

综论对流有效位能与下沉对流有效位能 的计算与应用

李耀东 史小康 李森 王玉琦

银川 2023.08

强对流分析两个最基础问题

- 稳定度
- 对流能量

基础问题，重要不过时，创新难



条件稳定度与对流稳定度辨析与拓展应用

李耀东 葛耀明 史小康

厦门 2019年12月

对流有效位能与下沉对流有效位能的计算与应用

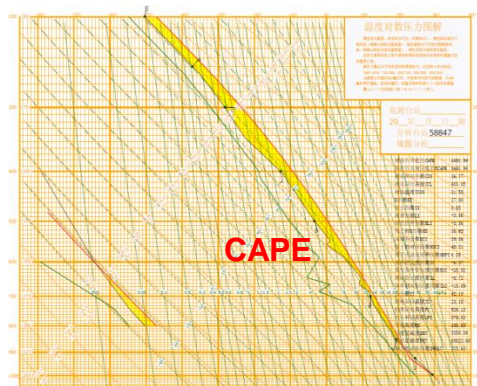
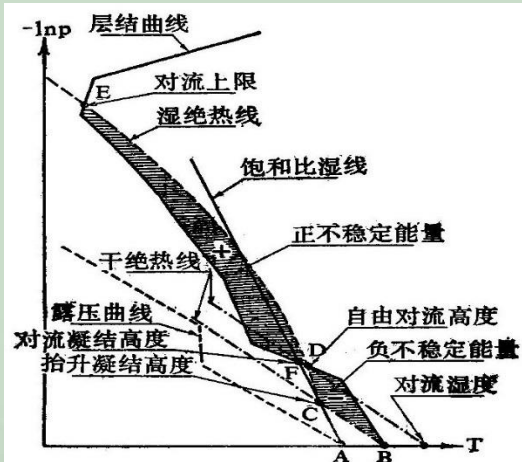
汇报内容

- 一、引言
- 二、CAPE概念、公式来源及其计算的理论基础
- 三、对流有效位能的计算问题
- 四、对流有效位能错误计算方法及其原因分析
- 五、对对流有效位能物理本质理解偏差引起的思考
- 六、下沉对流有效位能及相关问题



一、引言

- 大气对流是有效能量之间的相互转换和释放，理解和诊断有效能量无疑对分析、预报对流性天气十分必要。
- 经典的对流有效位能分析方法常借助于埃玛图，从几何意义上说，对流有效位能CAPE正比于热力学图解(如T-lnP图)上的正面积；而从物理意义上说，CAPE为气块在自由对流高度和平衡高度之间受环境正浮力累积做的功。
- 对流有效位能的计算不再是一个受困扰的难题（自认为）（李耀东等，埃玛图微机制作和对流有效位能计算，《气象》，1998年第5期）



对流有效位能计算及应用存在的问题

■ 对CAPE的本质理解不透彻——从多次专题培训交流了解到，这样就极为影响其拓展应用——如与雷暴大风密切相关的DCAPE理解

■ CAPE的计算存在不应有的误区，可导致此物理概念和解释混乱——从《气象》等刊物系列审稿体会到

修订稿 通讯作者

对流有效位能和对流凝结高度 及对流温度等若干问题新的研究

- 1 南京信息工程大学 南京市，210044
- 2 中国气象局气象干部培训学院河北分院 保定市，071000
- 3 国家气象中心 北京市，100081

提要 对对流有效位能 CAPE、对流凝结高度 CCL、对流温度 T_c 的计算等若干问题进行了新的研究。

简要介绍了与 CAPE 等计算有关的一些物理过程和物理量；初步分析了 CAPE 的收支方程。对 CAPE 等的计算分三种情形：1、可逆湿绝热过程；2、假绝热过程；3、等假相当位温过程。通过实例计算，三种情形计算结果有较大差异，第三种情形比较接近中央气象台 MICAPS 的计算结果，但仍有不少差距。CCL 新的计算方法与传统的计算方法和 MICAPS 的计算结果相比，气压增高 10 至 30hPa，高度降低 100 至 300m，对流温度 T_c 降低 0.6 至 3℃。这些研究对深入理解“对流有效位能”的本质有所助益，可供研究人员和业务工作者参考。

