

# 第六章 大气热力图

## 6.1 热力图历史

热力图	热力图 (Thermodynamic Diagram), 能够描绘气压、温度和湿度的数值, 并分析大气绝热过程和大气稳定度等。通常热力学图包含的线条有等压线、等温线、湿度线、干绝热线、饱和绝热(或假绝热)线。当气块经历一个绝热过程, 其连续状态可以用图上的曲线表示, 循环过程可以用一封闭曲线表示。一些图上的封闭曲线包围的面积与过程中环境对系统作的功成正比。
1800s	尝试使用, 大气热力学过程取得进展, 云形成, 估计饱和和上升温度变化。
1841	James Espy / US: 实验估计干、湿绝热减温率。
1862	William Thomson (Lord Kelvin): 定量之饱和绝热理论, 1865 年发表。
1864	Reye (瑞士): 湿绝热过程微分表达式, 饱和气层稳定度。
1874	Hann (瑞典): 给了饱和绝热上升的气压和温度的对照表
1884	Heinrich Hertz: 开发了热力学图, 减少了繁杂的热力学变量的计算 (包括: 湿绝热以假绝热计算), 与今天使用的图在总的特性上没有显著变化。

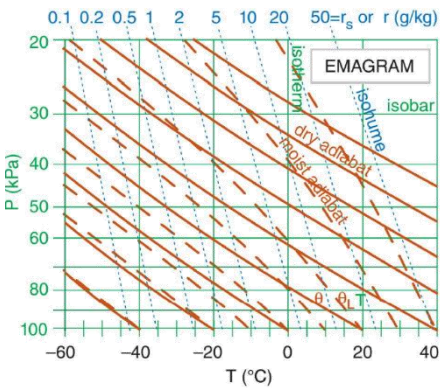
## 6.2 热力图类型

### 6.2.1 类型概述

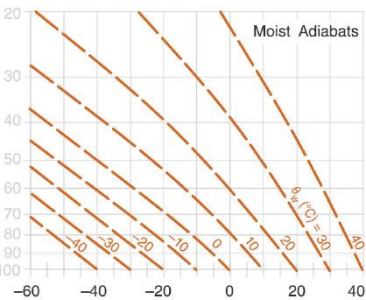
概述	常见的热力图见下表, 中国主要使用埃玛图, 欧美国家通常还使用斜温图和温熵图等。	
类型	横坐标	纵坐标
埃玛图	$T$	$-\ln p$
温熵图	$T$	$\ln \theta$
斜温图	$T - c \cdot \ln p$	$-\ln p$
斯塔夫图	$\ln T$	$-T \cdot \ln p$

### 6.2.2 热力图结构

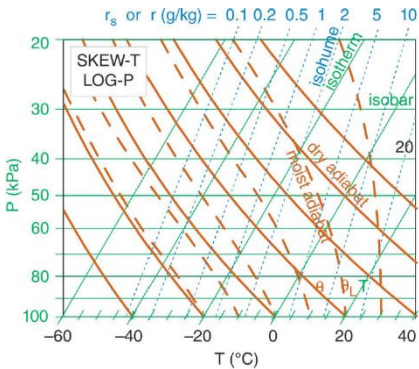
- 设计要素
1. 坐标为实测的气象要素, 或其简单函数, 纵坐标和高度成正比
  2. 绘制的热力学线型最好为直线, 有利于绘图和分析
  3. 等温线和绝热线的夹角尽可能大, 这样热力过程图形随着随温度垂直梯度的变化就越敏感
  4. 一些热力线就是气块状态变化曲线
  5. 图上面积与能量成正比, 便于计算大气运动能量, 即为能量图解



艾玛图



艾玛图湿绝热线



斜温图

## 6.3 埃玛图

### 等饱和比湿线

绿色实线

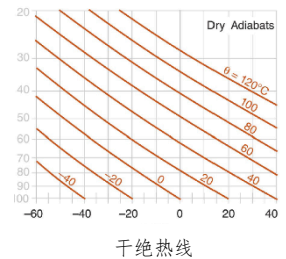
利用克拉博龙方程变换得到： $\ln q_s = \left( \frac{l_v}{R_v T_0} - \frac{l_v}{R_v T} - \ln \frac{P}{\epsilon e_{s0}} \right)$

其中  $T_0 = 273.15K$   $e_{s0} = 610.7Pa$

线上数字：

等饱和比湿 (任意一点的气压和温度都可以得到一个值)

由于  $e_s = A \exp\left(-\frac{B}{T}\right)$   $q_s \sim w_s = \frac{\epsilon e_s}{p}$



