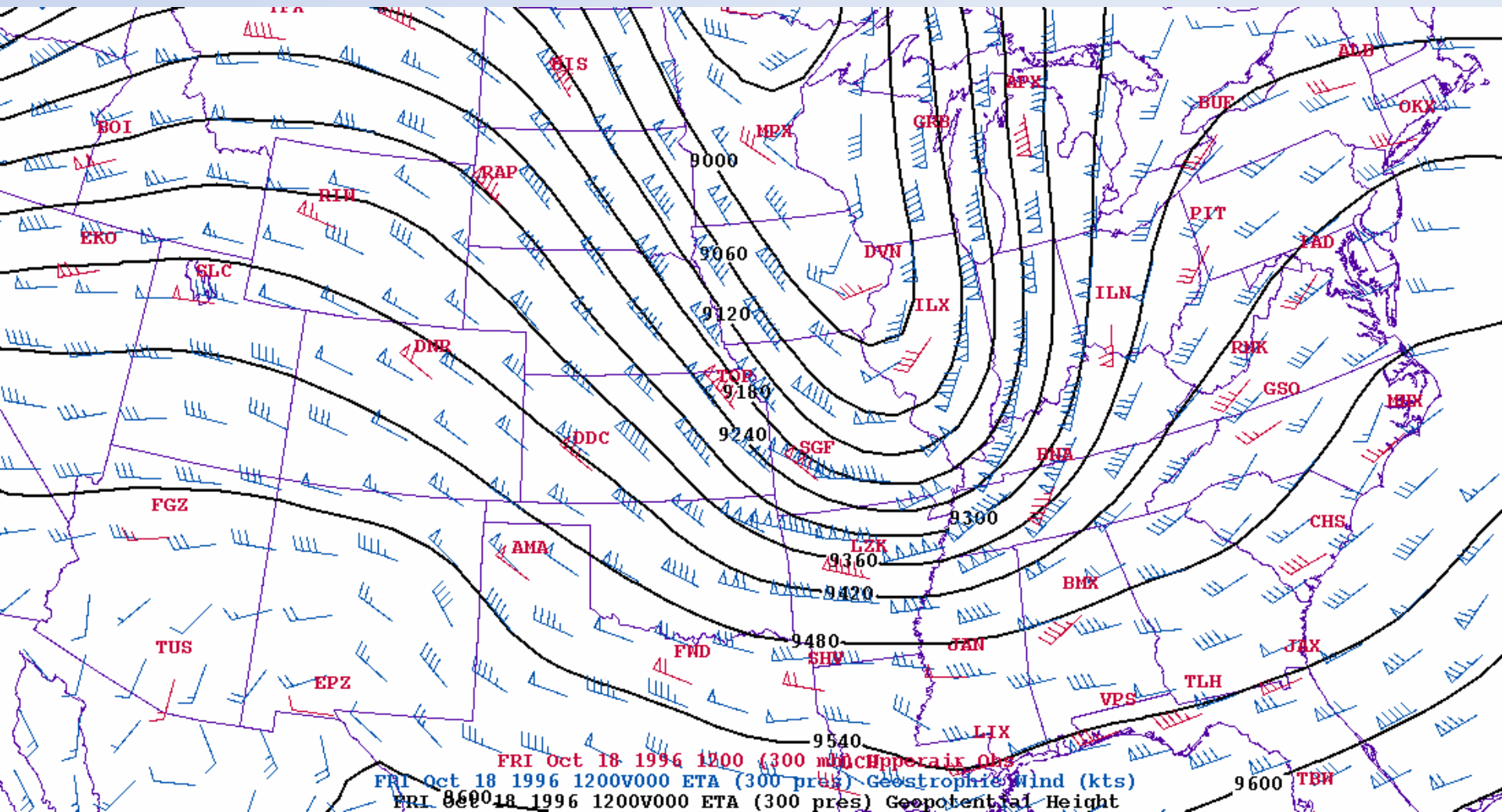


高空風場近似地轉風

* 高空風場的例子（300 hPa等壓面，約9 km高）

* 藍色風標：理論下的地轉風風場，

* 紅色風標：實際觀測到的風場

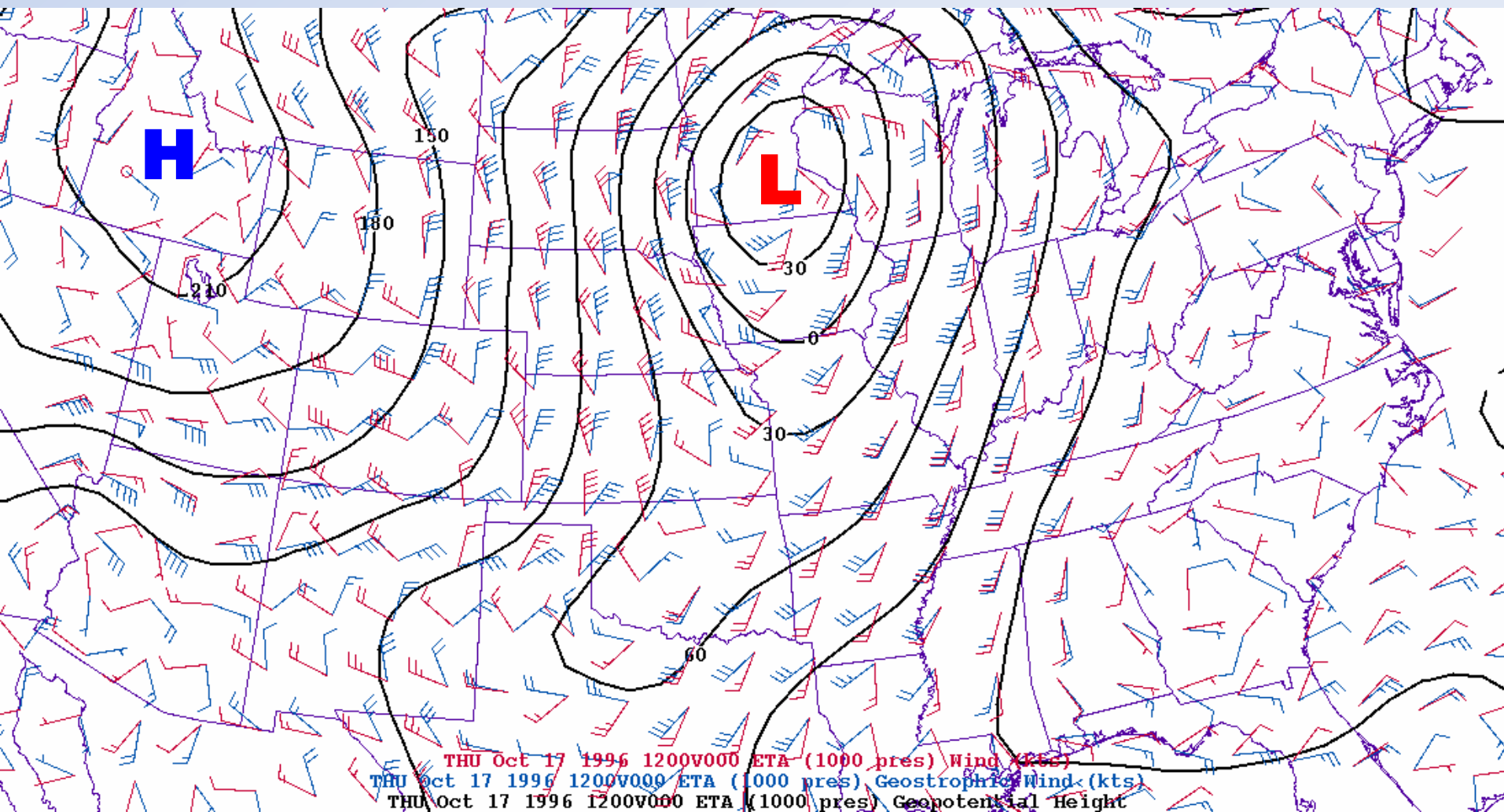


近地面風場偏離地轉風

* 近地面風場的例子（1000 hPa等壓面，約100 m高）

