

第三章 大气热力学

3.1 大气温度

3.2 水分循环

3.3 热流量方程

3.4 绝热过程和绝热温度变化

3.5 热力学图解

3.6 大气稳定度

思考题

3.1 大气温度

一、平均气温和气温极值

○ *Daily mean* 日平均

- Average of 24 hourly readings

○ *Daily temperature range* 日较差

- Difference of daily high and low

○ *Monthly mean* 月平均

- Average of daily means

○ *Annual mean* 年平均

- Average of monthly means

○ *Annual temperature range* 年较差

- Difference of highest and lowest monthly mean

3.1 大气温度

二、影响地面气温因子

➤ 水陆热力差异

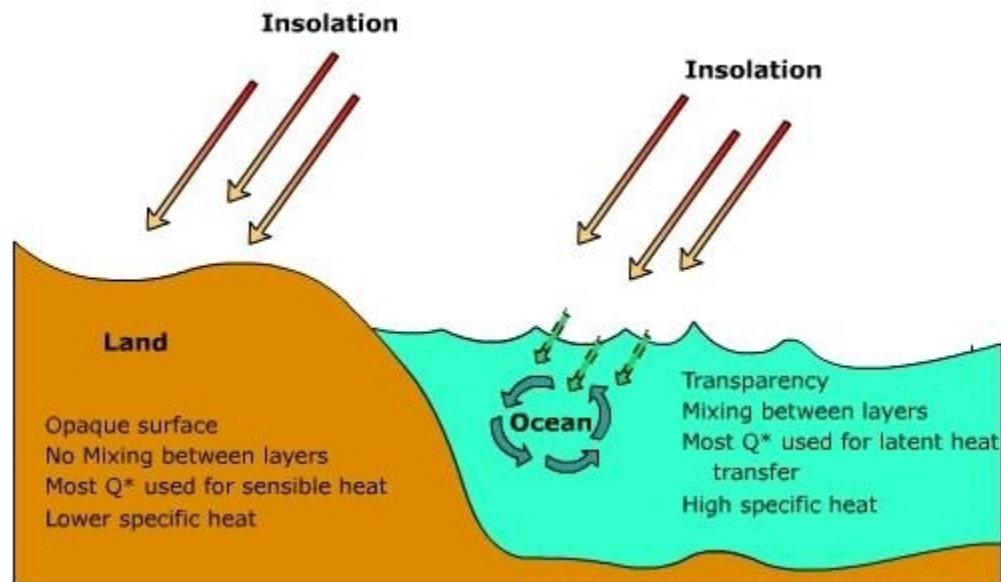
- (1) 吸收、反射和透射率差异
- (2) 比热差异
- (3) 蒸发差异

➤ 洋流

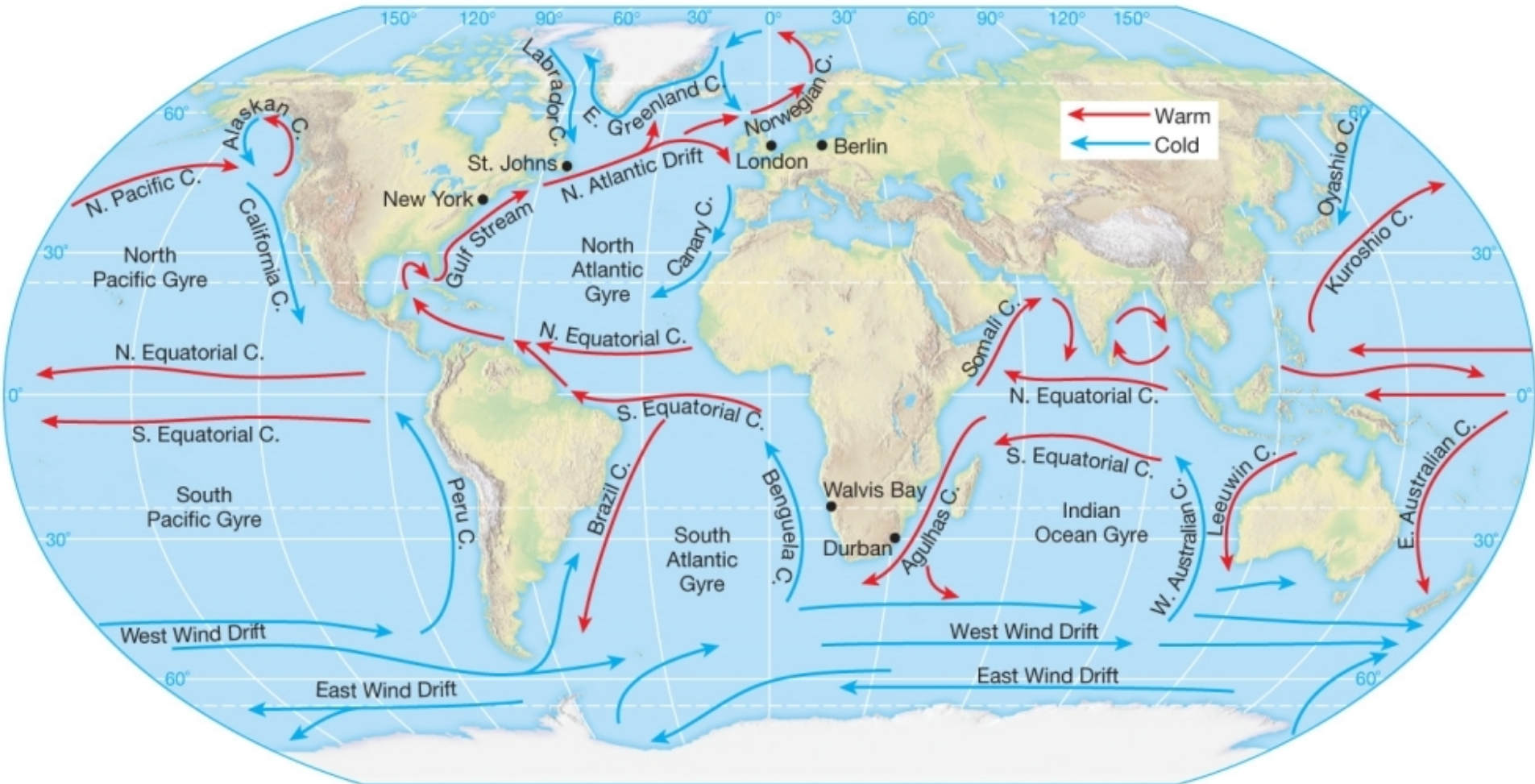
- (1) 暖流
- (2) 寒流

➤ 高度

➤ 地理纬度



Ocean Currents

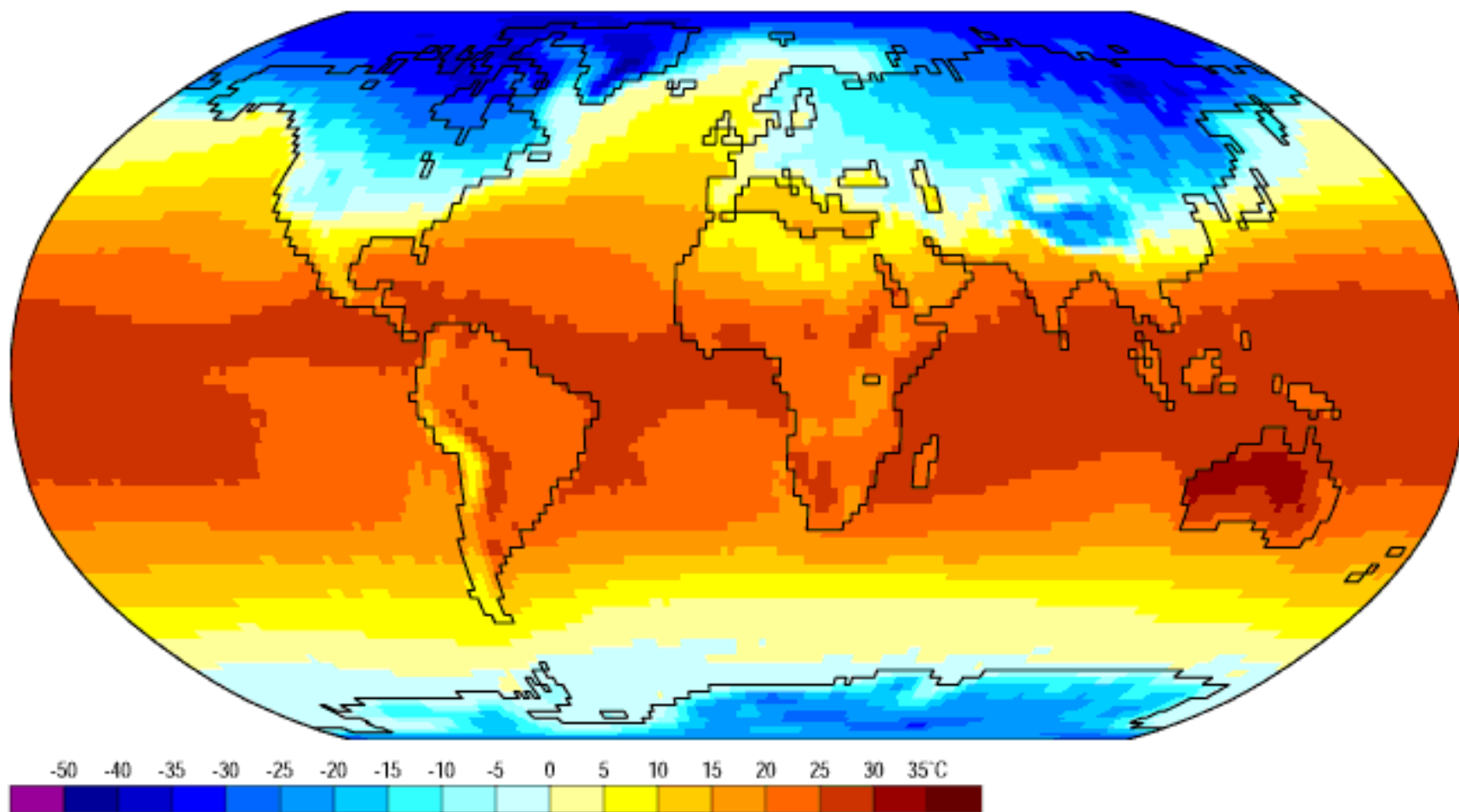


3.1 大气温度

三、全球海平面气温分布

Air Temperature