### 干绝热线

橙色实线

利用泊松方程得到，干绝热减温率约等于  $9.8K/km$ 。

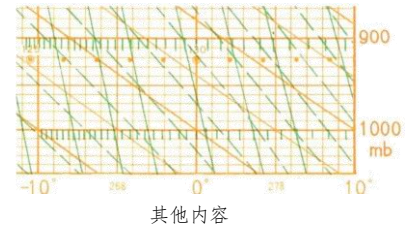
需要注意：埃玛图的等温线和干绝热线的夹角随位置而变，角度一般在  $45^\circ$  左右，不完全是直线

### 湿绝热线

绿色虚线

湿绝热减温率随着气压和温度改变，因此湿绝热线不是直线。

其根据方程  $\Gamma_{sat} = \Gamma_{dry} \cdot \frac{1 + \frac{l_v w_s}{R_d T}}{1 + \frac{l_v w_s}{c_p R_v T^2}}$  得到



### 其他内容

埃玛图中等压面上的绿色短竖线为饱和虚温差。

标准等压面之间的黄色圆点为等压面间的厚度。

### 能量表示

埃玛图是一种能量图解，图上的面积表示了循环过程中外界对单位质量气块做功的大小。

在一个循环中，单位质量气块对外界做功为： $W = R \oint T d \ln \frac{p_0}{p} = RA$

其中  $A$  为图中循环曲线所包围的面积

## 6.4 斜温图

### 简介

本来温度等温线是垂直的，现在向右斜了，能够方便显示温度较低的区域

为了增大等温线和绝热线的夹角，将埃玛图纵轴顺时针旋转  $45^\circ$ ，使得等温线和干绝热线接近垂直，这种图称为斜温图。

### 意义

斜温图让垂直温度梯度的变化较敏感，对于分析中尺度天气系统有帮助，也利于稳定度的估算。

## 6.5 热力图应用

### 6.5.1 大气层结曲线与状态曲线

#### 层结曲线

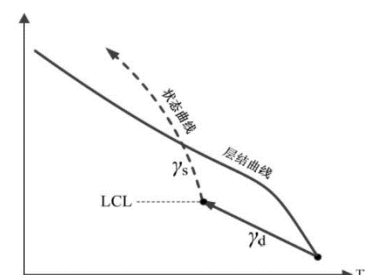
大气层结指一个地区上空大气温度和湿度的垂直分布。

探空资料中的温度、露点和压强的数值点绘在埃玛图上，用折线连接。

包含有层结曲线  $(p, T)$  和露点层结曲线  $(p, T_d)$

#### 状态曲线

气块在此环境中做升降运动时，气块的温度和露点随气压而变化绘制于埃玛图上的曲线，称为气块的状态曲线。



### 6.5.2 位温确定

#### 定义

状态点  $A$  沿干绝热线下降（或上升）至  $1000hPa$  处所对应的温度。

#### 方法

因干绝热线即等位温线，故可直接读取通过状态点  $A$  的干绝热线上的数值。

### 6.5.3 饱和比湿确定

#### 方法

读取通过状态点  $A$  的等饱和比湿线的数值，没有等饱和比湿线通过时，采用内插法求解，其结果即为状态点  $A$  的饱和比湿。

### 6.5.4 假相当位温

**方法一** 气块干绝热上升到 $LCL$ ，再湿绝热上升直到所有水汽凝结成液态水并立刻落下离开气块，剩下的干空气沿干绝热线下降到 $1000hPa$ 时具有的温度。

**方法二** 利用假相当位温的守恒性来求解。由于假相当位温在干湿绝热过程中守恒，因此只要读取通过抬升凝结高度点的**湿绝热线**上的假相当位温数值即可。

### 6.5.5 饱和虚温

**方法** 埃玛图中，每个等压面上**相邻的绿色小竖线**表示**饱和时虚温与实温的差 $\Delta T_{vs}$** 。

有饱和虚温： $T_{vs} = T + \Delta T_{vs}$

### 6.5.6 气层平均温度和厚度

**方法** 根据测高方程  $\frac{\Delta p}{\Delta z} = -\frac{p}{RT}g$  或者  $Z_2 - Z_1 = \frac{R_d \bar{T}_v}{g_0} \ln\left(\frac{p_1}{p_2}\right)$  可知，对于给定的气层平均温度 $T$ ，可计算等压面之间的厚度。埃玛图中，**黄色圆点**的数值表示**标准等压面之间的厚度**

### 6.5.7 典型例题

1. 气流在 $P = 950hPa$ 时， $T = 14C$ ， $q = 0.008$ 。气流遇山坡被抬升，山顶压强为 $700hPa$ ，过山后下沉。若凝结出的液态水( $ql$ )50%在爬坡途中降落( $ql/2$ )。气流到达山顶后由于和未饱和湿空气混合，温度减少了 $2C$ ，剩下的液态水中50%蒸发( $ql/4$ )随后气块绝热下沉，求背风面 $950hPa$ 处气流的温度，比湿及位温。