关键词 对流有效位能 对流凝结高度 对流温度 可逆湿绝热过程 假绝热过程 等假相当位温过程

中图法分类号 P 401 P455 P457.9

The New Research of Several Issues about Computing for Convective Available Potential Energy and Convective Condensation Level and Convection

2016年3月-气象责任终审

关于虚温订正 CAPE 计算方法讨论*

目前不少省市建立了包括 CAPE 在内的各种对流参数与强对流之间的关系, 用来开展强对流天气有无、天气分类等预报(如雷蕾等, 2012; 冯民学等, 2012; 林新彬等, 2013; 王镇铭等, 2013)。但计算 CAPE 有很多不同的软件或程序, 是否使用虚温订正、如何计算虚温订正 CAPE 并没有统一, 导致 CAPE 数值并不一致、甚至相差很大。MICAPS 是我国预报员日常使用的人机交互预报平台, 其中内置有 CAPE 值, 它是预报员用于判断强对流天气有无及发生以及属于何种类型的参考指标。但在其计算程序中发现, MICAPS 中经过虚温订正 CAPE 概念的程序, 发现目前在计算虚温订正 CAPE 时, 将自由对流高度(LFC)取为不变, 即与虚温订正前相同。这种取法并非个例, GRADS 是气象工作者常用的绘图软件, GRADS 自带的计算虚温订正 CAPE 程序中也将 LFC 取为不变。

2016气象年会S1分会场

虚温订正后的 LFC 若仍采用订正前的高度, 显然与 LFC 的定义相悖。作为计算 CAPE 时的积分起点, 它的取法不同必然会影响到 CAPE 的数值。以往的很多文献或教科书(Doswell et al, 1994; 刘健文等, 2007)并没有对虚温订正前后 CAPE 积分上下限的变化作特别说明, 因此很多计算 CAPE 的软件/程序也忽视了计算虚温订正 CAPE 时 LFC 的取法问题, 往往设为不变。针对这个问题, 本文首先通过理论分析来说明 LFC 取法不同对 CAPE 虚温订正造成的影响; 并通过实际个例诊断分析说明考虑 LFC 变化对 CAPE 计算的影响, 以期为 MICAPS、GRADS 中 CAPE 虚温订正计算的修正及预报员对虚温订正 CAPE 的理解提供参考。

■ 审稿时, 惊诧地知道: MICAPS考虑虚温后CAPE结果变小

——这一绝对错误而又可能导致应用者疑惑的结论

——说明程序设计者与广大的应用者对CAPE理解仍然很不到位

二、CAPE的概念、公式来源及其计算的理论基础

概念: 单位质量气块在自由对流高度至平衡高度环境对累计正浮力做功

数学表达式

$$CAPE = \int_{z_{lfc}}^{z_{el}} \left(\frac{T_{va} - T_{ve}}{T_{ve}} \right) g dz$$