Jan

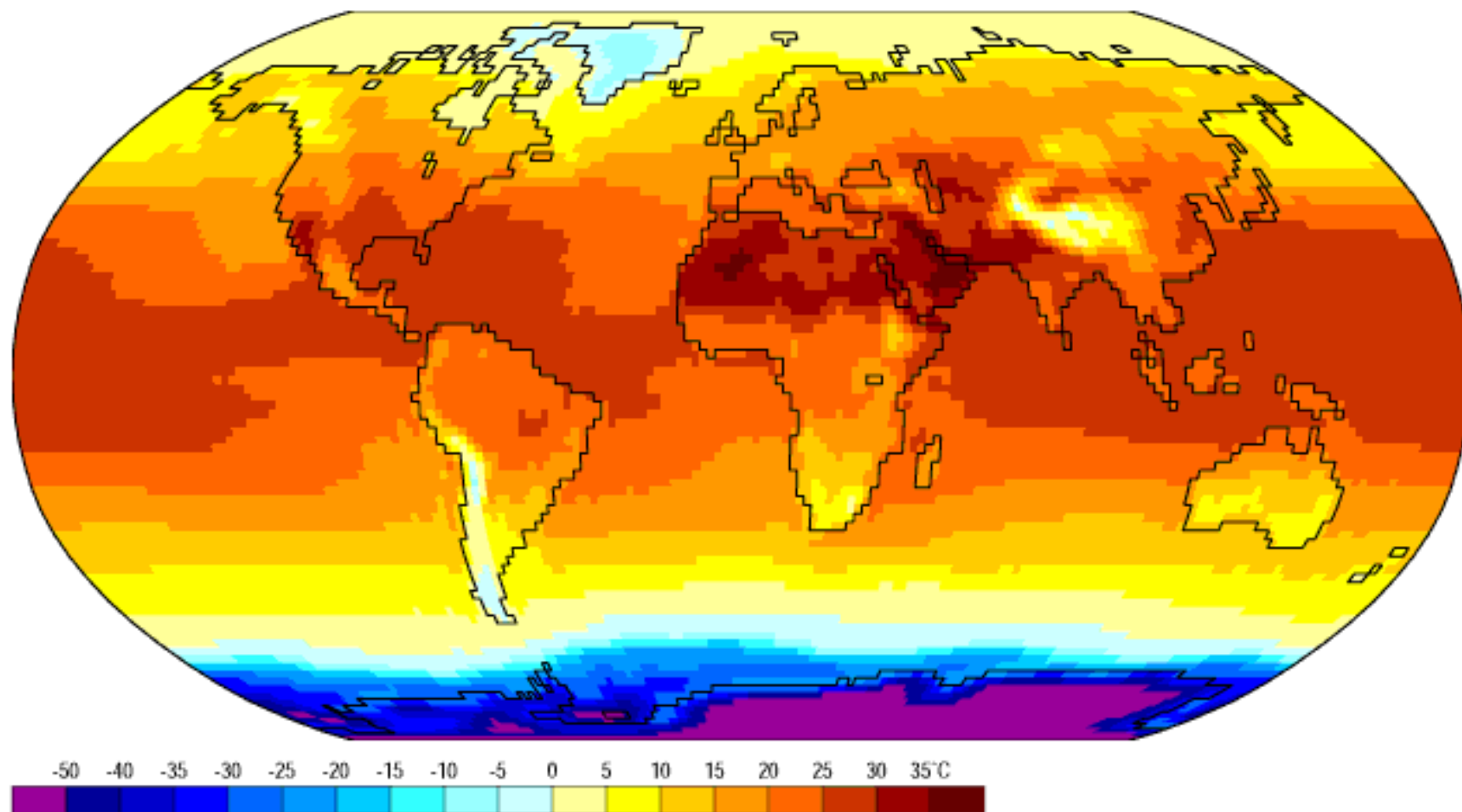


3.1 大气温度

三、全球海平面气温分布

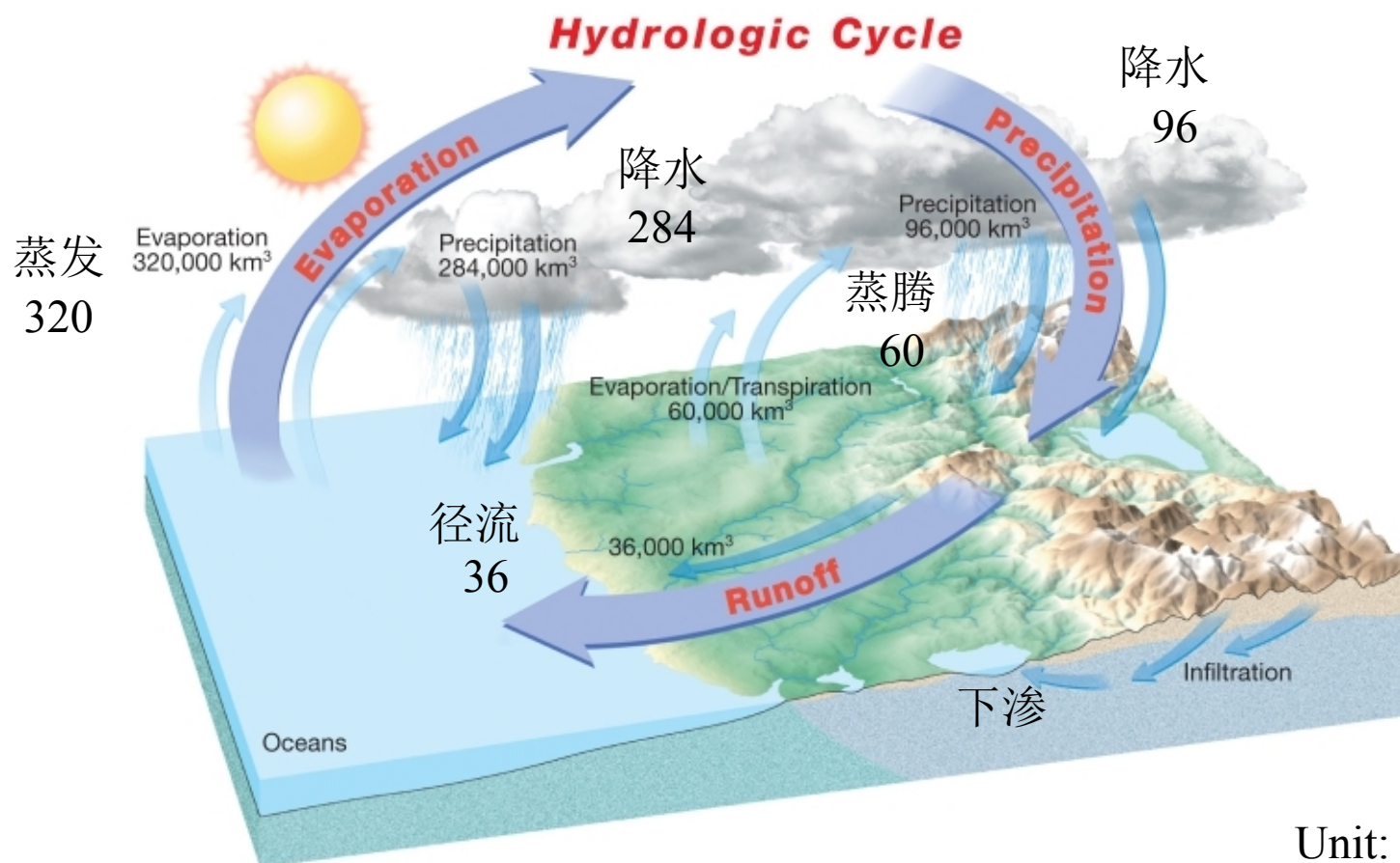
Air Temperature

Jul



3.2 水分循环

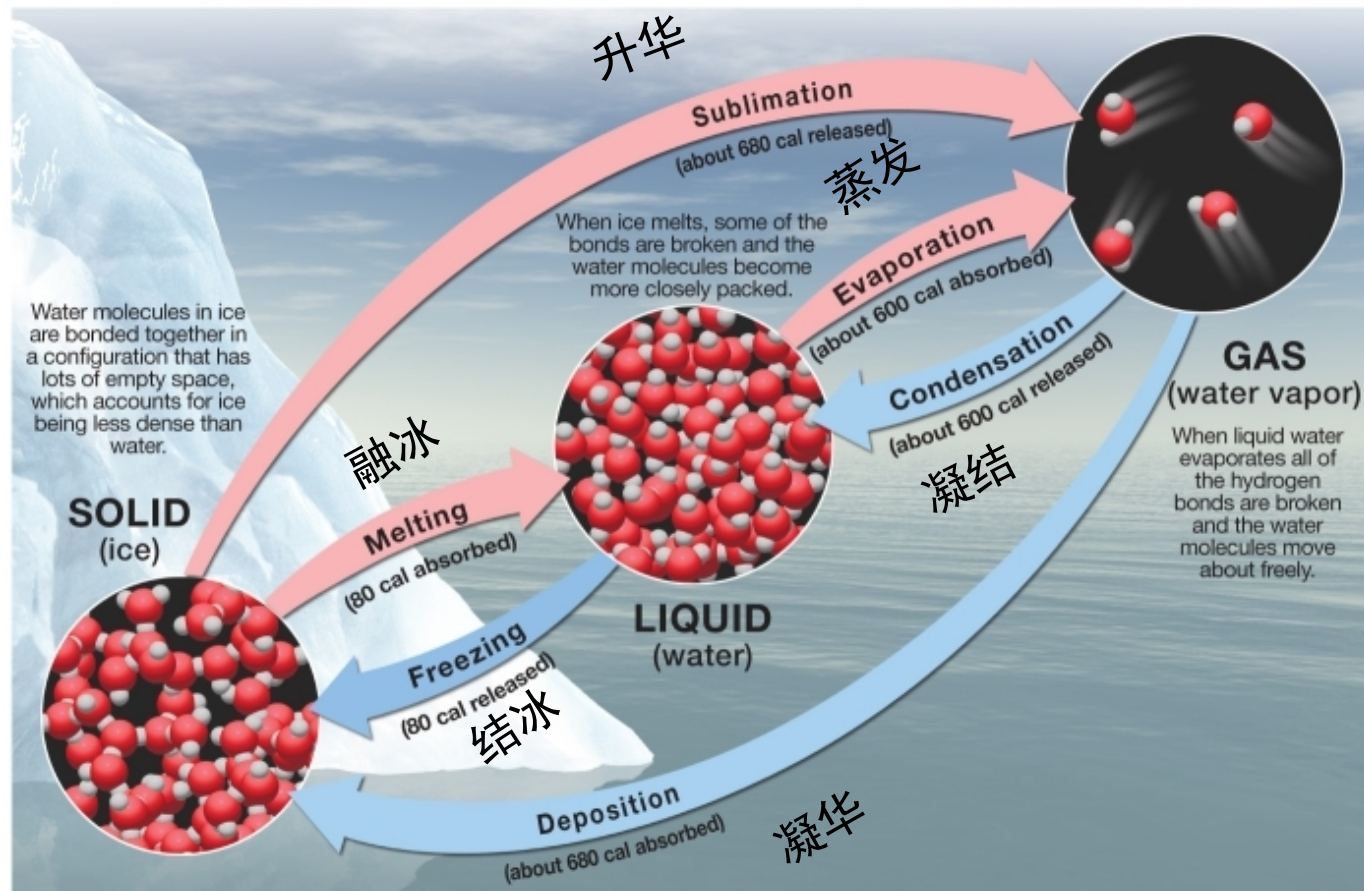
一、水分循环



3.2 水分循环

二、水的相变和相平衡

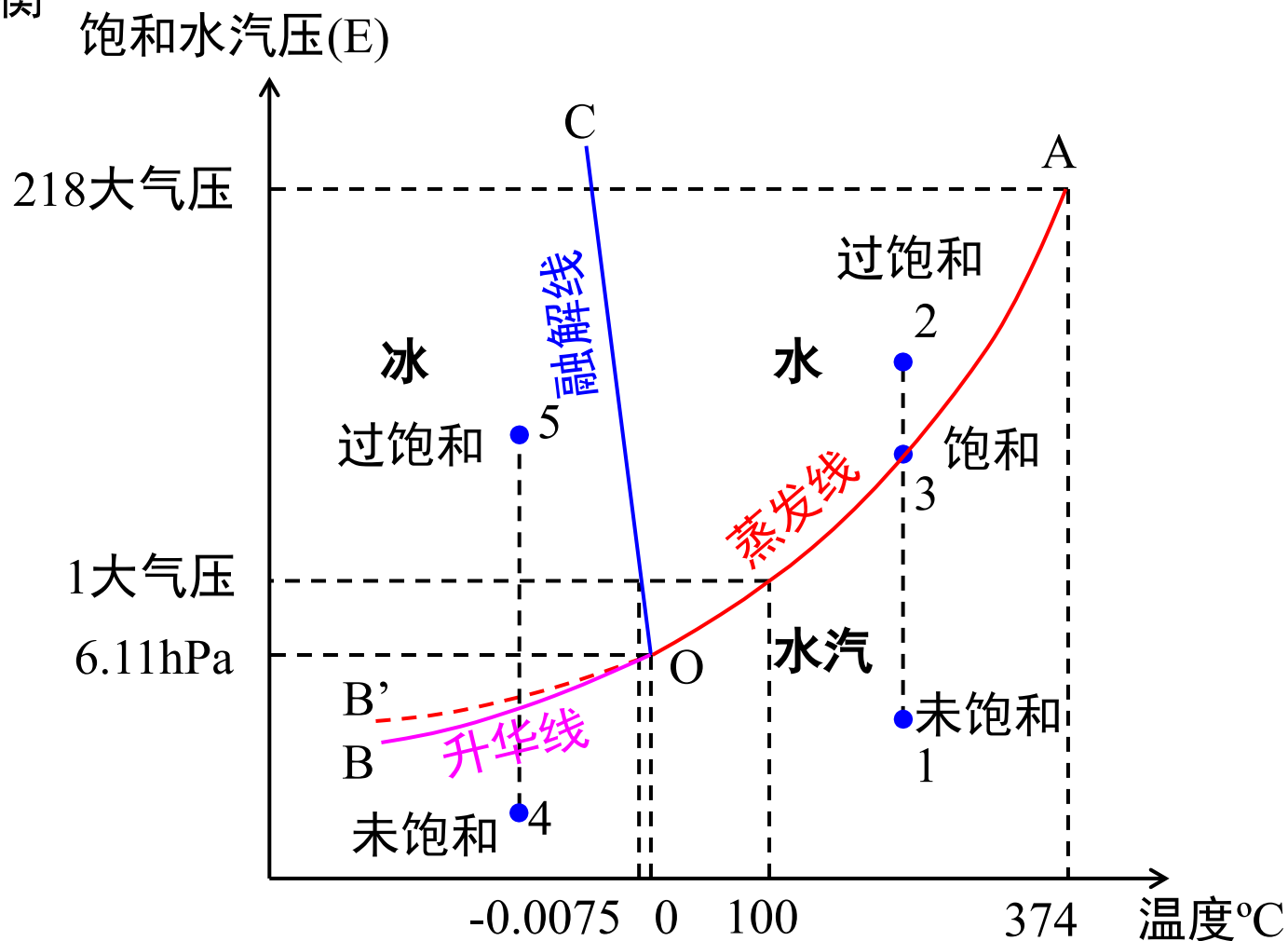
➤ 水相变



3.2 水分循环

二、水的相变和相平衡

➤ 相平衡



3.2 水分循环

三、饱和水汽压和温度的关系

➤ Clapeyron-Clausius方程