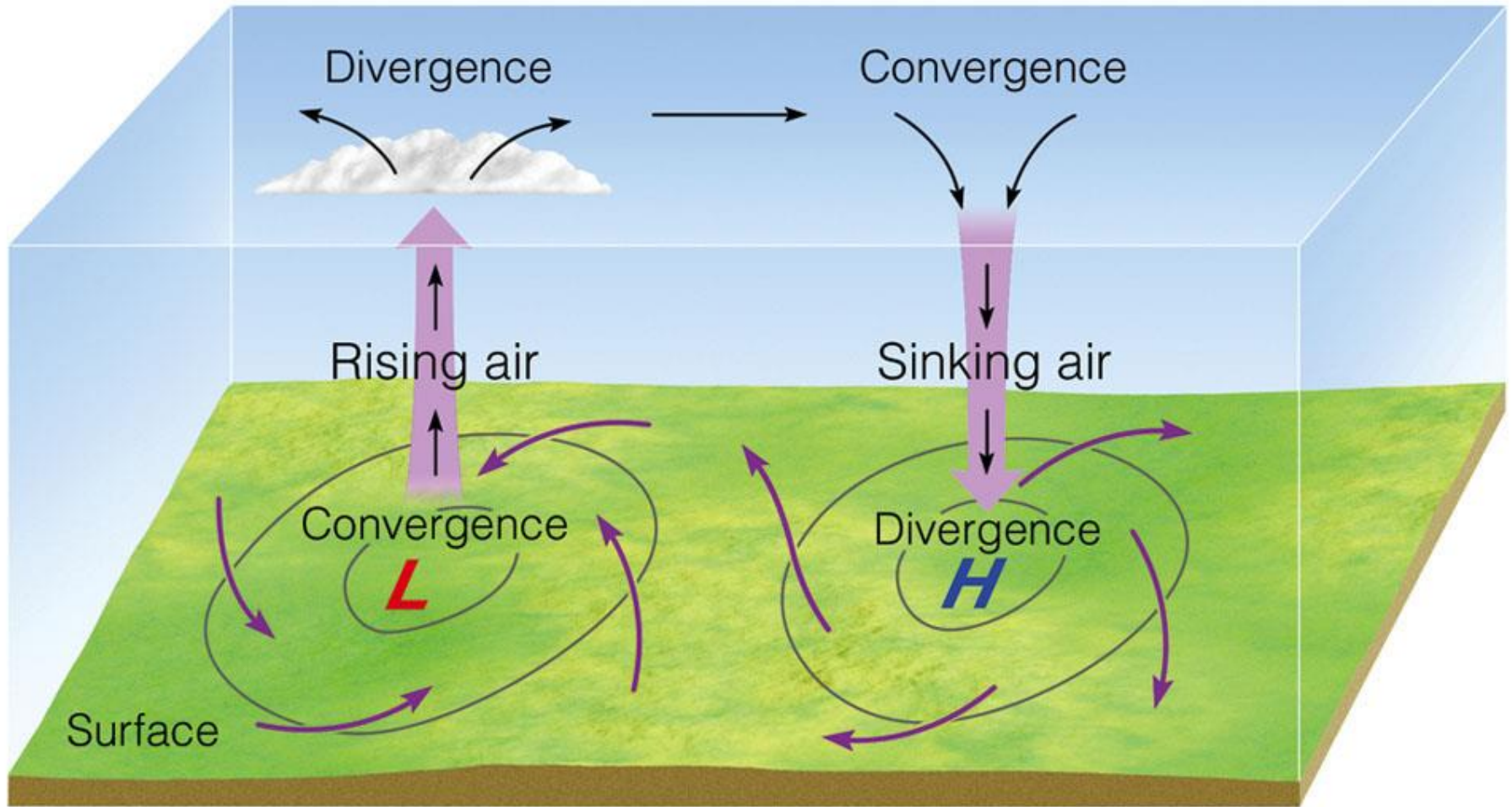
* 藍色風標：理論下的地轉風風場，

* 紅色風標：實際觀測到的風場



Winds and vertical motions associated with surface highs and lows

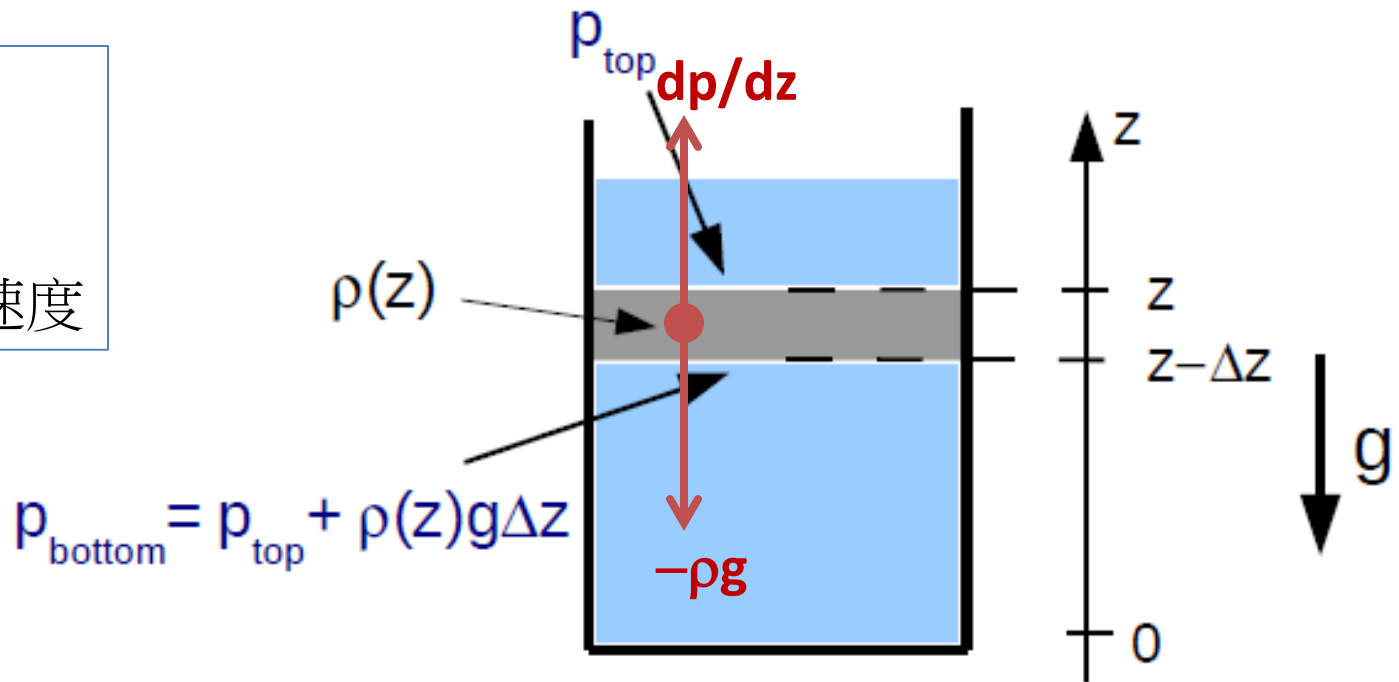
(in the Northern Hemisphere)