来源: 单位质量空气受浮力累积做功

单位体积受浮力 $F = (\rho_e - \rho_a) g$

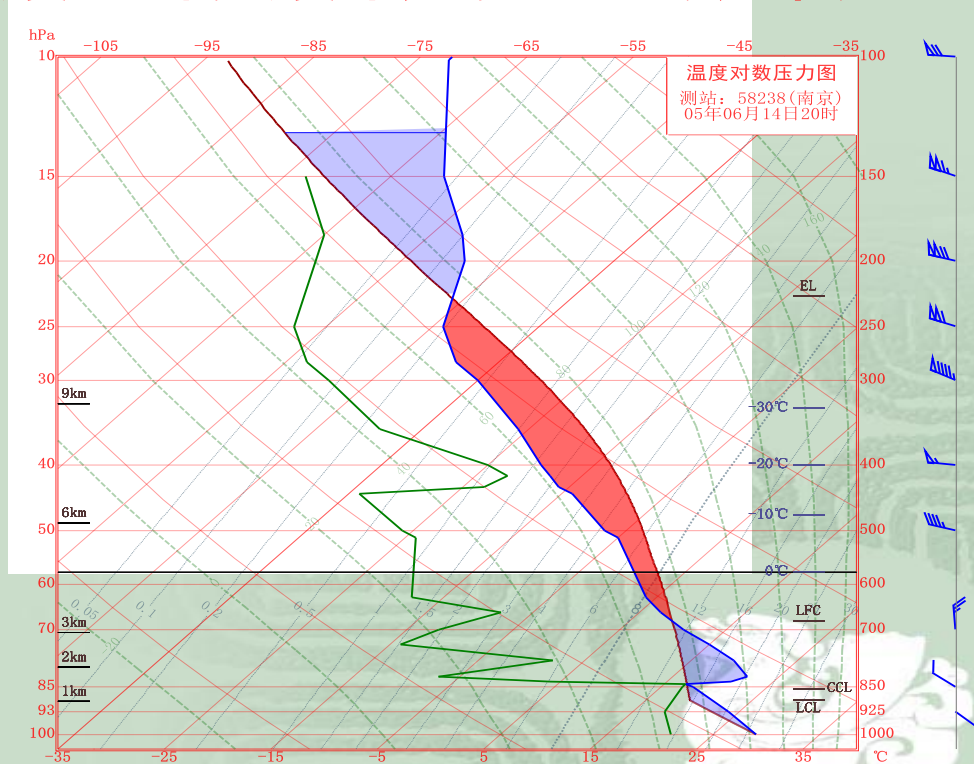
单位质量受浮力 $F = \left(\frac{\rho_e - \rho_a}{\rho_a} \right) g$

原始表达式

$$CAPE = \int_{z_{lfc}}^{z_{el}} \frac{\rho_e - \rho_a}{\rho_a} g dz$$

$$p = \rho R_d T_v \quad p_e = p_a = p$$

$$CAPE = \int_{z_{lfc}}^{z_{el}} \left(\frac{T_{va} - T_{ve}}{T_{ve}} \right) g dz$$



计算的理论基础和计算方法

根据基本公式看不出是浮力能，也不太好计算

$$CAPE = \int_{z_{lfc}}^{z_{el}} \left(\frac{T_{va} - T_{ve}}{T_{ve}} \right) g dz$$

利用气态方程和静力平衡近似，转化成气压坐标表达式

$$p = \rho R_d T_v \quad dp = -\rho g dz$$

$$\begin{aligned} CAPE &= \int_{z_{lfc}}^{z_{el}} \frac{T_{va} - T_{ve}}{T_{ve}} g dz = \int_{z_{lfc}}^{z_{el}} \frac{T_{va} - T_{ve}}{T_{ve}} \frac{\rho_e}{\rho_e} g dz = - \int_{p_{lfc}}^{p_{el}} \frac{T_{va} - T_{ve}}{T_{ve}} \frac{dp}{\rho_e} \\ &= - \int_{p_{lfc}}^{p_{el}} \frac{T_{va} - T_{ve}}{T_{ve}} \frac{R_d T_{ve}}{p} dp = - \int_{p_{lfc}}^{p_{el}} R_d (T_{va} - T_{ve}) d \ln p \end{aligned}$$