$$\frac{dE}{dT} = \frac{LE}{R_v T^2}$$

E: 饱和水汽压 (hPa)

T: 热力学温度(K)

L: 汽化热(Jkg⁻¹)

R_v: 水汽气体常数(JK⁻¹kg⁻¹)

3.2 水分循环

三、饱和水汽压和温度的关系

➤ 纯水面和冰面的饱和水汽压

$$E = E_0 \exp \frac{L}{R_v} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right)$$

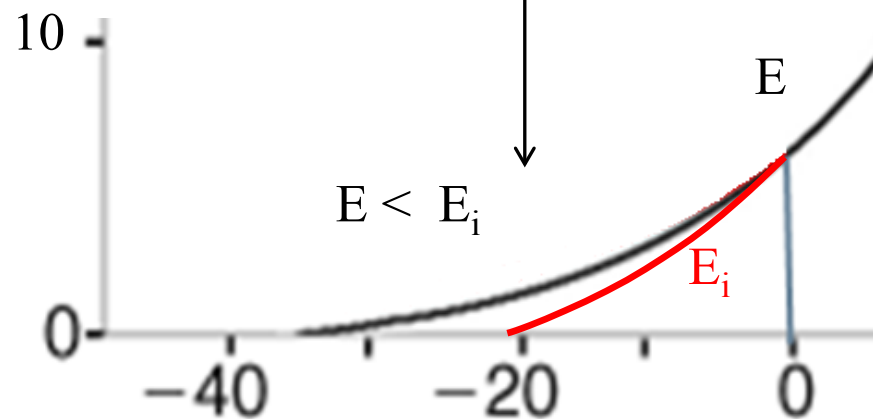
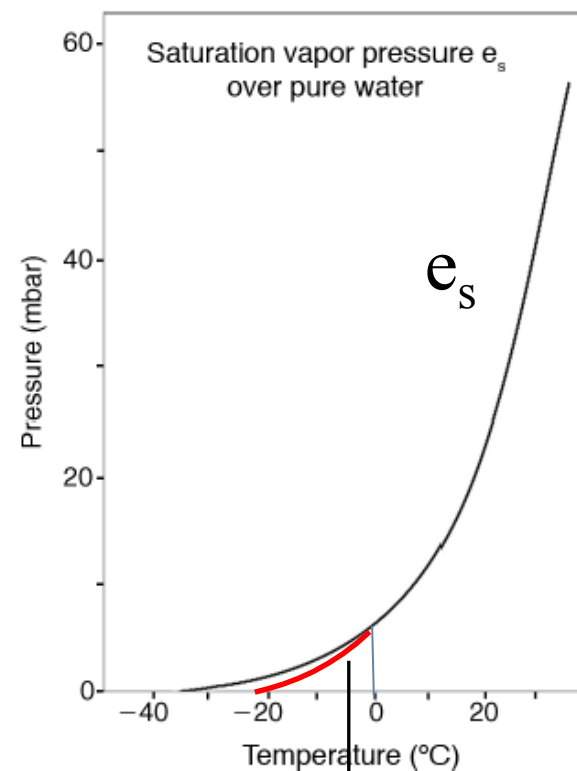
$$E_i = E_0 \exp \frac{L + L_d}{R_v} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right)$$

E : 纯水面饱和水汽压 (hPa)

E_i : 纯冰面饱和水汽压 (hPa)

E_0 : $T_0=273.15\text{K}$ 时饱和水汽压

L_d : 冰融解热(Jkg^{-1})



3.2 水分循环

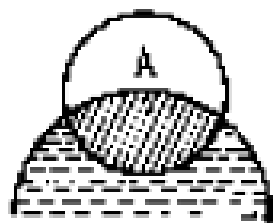
三、饱和水汽压和温度的关系

➤ 球形液滴表面的饱和水汽压

(1) 球形纯水滴
$$E_r \approx E \left(1 + \frac{c_r}{r} \right)$$
 曲率半径 $r < 10^{-6} \text{cm}$