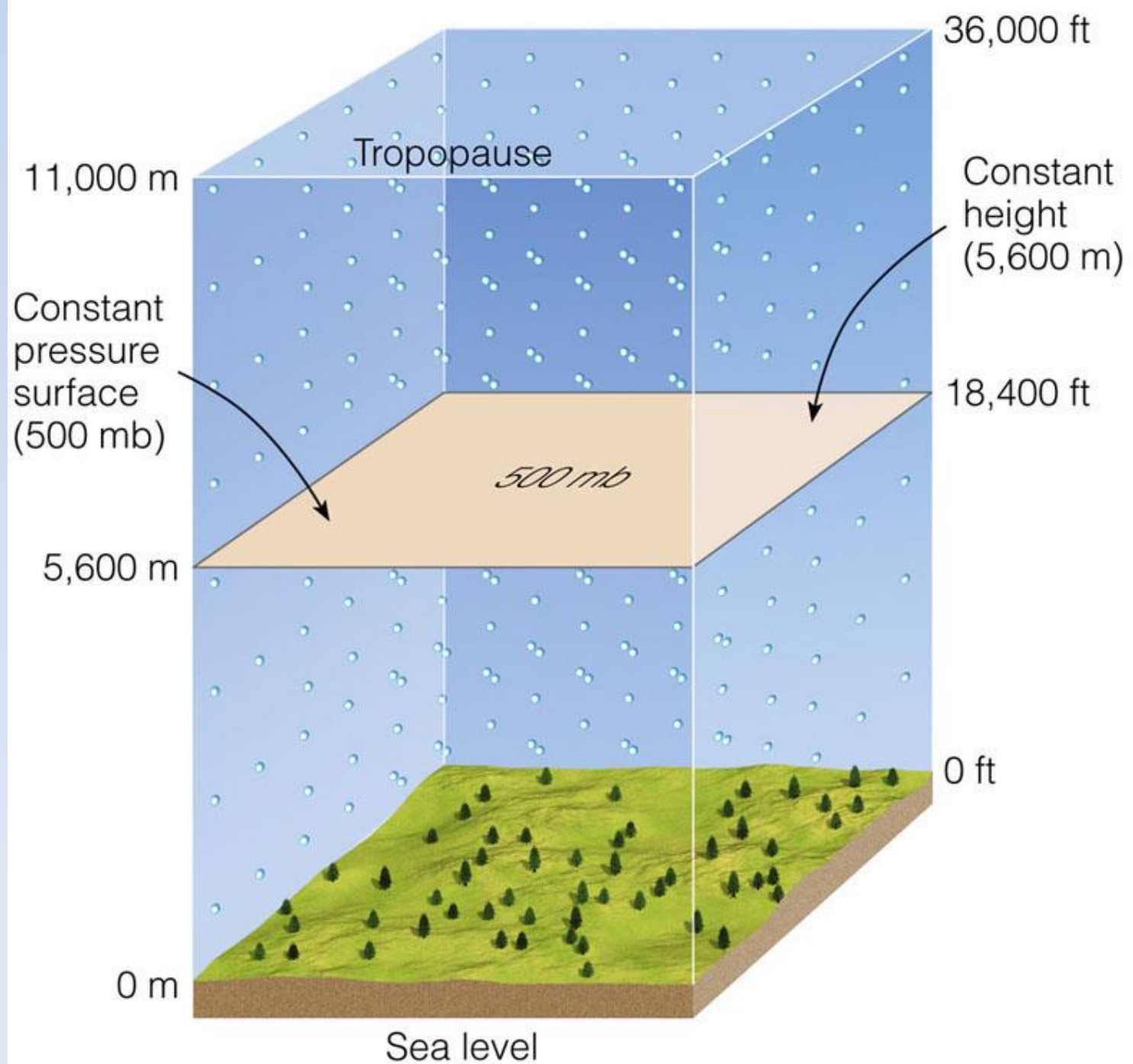
The Hydrostatic Equilibrium

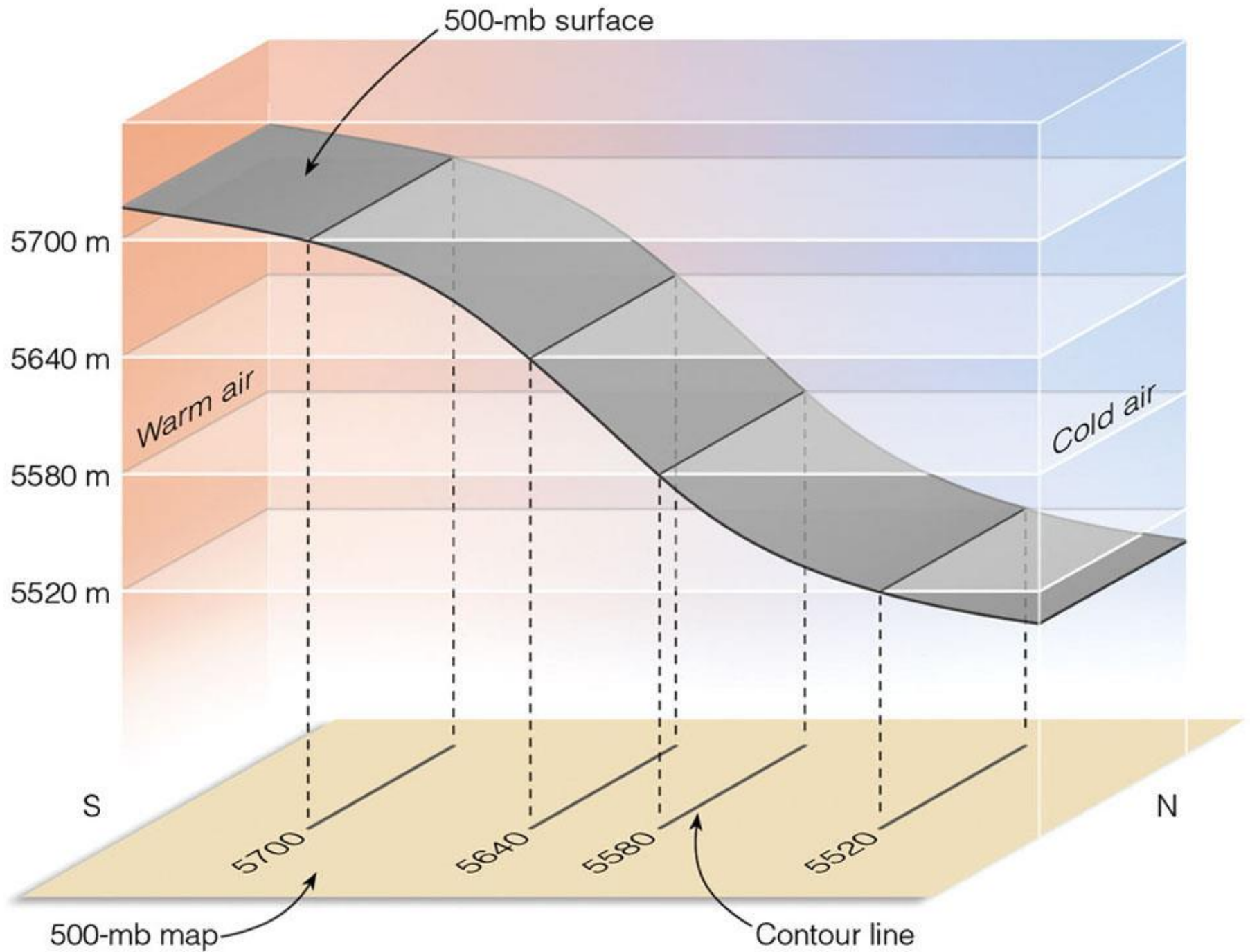
- * 無其他外力作用下的靜止大氣，垂直方向的氣壓梯度力會與空氣分子受到的重力達到平衡（大氣靜力穩定 atmospheric hydrostatic equilibrium）