若忽略虚温影响（不考虑水汽含量对气体密度的修正），则

$$CAPE = -R_d \int_{p_{lfc}}^{p_{el}} (T_a - T_e) d \ln p$$

忽略虚温影响CAPE表达式

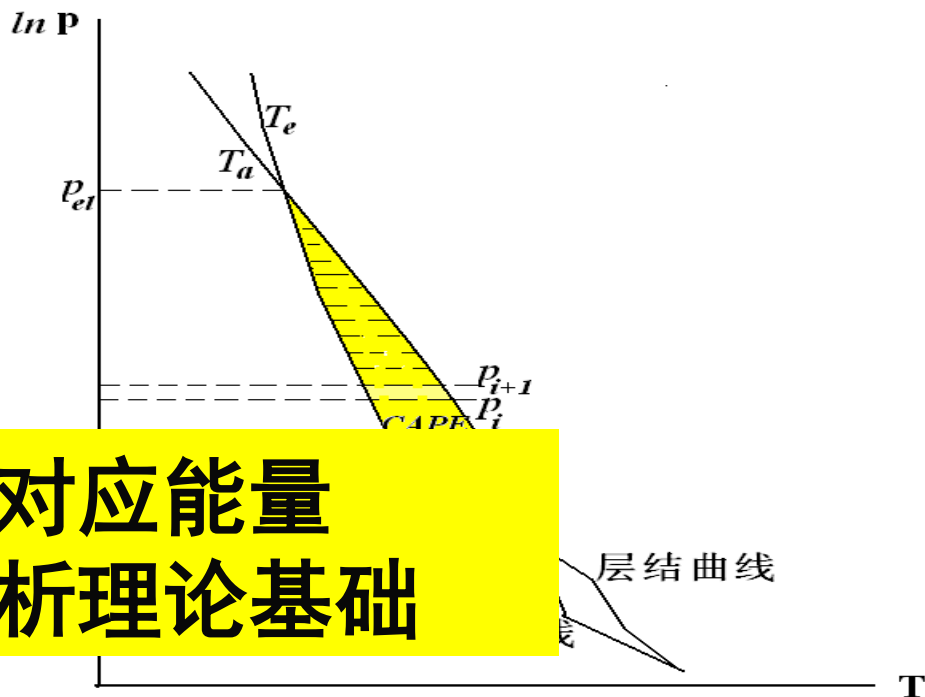
$$CAPE = -R_d \int_{p_{lfc}}^{p_{el}} (T_a - T_e) d \ln p$$

温度-对数气压计算能量基础

$$\begin{aligned} \Delta S_i &= \Delta T_i \times \Delta \ln p_i \\ &= \overline{(T_{ai} - T_{ei})} (\ln p_i - \ln p_{i+1}) \end{aligned}$$

$$S = \sum_{p_i=p_{lfc}}^{p_i=p_{el}} \Delta S_i = \sum_{p_i=p_{lfc}}^{p_i=p_{el}} \overline{(T_{ai} - T_{ei})} (\ln p_i - \ln p_{i+1})$$