当 $T=273\text{K}$ 时, $c_r \approx 1.2 \cdot 10^{-7} \text{cm}$

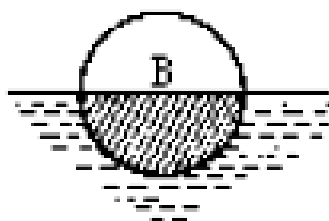
$\frac{c_r}{r}$ 称为饱和水汽压的“**曲率效应**”



凸面

$$r > 0$$

$$E_r > E$$



凸面

$$r < 0$$

$$E_r < E$$

3.2 水分循环

三、饱和水汽压和温度的关系

➤ 球形液滴表面的饱和水汽压

(2) 球形溶液滴表面

$$E_m \approx \left(1 + \frac{C_r}{r} - \frac{C_n}{r^3} \right)$$

$\frac{C_n}{r^3}$ 称为饱和水汽压的“**溶液效应**”，使饱和水汽压减小。 C_n 取决于溶质、溶剂等特性。

(3) 荷电水滴表面

当 $r < 10^{-6}$ cm时，产生“**电荷效应**”，与“溶液效应”相似，也使饱和水汽压减小。

3.3 热流量方程

热力学第一定律在大气科学中的形式——热流量方程

任一孤立系统（单位质量干空气）由状态I变化到状态II时，系统从外界吸收的热量dQ，等于系统内能增量dU与系统对外界做功dW之和，即

$$dQ = dU + dW$$

$$dU = c_v dT$$

$$dW = pAdL = pd\alpha$$

所以，

$$dQ = c_v dT + pd\alpha$$

由于，

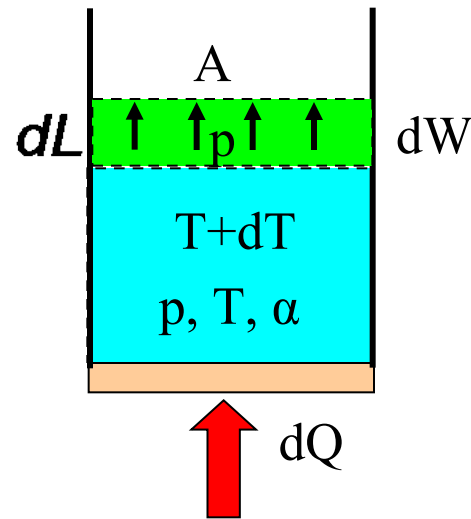
$$p\alpha = RT$$

所以，

$$dQ = (c_v + R)dT - \alpha dp$$

热流量方程

$$dQ = c_p dT - RT \frac{dp}{p} \quad (c_p = c_v + R)$$

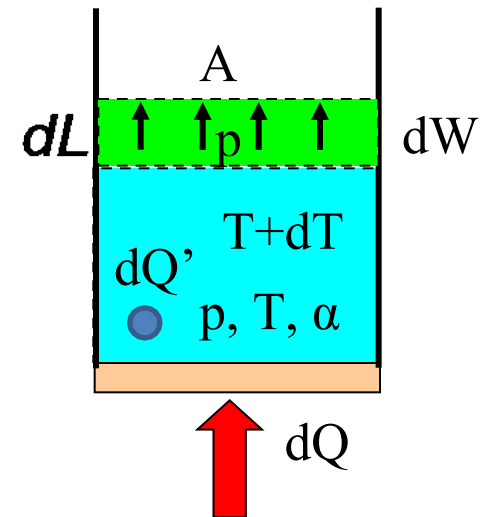


3.3 热流量方程

热力学第一定律在大气科学中的形式——热流量方程

任一孤立系统（**单位质量饱和湿空气**）由状态I变化到状态II时，系统从外界吸收的热量 dQ ，水汽凝结释放潜热 dQ' ，系统内能增量 dU 与系统对外界做功 dW ，则饱和湿空气的**热流量方程**为

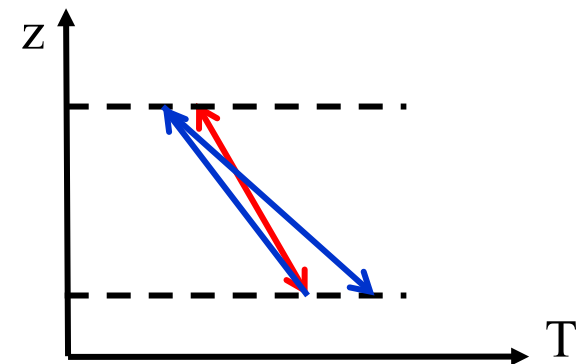
$$dQ + dQ' = c_p dT - RT \frac{dp}{p}$$



3.4 绝热过程和绝热温度变化

绝热过程概念

- 任一气块与外界之间无热量交换时的状态变化过程，叫做**绝热过程**(Adiabatic process)。
- 干空气或未饱和湿空气块绝热变化时，气块内部没有发生水相变化，称作**干绝热过程**(Dry adiabatic process)。
- 饱和湿空气块绝热变化时，气块内部有发生水相变化且凝结物全部留在气块内，称作（可逆）**湿绝热过程**(Wet adiabatic process)。
- 饱和湿空气块绝热变化时，气块内部有发生水相变化且凝结物部分或全部降落离开气块，称作（不可逆）**假绝热过程**(Pseudo adiabatic process)。