2. 950mb 的露点温度是  $15.7C$ ，利用埃玛图估算：

(1) 比湿 (2) 相对湿度 (3) 位温 (4) 假湿球温度 (5) 假湿球位温 (6) 画出  $LCL$ ， $LFC$ ， $CAPE$ ， $CIN$ ，并讨论是否可能发生深对流。

3. 假设青海某地测站测得地表 $T = 20C$ ， $T_d = 5^{\circ}C$ ， $p = 850mb$ 。估算：

a.测站的海拔高度 (假设 $1000mb$ 到 $850mb$ 温度一样) b.在埃玛图上画出 $LCL$ ，估算 $H_{LCL}$ ，以及 $T_{LCL}$   
c.画出假湿球温度、假湿球位温。 d.从图上读出近地面空气的比湿、饱和比湿，写出计算相对湿度的过程  
e.画出位温，读出假相当位温。

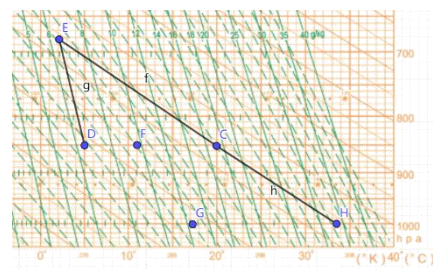
① 有： $\Delta z = \frac{R_d T_v}{g_0} \ln \frac{p_1}{p_2} \Rightarrow 1395.24m$

②  $H_{LCL} = 680hPa = 3271m$   $T_{LCL} = 2^{\circ}C$

③ 假湿球温度： $11^{\circ}C$ ，假湿球位温： $17^{\circ}C$

④ 近地面空气比湿： $6.4g/kg$ ，饱和比湿： $17g/kg$  相对湿度 $37.6\%$

⑤ 位温： $33.5^{\circ}C$ ，假相当位温： $55^{\circ}C$



4. 美国堪萨斯某地测得的大气层结特征如右所示，测量时间为春季某一天的日出前。利用斜温图给出：

a) 930hPa 的比湿、饱和比湿、水汽压、饱和水汽压。  
b)  $LCL$ ， $CCL$ ， $CCL$  处的温度。  
c) 确定各层的静力稳定度 (绝对不稳定、条件性不稳定、绝对稳定、干中性、湿中性)  
d) 画出 930mb 的假湿球温度。  
e) 标出位势不稳定的气层。  
f) 画出气块从地表到 250mb 的绝热上升路径，是否有  $CAPE$ ， $CIN$ ？  
g) 计算抬升指数  $L$ 。  
h) 气块从哪一层开始上升得到的  $CAPE$  最大？画出该气块上升得到的  $CAPE$ 、 $CIN$ 。  
j) 标出该气块的  $LFC$ 、 $EL$ 。  
j) 对比该气块和从地面向上的气块，你觉得哪一层的气块上升更可能导致强对流天气？  
k) 讨论一下什么情况可能导致该大气环境中形成强对流？



① 930hPa 比湿: 8.2g 饱和比湿: 10.4g 水汽压:  $w = \frac{e}{p} \varepsilon \Rightarrow e = \frac{wp}{\varepsilon} = 12.26$  饱和: 15.5hPa

②  $T_{LCL} = 9^{\circ}\text{C}$   $T_{CCL} = 1^{\circ}\text{C}$

③ 相当位温随高度的变化等价于湿球温度随高度的变化。因此，湿球温度随高度降低，则不稳定。

930 – 910mb: 绝对稳定

880 – 850mb: 条件不稳定

500 – 400mb: 中性

790 – 820mb: 中性

530 – 500mb: 条件不稳定

④ 假湿球温度: 11.2°C

⑤ 位势不稳定: 根据  $\frac{\partial \theta_{se}}{\partial z} < 0$  来判断: 从 880 百帕往上, 都是位势不稳定的(存疑)。

⑥ 不存在 CAPE, 全部为 CIN

⑦ 抬升指数:  $T_{500} - T_{p500} = -13^{\circ}\text{C} - (-18^{\circ}\text{C}) = 5^{\circ}\text{C}$

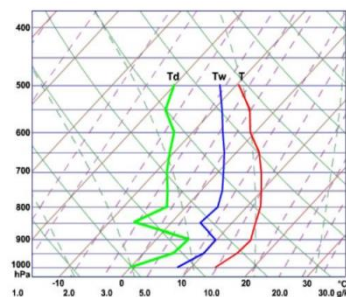
⑧ CPAE 最大值在 740hPa 处最大, 得到的 CPAE 与 CIN 最大

⑨ LFC 自由对流高度

EL 最高顶点

⑩ 该气块。从地面上的气块压根就没有 CAPE

11 地形抬升、冷暖锋交会等情况



湿球温度随高度变化可反应不稳定度