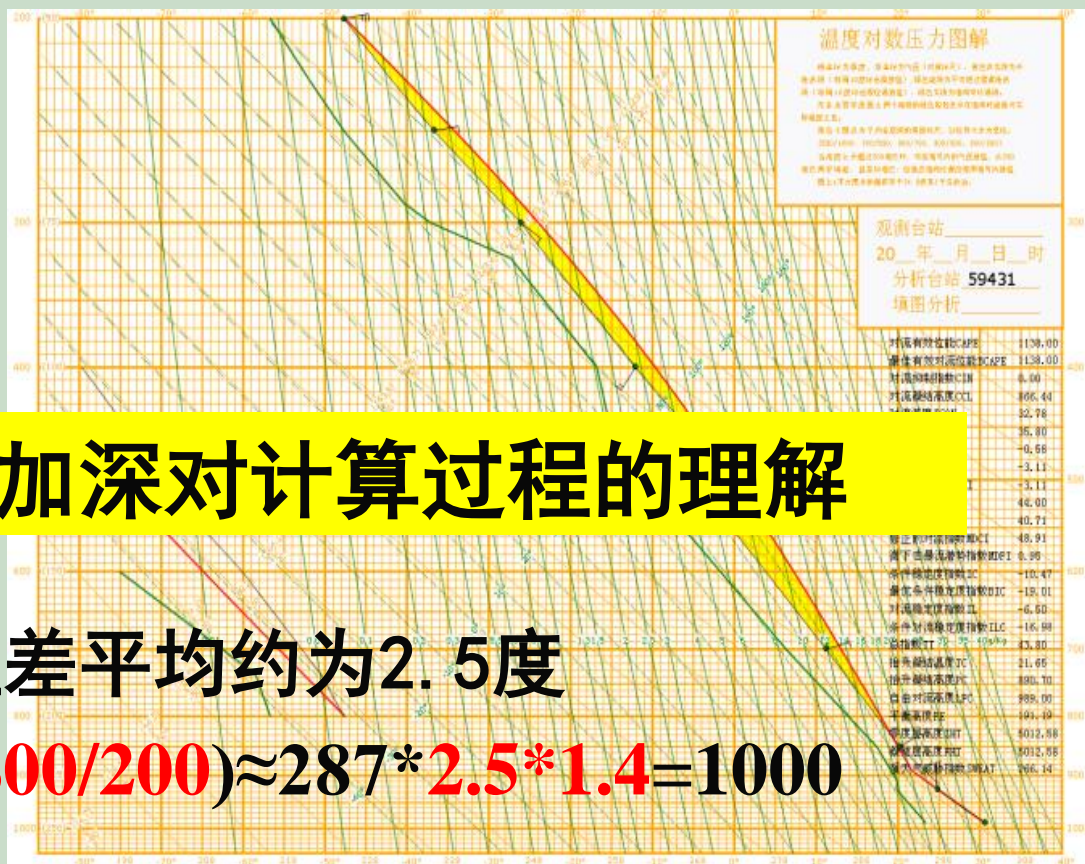
$$\begin{aligned} R_d * S &= R_d * \sum_{p_i=p_{lfc}}^{p_i=p_{el}} \overline{(T_{ai} - T_{ei})} (\ln p_i - \ln p_{i+1}) \\ &= -R_d \int_{p_{lfc}}^{p_{el}} (T_a - T_e) d \ln p = CAPE \end{aligned}$$



面积对应能量 T-LnP分析理论基础



实际个例CAPE估算



估算可加深对计算过程的理解

在800-200百帕间温差平均约为2.5度

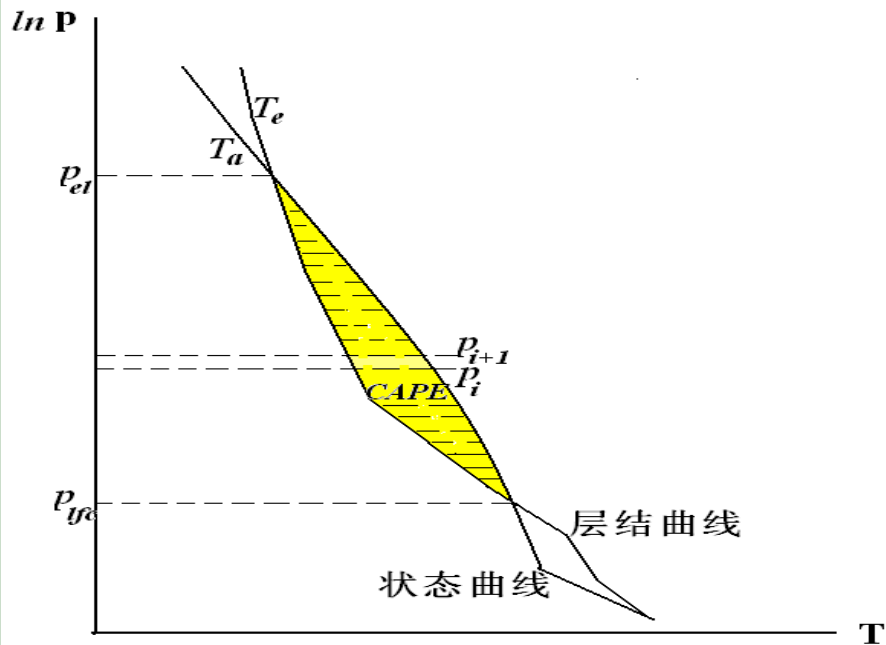
$$CAPE \approx 287 * 2.5 * \ln(800/200) \approx 287 * 2.5 * 1.4 = 1000$$