z: 高度
p(z): 壓力
 $\rho(z)$: 密度
g: 重力加速度



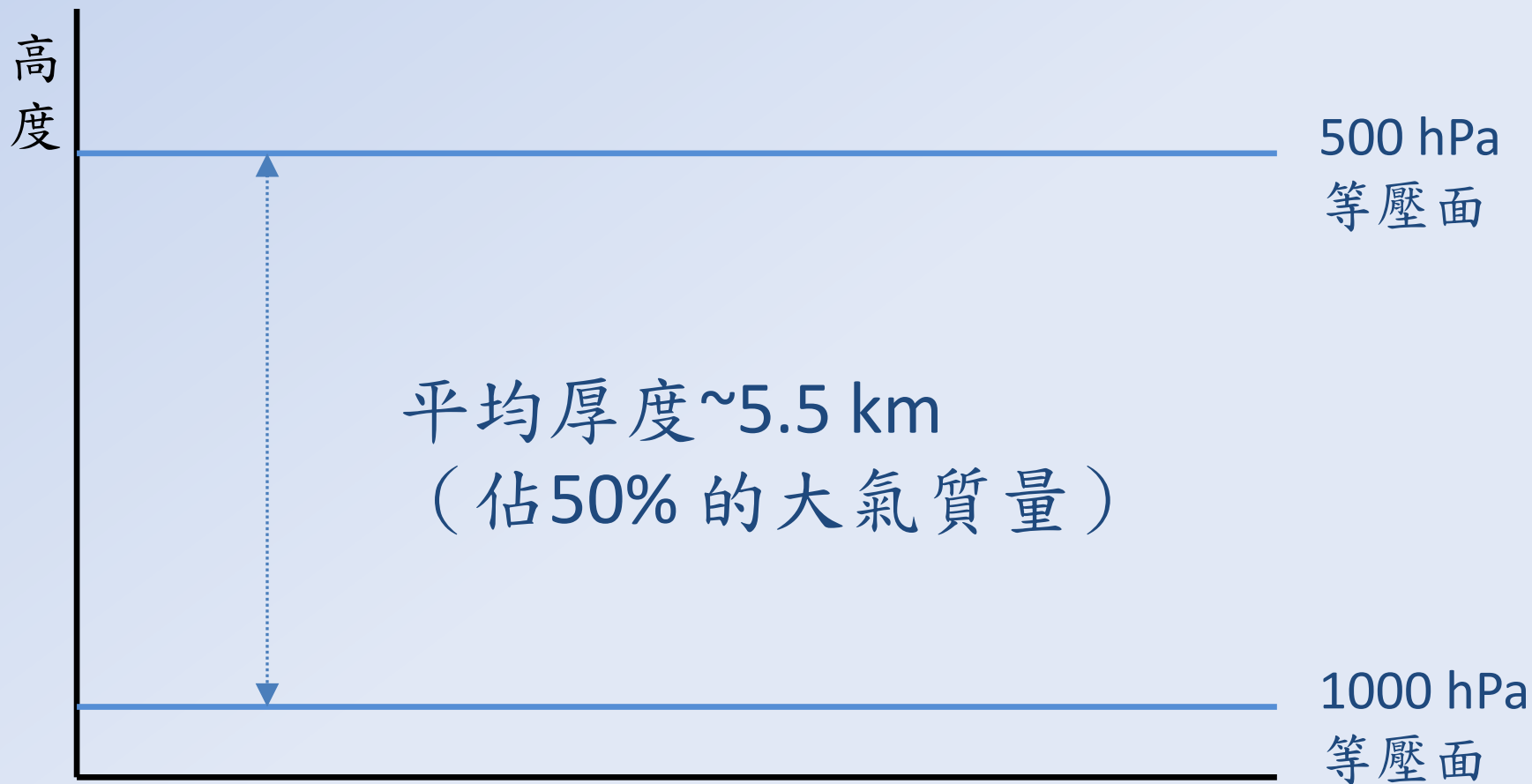
$$\Delta p = p_{\text{top}} - p_{\text{bottom}} = -\rho(z) g \Delta z$$
$$\Rightarrow \Delta p / \Delta z = -\rho(z) g$$