3.4 绝热过程和绝热温度变化

一、干绝热过程

- **泊松方程** (Poisson) : $dQ=0$, 因此, 根据干空气热力学第一定律, 气温变化为

$$dT = \frac{RT}{C_p p} dp$$

改写为

$$\frac{dT}{T} = \frac{R}{C_p} \frac{dp}{p}$$

从初始状态(T_0, P_0)到任意状态(T, P)积分, 得

$$\frac{T}{T_0} = \left(\frac{P}{P_0} \right)^{R/C_p} \quad (R/C_p = 0.288)$$

上述方程称为**泊松方程** (Poisson), 它反映了干绝热过程中气温度和气压间变化关系。

3.4 绝热过程和绝热温度变化

一、干绝热过程

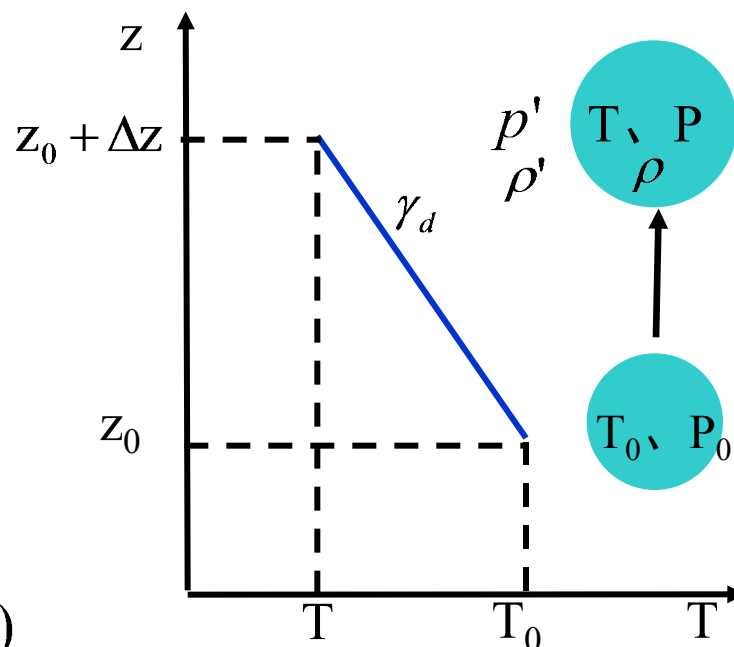
- **干绝热直减率**：干绝热过程中，气块温度随高度的递减率，用 γ_d 表示。

$$\gamma_d \equiv -\frac{dT}{dz} \approx 0.98^\circ\text{C}/100\text{m}$$

证明：Q $dT = \frac{RT}{C_p p} dp$

$$dp \approx dp' = -\rho' g dz$$

$$\begin{aligned} \therefore \gamma_d &\equiv -\frac{dT}{dz} = -\frac{RT}{C_p p} \frac{dp}{dz} \\ &= \frac{g}{C_p} \frac{\rho' RT}{p} = \frac{g}{C_p} \frac{\rho'}{\rho} \quad (\rho' \approx \rho) \\ &\approx \frac{g}{C_p} = 0.98^\circ\text{C}/100\text{m} \end{aligned}$$



3.4 绝热过程和绝热温度变化

一、干绝热过程

- **位温 θ** ：气块按干绝热过程变化到参考大气压（取1000hPa）时所具有的温度。

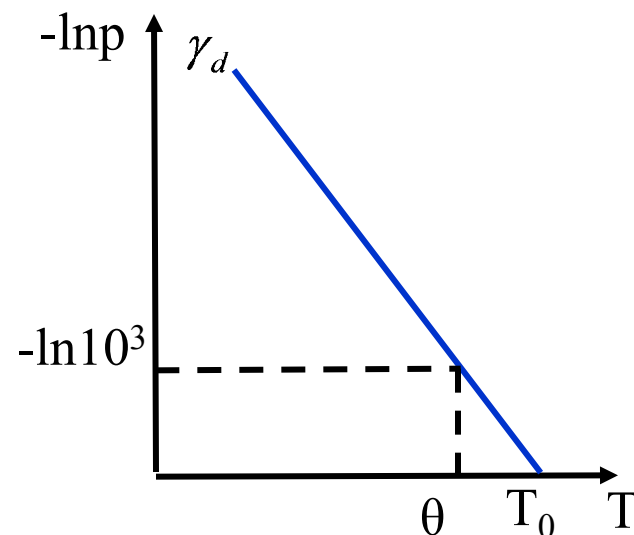
根据泊松方程，令 $p_0=1000\text{hPa}$, $T_0=\theta$ ，则

$$\frac{T}{\theta} = \left(\frac{P}{P_0} \right)^{R/C_p}$$

所以：
$$\theta = T \left(\frac{1000}{p} \right)^{0.288}$$

对于干绝热过程， $dQ=0$ ，则的 $\theta=0$ ，即干绝热过程，位温保守。

温度对数压力图解：横坐标温度 T ，纵坐标对数压力 $-\ln p$ ，该图上干绝热过程线为一直线，称为**干绝热线**。干绝线上位温是不变的，因此又称**等位温线**。



3.4 绝热过程和绝热温度变化

一、干绝热过程

- **位温垂直梯度** $\frac{\partial \theta}{\partial z}$: 表示位温随高度的分别变化。

对位温表达式取对数，再对高度 z 微分，
利用静力学方程和干空气状态方程，得

$$\frac{\partial \theta}{\partial z} = \frac{\theta}{T} (\gamma_d - \gamma)$$

其中， $\gamma \equiv -\frac{\partial T}{\partial z}$ 为气温直减率

位温垂直梯度可用于判断大气静力**稳定度**。

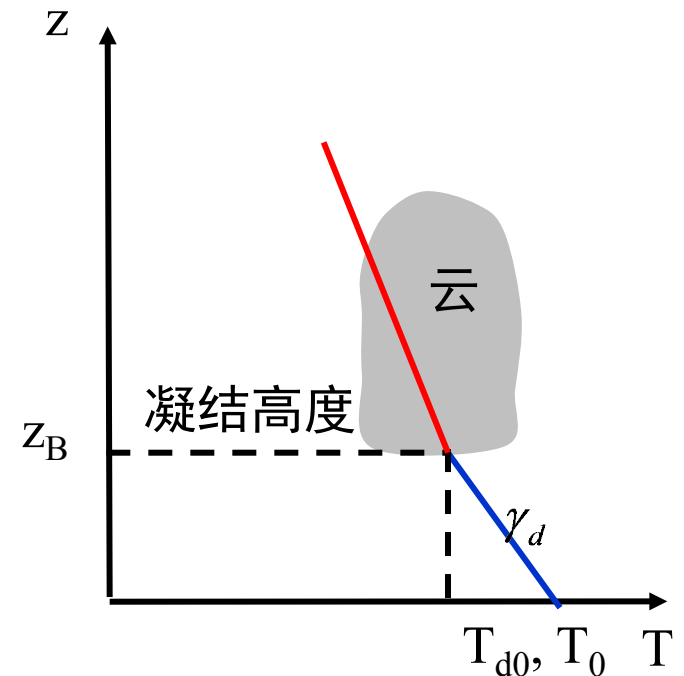
3.4 绝热过程和绝热温度变化

一、干绝热过程

- **抬升凝结高度 z_c** ：未饱和湿空气块按干绝热过程从地面上升时，随着气块温度下降，饱和水汽压迅速减小，到一定高度饱和水汽压等于水汽压，气块达到饱和，该高度称为（抬升）凝结高度。

$$z \approx 123(T_0 - T_{d0})$$

T_0 和 T_{d0} 分别为初始高度的气温和露点温度.