考虑到温差可能在2.0-3.5度之间，则估算的CAPE约在800-1400 J/Kg之间。

三、对流有效位能的正确计算问题

- 1 对流有效位能正确的计算途经（唯一）
- 2 湿绝热过程的选择问题
- 3 虚温修正对CAPE的影响
- 4 水物质拖曳问题





- 离散化求和的关键在于计算大气层结和气块的温度
- 大气层结温度易求：两观测点间对数气压线性
- 饱和湿绝热状态线求解要用隐函数求解常用的迭代法或“二分法”，后者求解效率更高
- 这是求解对流有效位能唯一的途径！无其他捷径！

$$S = \sum_{p_i=p_{lfc}}^{p_i=p_{el}} \Delta S_i = \sum_{p_i=p_{lfc}}^{p_i=p_{el}} (\overline{T_{ai} - T_{ei}})(\ln p_i - \ln p_{i+1})$$

$$R_d * S = R_d * \sum_{p_i=p_{lfc}}^{p_i=p_{el}} (\overline{T_{ai} - T_{ei}})(\ln p_i - \ln p_{i+1}) = -R_d \int_{p_{lfc}}^{p_{el}} (T_a - T_e) d \ln p = CAPE$$



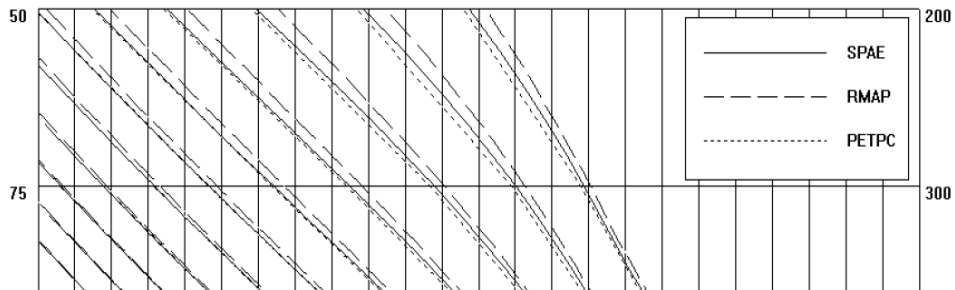
对流有效位能涉及-湿绝热过程的选择

静力能守恒: $E_t = C_{pd}T + L_v q + gz$

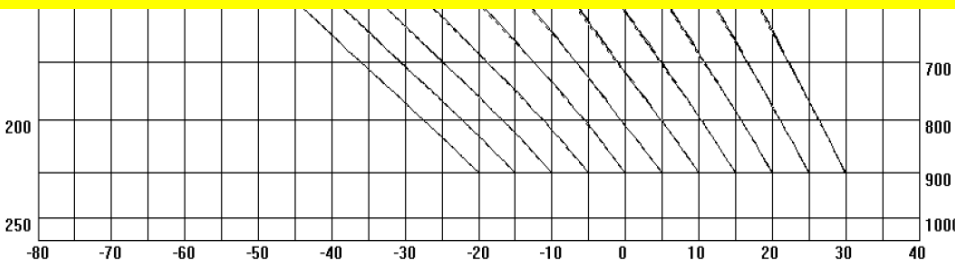
- 对应于干空气：气块中没有凝结比湿不变，气块上升时潜热能 Lq 保持不变，气块位能增加，显热能减小，且二者平衡，故干绝热过程温度递减率为 $-g/C_{pd}$ ；对应于饱和湿空气：气块上升时有凝结发生，凝结会释放潜热加热气块，因此饱和湿绝热过程中气块的温度递减率小于干绝热递减率
- 静力能守恒与假相当位温守恒物理本质完全一致
- 饱和可逆湿绝热过程考虑了水汽和水物质感热，温减率更小