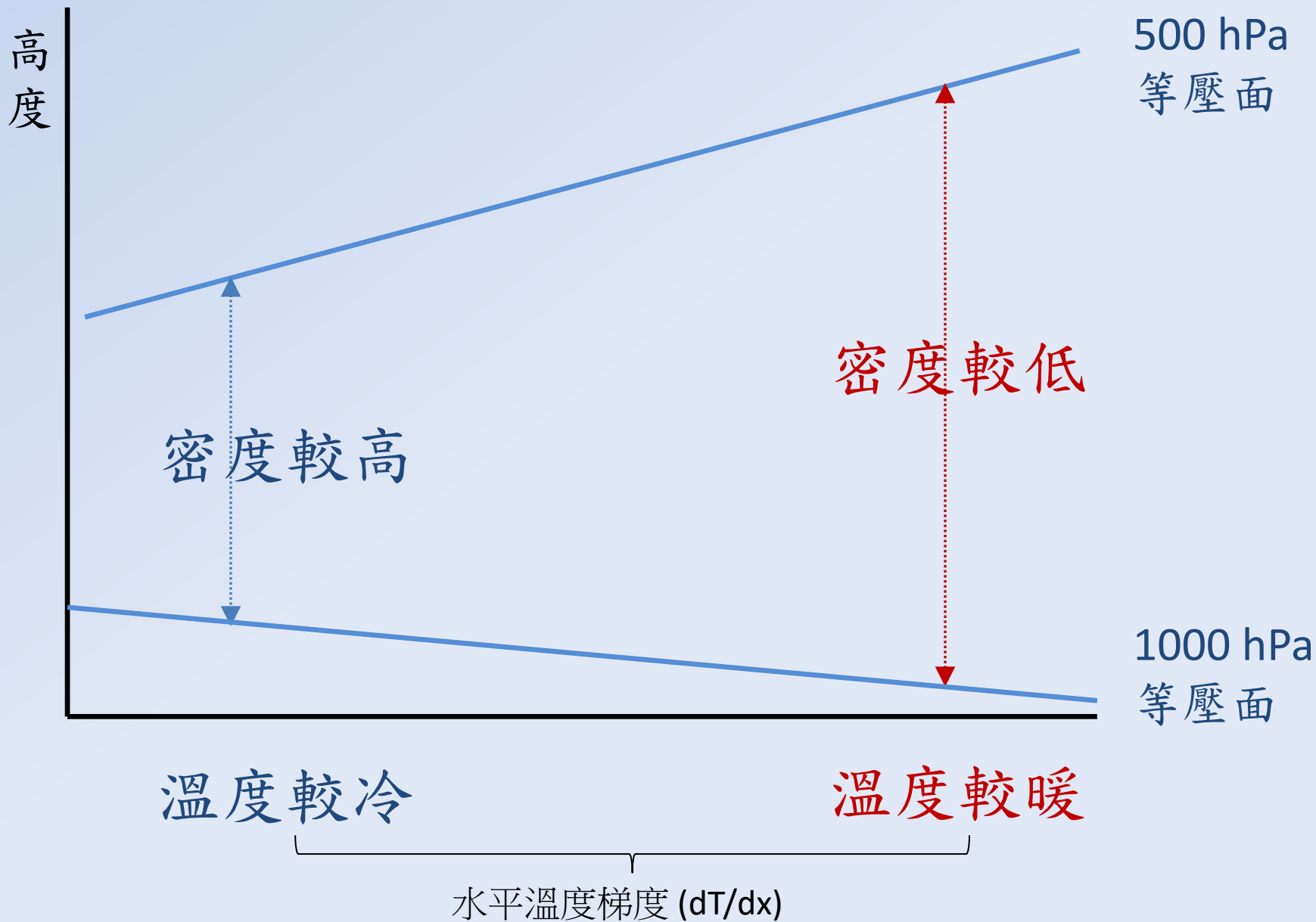


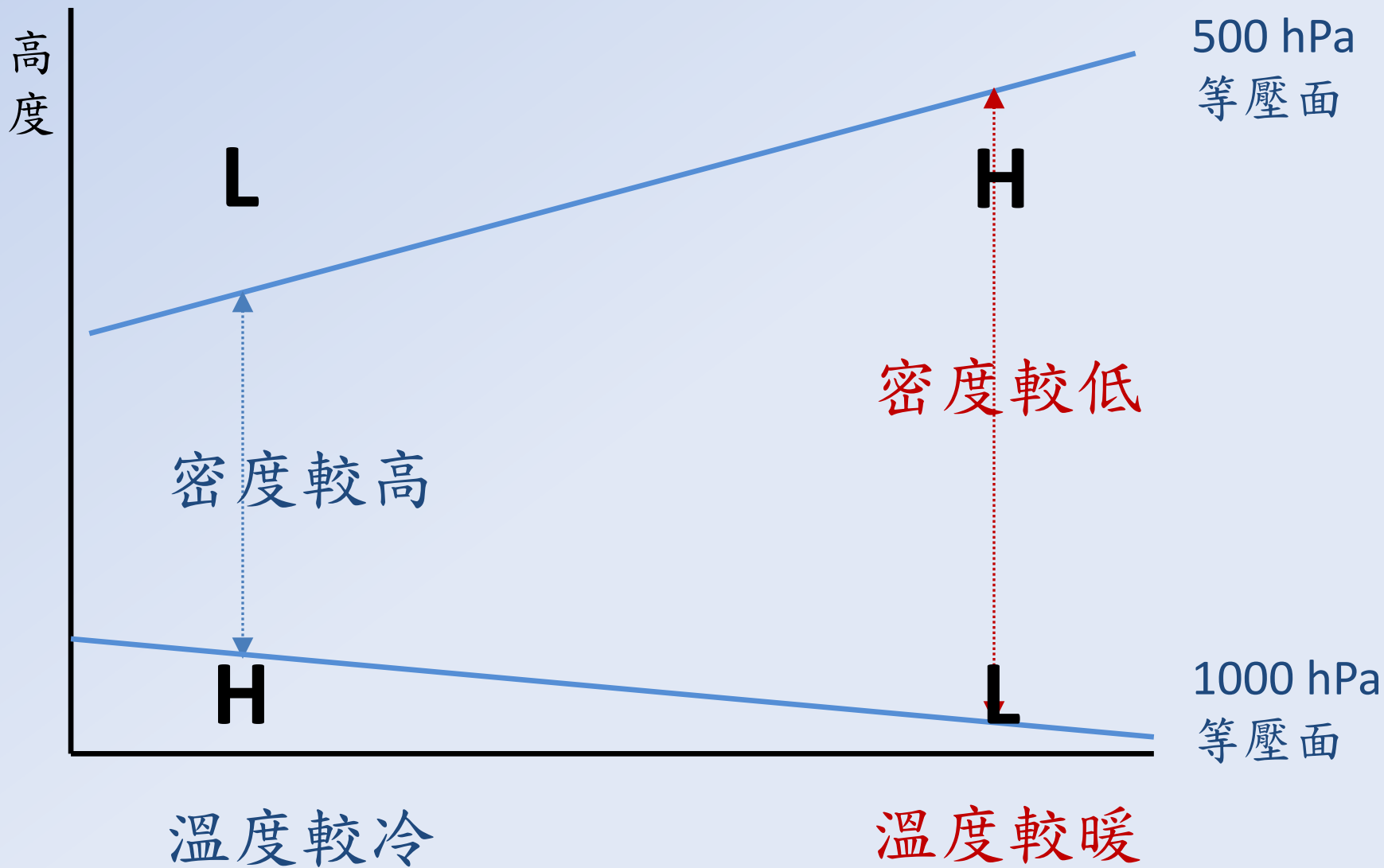


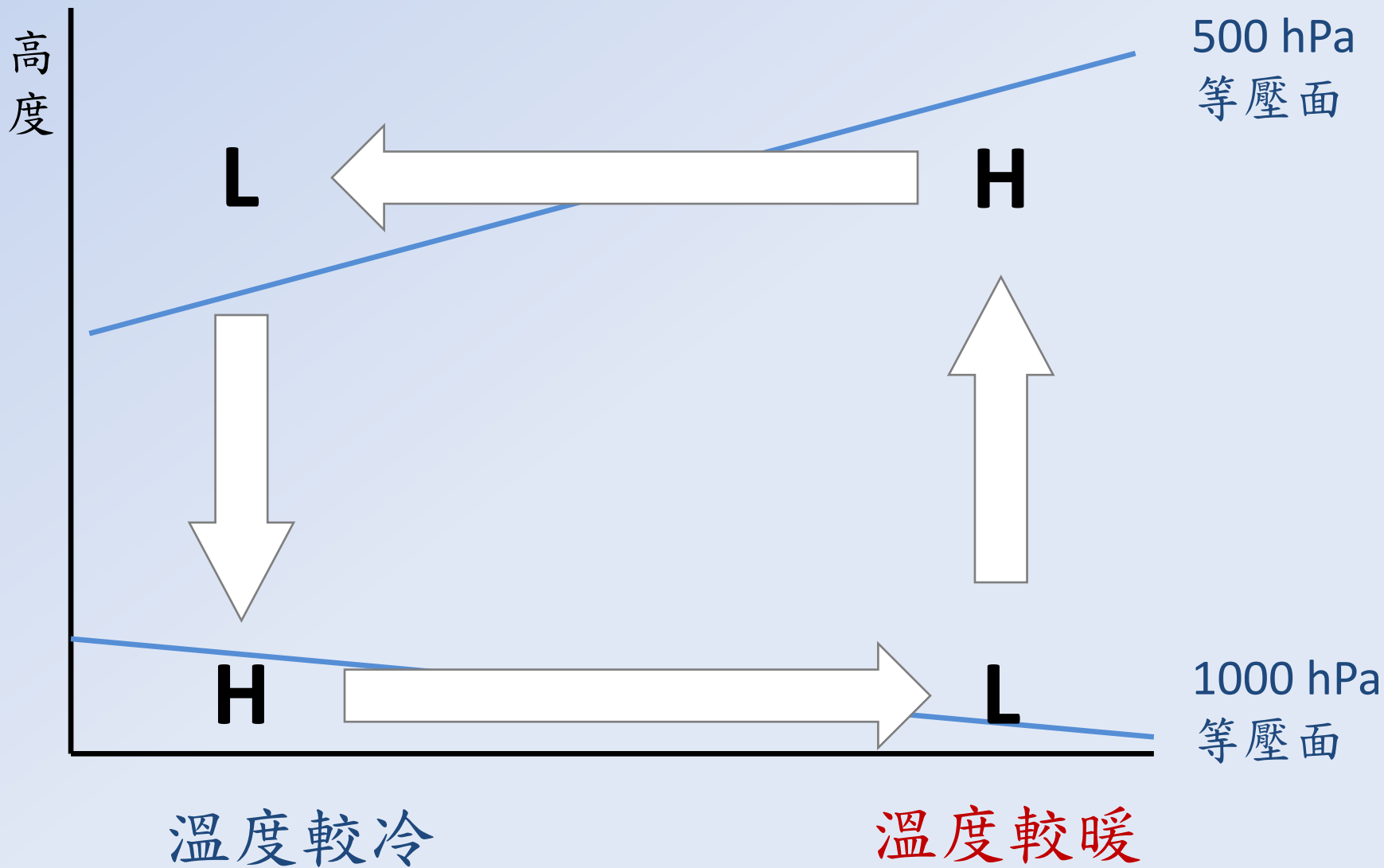
Thermal circulation

- * Heating and cooling of the atmosphere