3.4 绝热过程和绝热温度变化

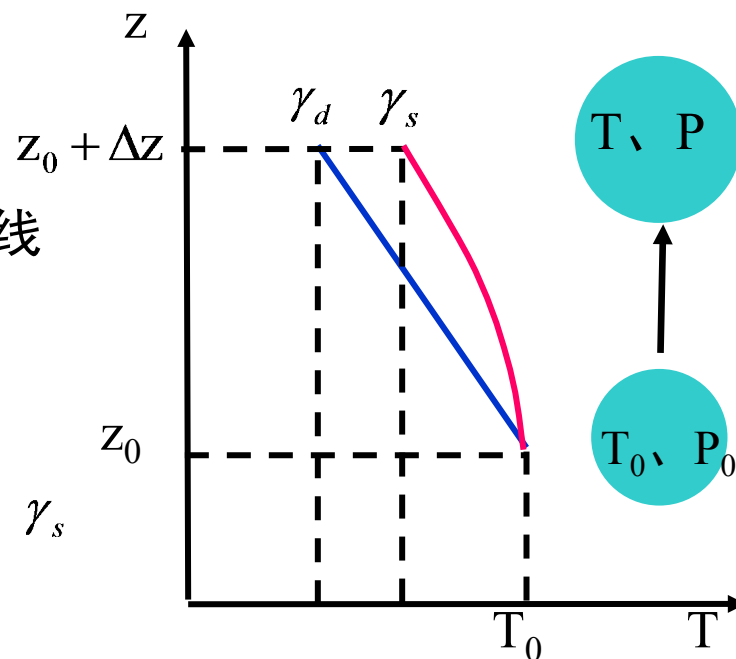
二、饱和湿空气的绝热过程

- 湿绝热直减率

如前所述，饱和湿空气块绝热过程分为：可逆湿绝热过程和不可逆假绝热过程，实际介于两者之间，有时统称为湿绝热过程。湿绝热过程中，气块温度随高度的递减率，称为湿绝热直减率 γ_s ，可证明：

$$\gamma_s = \gamma_d + \frac{L}{C_p} \frac{dr_s}{dz}$$

- I) $\gamma_s < \gamma_d$ ，故湿绝热线总在干绝热线之右；
- II) 不是常数，是气温和气压的函数。
- III) 高温时，比湿大、凝结量多，故 γ_s 小，低温时相反。



3.4 绝热过程和绝热温度变化

二、饱和湿空气的绝热过程

- 假相当位温

未饱和湿空气块刚开始上升时，按干绝热直减率降温，至凝结高度后，若继续上升，则按湿绝热直减率降温，此时发生水汽凝结，若凝结物部分或全部降落离开气块，则当其下降时，将按干绝热直减率直减率升温，当其回到原来高度时，温度将高于上升前的温度，这个过程是不可逆过程，即这种状态变化过程中位温不再守恒。因此，需定义一个新物理量，能在所有绝热过程中都守恒，即假相当位温。

3.4 绝热过程和绝热温度变化

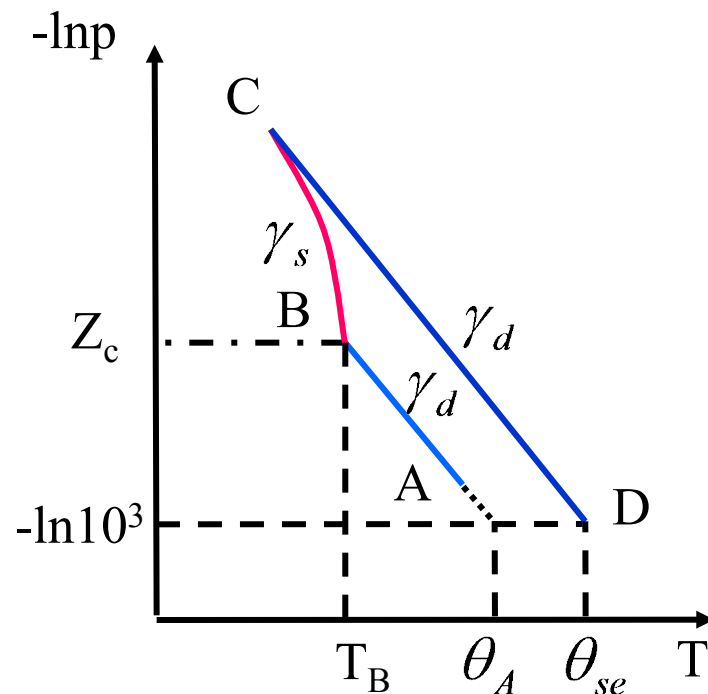
二、饱和湿空气的绝热过程

- 假相当位温

未饱和湿空气块从A上升，按干绝热直减率降温，至凝结高度 Z_c 后，继续上升至C，按湿绝热直减率降温，期间全部水汽凝结并降落离开气块，则当其从C按干绝热直减率下降至1000hPa (D) 具有的温度，称为假相当位温 θ_{se} 。

$$\theta_{se} = \theta_A \exp\left(\frac{Lr_s}{C_p T_B}\right)$$

图中C是唯一的，即当全部水汽凝结并离开气块时的高度，从C按 γ_d 下降到D具有的温度也就唯一，因此，可根据线确定 θ_{se}



以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/655033313123011213>