

第三章 等压过程

2024.10.18 建档

章节概述 水要发生相变，可以通过很多方式。本章讲解通过等压过程的状态变化。

3.1 等压过程

3.1.1 基本概念

等压过程 大气中气压随高度逐渐降低，因此等压过程一般发生在水平面上。
且在小范围内，同一高度压强近似不变。

近地面典型现象：露珠形成（近地面层发生的相态变化）、
冬季无风夜晚成雾（空气冷，无风水汽集聚）
冬季清晨树枝成霜（直接凝华，由于 $e_i < e_s$ ）

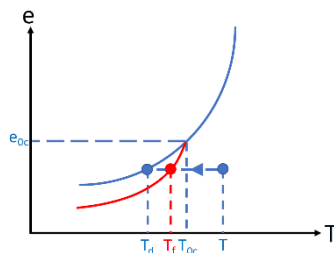
干球温度 T 气块不受太阳直接辐射所有的温度

露点温度 T_d 水汽含量不变，气块等压降温达到水面饱和的温度

霜点温度 T_f 水汽含量不变，气块等压降温达到冰面饱和的温度

湿球温度 T_w 绝热条件与等压条件，通过向一个空气块蒸发水汽使其冷却，直到其相对于平水面饱和时所具有的温度。水缓慢蒸发为水汽，**水蒸发所需的潜热完全来自于湿空气**，降温到一定程度时，**空气块饱和**，此时的温度即为湿球温度。

测量：在温度表底部的玻璃球外面包裹一层**湿棉布**来测量



3.1.2 露点、霜点温度的计算 C-C 方程

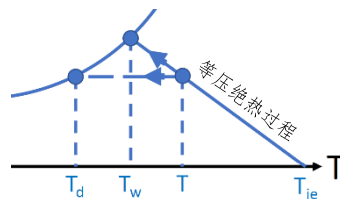
目的 已知气块初始温度和水汽，求 T_f 、 T_d

方法 $e_s = A \exp(-B/T)$ 饱和曲线与 T 相关。使用气块所有的 e 代入，即可解得 T_d

推导 $\frac{de_s}{dT} \approx \frac{l_v(T)}{T V_V} = \frac{l_v(T) e_s(T)}{R_V T^2}$ $d \ln e_s = \frac{l_v}{R_V T^2} dT \Rightarrow \int_T^{T_d} d \ln e_s = \int_T^{T_d} \frac{l_v}{R_V T^2} dT \Rightarrow \ln e_s(T_d) - \ln e_s(T) = \frac{l_v}{R_V} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_d} \right)$

露点温度 $\ln \frac{e_s(T_d)}{e_s(T)} = \frac{l_v}{R_V} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_d} \right) \Rightarrow \frac{1}{T_d} = \frac{1}{T} - \frac{\ln f \cdot R_V}{l_v}$

霜点温度 $\ln \frac{e_i(T_f)}{e_i(T)} = \frac{l_s}{R_V} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_f} \right) \Rightarrow \frac{1}{T_f} = \frac{1}{T} - \frac{\ln f_i \cdot R_V}{l_v}$



3.1.3 湿球温度的计算

图示 气块斜向上升， e 增加， T 减小，直到与 e_s 线交汇，**交点温度即为湿球温度**

反方向：当所有水汽全部凝结为水，即得到**相当温度**（饱和混合比为零时空气块的位温）

求解方法 找到斜线的表达式→找到某个等式(不变的量)：**空气焓不变**

推导 干空气 T_{ie} 干空气+水汽 T 饱和湿空气+水汽： T_{iw}

将过程拆分为**降温+相变**： $\begin{cases} T_0 \\ m_d \text{ 干空气质量} \\ m_v = 0 \\ m_w \text{ 总水质量} = m_t \end{cases} \xrightarrow{\text{① 降温}} \begin{cases} T \\ m_d \\ m_v = 0 \\ m_w \text{ 总水质量} = m_t \end{cases} \xrightarrow{\text{② 等温相变}} \begin{cases} T \\ m_d \\ m_v \\ m_w = m_t - m_v \end{cases}$