above the ground create cold, core high and warm, core low pressure cells.
- * Wind travels from high to low and rises until it cools and begins to sink.

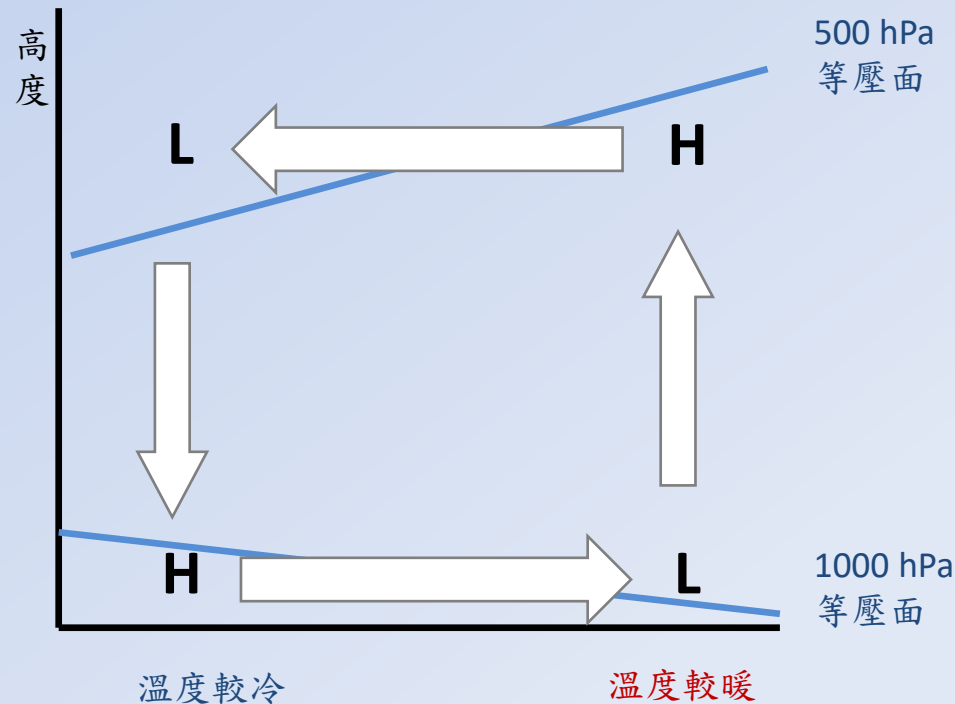








熱力直接環流



近地面存在水平溫度梯度

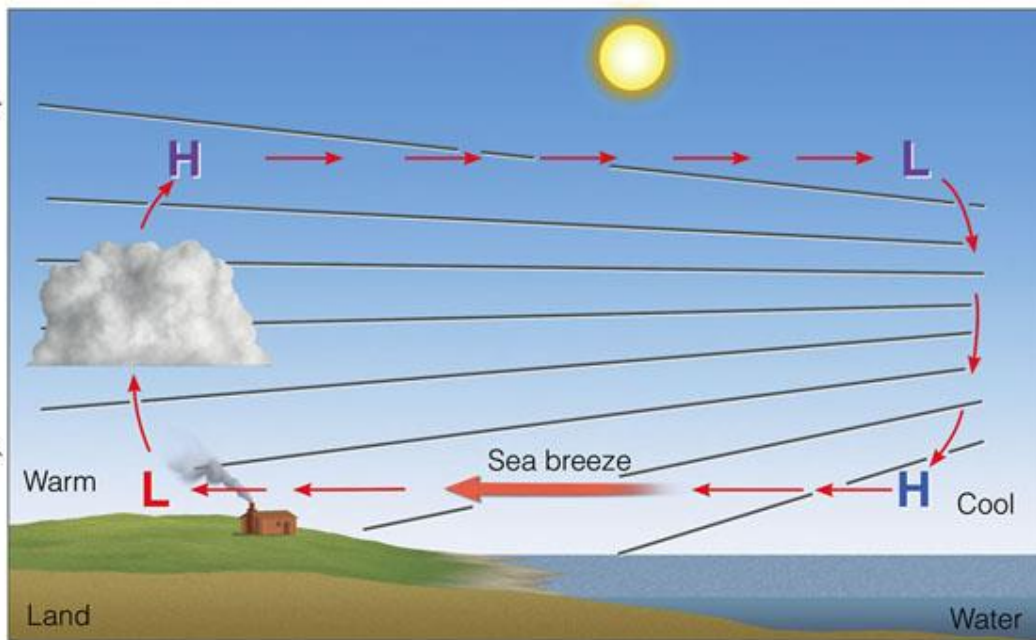
- 暖區冷區上方大氣密度不同
- 暖區高空為高壓、冷區高空為低壓
- 暖區低層為低壓、冷區低層為高壓
- 暖區上升運動、冷區下沉運動
- 高層風由暖區吹向冷區
- 近地面風由冷區吹向暖區
- 形成完整的大氣熱力環流