已知： $dh = c_p dT$

$\Delta H_① = (m_d c_{pd} + m_t c_{w \text{ 液水比热容}})(T - T_0)$ $\Delta H_② = l_v(T)$ 相变潜热 m_v $\Delta H = \Delta H_① + \Delta H_②$

则两端同除 m_d $\Delta h = \frac{(m_d c_{pd} + m_t c_w)(T - T_0) + l_v(T) m_v}{m_d} \rightarrow \Delta h = (c_{pd} + w_t c_w)(T - T_0) + l_v w_v$

更换起始点 $\Delta h' = (c_{pd} + w_t c_w)(T' - T_0) + l_v w'_v$ 两式相同：

$(c_{pd} + w_t c_w)(T - T') + l_v(w_v - w'_v) = 0$

$$T' = T + \frac{l_v(w_v - w'_v)}{C_{pd} + w_t C_w} \quad \text{则 } T_{ie} = T + \frac{l_v w_v}{C_{pd} + w_t C_w} \quad (w_v = 0)$$

$$T_{iw} = T + \frac{l_v(w'_v - w_s)}{C_{pd} + w_t C_w} \quad (w_s = \frac{\epsilon e_v}{p}) \text{ 为通过等焓过程达到饱和时的饱和混合比}$$

直线斜率

$$T_{ie} = T_{iw} + \frac{l_v w_s}{C_{pd} + w_t C_w} = T + \frac{l_v w_v}{C_{pd} + w_t C_w} \approx T_{iw} + \frac{l_v w_v}{C_{pd}} = T + \frac{l_v w_v}{C_{pd}} \quad (w_t \text{ 很小})$$

$$T_{iw} + \frac{l_v \frac{\epsilon e_s(T_{iw})}{p}}{C_{pd}} = T + \frac{l_v \epsilon e}{p C_{pd}} \quad \text{则斜率为 } \frac{e - e_s(T_{iw})}{T - T_{iw}} = - \frac{p C_{pd}}{l_v \epsilon}$$

3.2 混合过程

产生影响

- ① 混合成云（两个气块全部不饱和，混合后有可能饱和（一个很冷少水，一个高温水多），主要看气块温度差异）
- ② 混合蒸发→降温→下沉气流
- ③ 混合蒸发→云滴粒子变小→悬浮空中，延迟降水

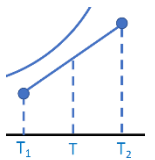
3.2.1 无凝结的绝热等压混合过程

目的 已知初始气块质量与温度，欲求最终温度

$$\text{推导 } m_1 h_1 + m_2 h_2 = (m_1 + m_2) h = m h \quad \Delta H = m_1(h - h_1) + m_2(h - h_2) = 0$$

$$m_1 \Delta h_1 + m_2 \Delta h_2 = 0 \Rightarrow m_1 C_{pd}(1 + 0.861 q_1)(T - T_1) + m_2 C_{pd}(1 + 0.861 q_2)(T - T_2) = 0$$

$$T = \frac{m_1 T_1 + m_2 T_2 + 0.681(m_1 q_1 T_1 + m_2 q_2 T_2)}{m_1 + m_2 + 0.681(m_1 q_1 + m_2 q_2)} \approx \frac{m_1 T_1 + m_2 T_2}{m_1 + m_2} \quad (\text{由于 } q_1 q_2 \text{ 很小}) = \frac{m_1 T_1 + m_2 T_2}{m}$$

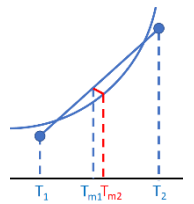


无凝结

3.2.2 有凝结的绝热等压混合过程

方法 先水平等压混合，再等压绝热凝结 $T_1, T_2 \rightarrow T_{m1} \xrightarrow{\text{上式斜率}} T_{m2}$ 最终温度

推导 $m_{\text{water}} = (m_1 + m_2)(q_{\text{总水比湿}} - q_{\text{s饱和比湿}})$ $q = q_1 + q_2$ (质量一致时)



有凝结

3.2.3 有凝结的绝热垂直混合过程

方法 先绝热上升(下降)，再水平等压混合，最后绝热凝结 $T_1 \rightarrow T'_1; T_2 \rightarrow T'_2 \longrightarrow T_{m1} \longrightarrow T_{m2}$