此環流可使地面的溫度梯度減弱（透過近地面溫度平流，與垂直運動絕熱上升冷卻、絕熱下沉增溫）→ 負回饋！

不同尺度的例子：海陸風、都市熱島、季風、哈德里胞

Sea and Land Breeze

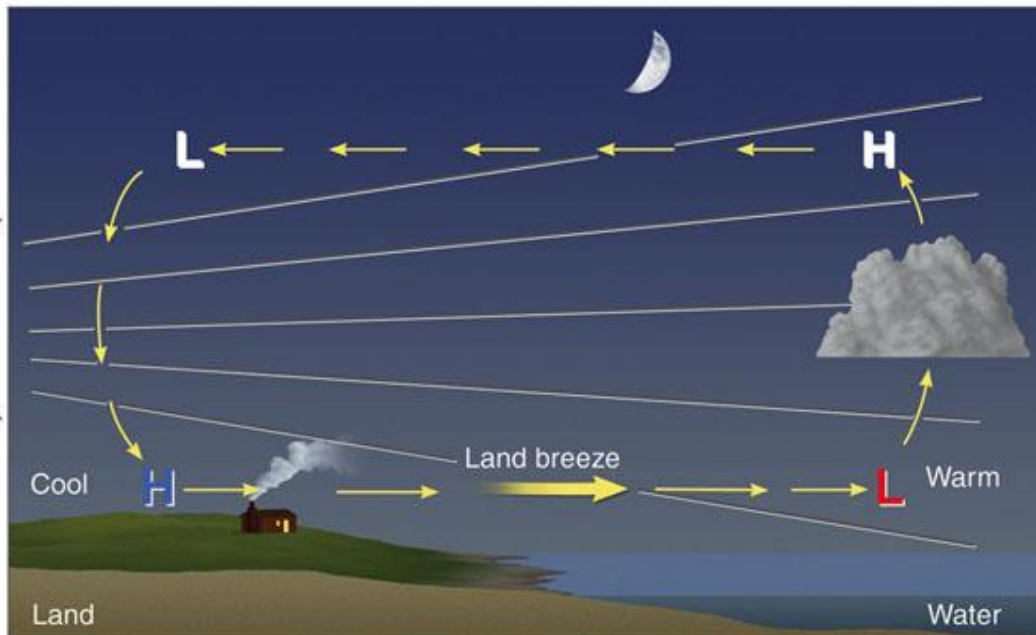
Pressure surfaces



(a) Sea breeze

Day: land hot, water cold
= sea breeze

Pressure surfaces

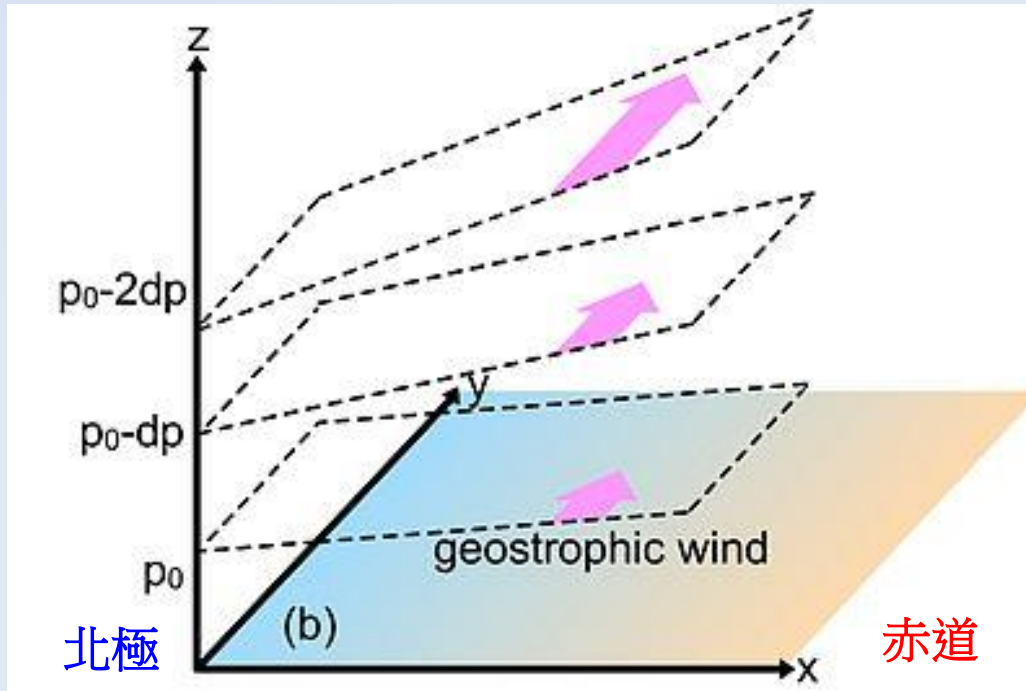


(b) Land breeze

Night: water hot, land cold
= land breeze

熱力風（thermal wind）與極鋒噴流

- * 地轉風的風速正比於等壓面「傾斜」的程度（即壓力梯度）
- * 水平溫度梯度造成等壓面傾斜，而且傾斜程度會隨高度增加，因此越往高處的地轉風風速越強，稱為「熱力風」關係（形成垂直風切（vertical wind shear））
- * 在中緯度地區，太陽斜射時間長（尤其是冬天），近地面南北向溫度梯度大，出現明顯的西風垂直風切（ $>5 \text{ m/s/km}$ ），且在對流層頂附近西風風速最強（噴流中心 $50\sim 75 \text{ m/s}$ ）



熱力風（thermal wind）與極鋒噴流

Geostrophic + Hydrostatic Balance