饱和可逆湿绝热过程：

$$(c_{pd} + c_w q_s + c_l q_l) d \ln T - R_d d \ln P_d + d\left(\frac{L_v q_s}{T}\right) = 0$$

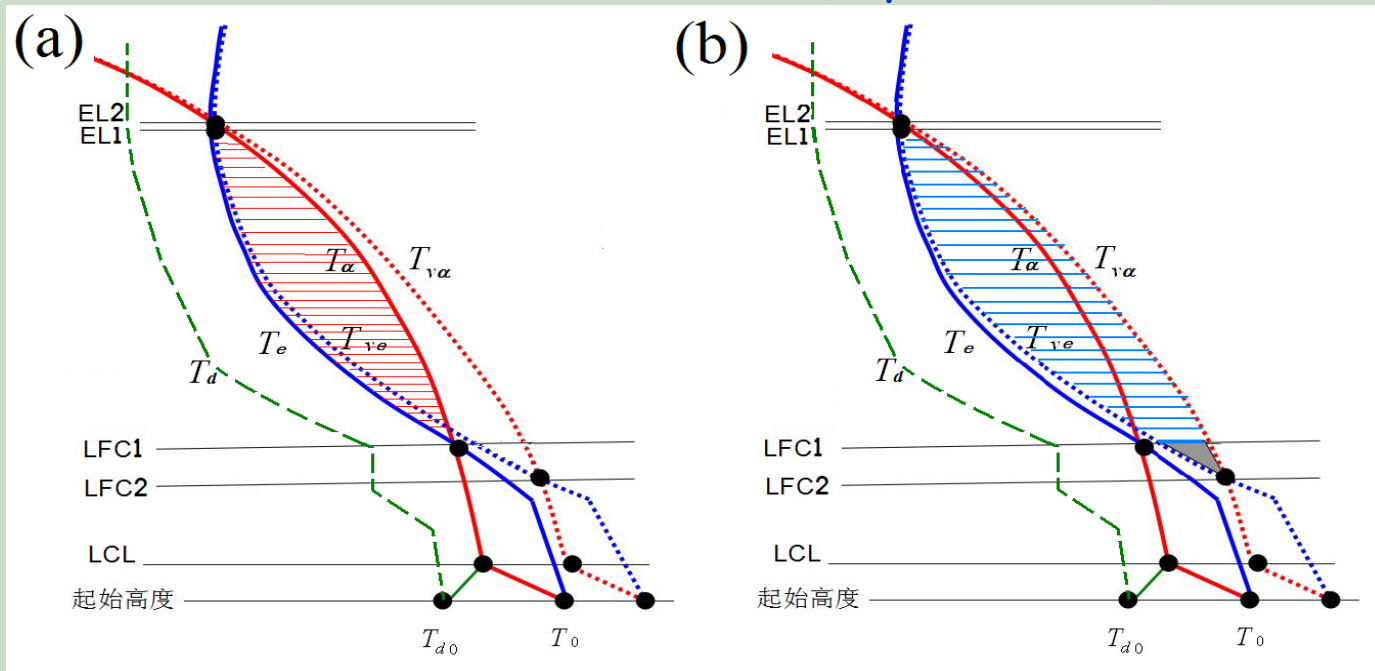


LI Y D, 2004, *Adv Atmos Sci*, Vol, 21 (6) :941-950
 对几种湿绝热过程的选择影响对流有效位能计算
 结果有比较系统的研究（包括水物质拖曳问题）



- 基于三种湿绝热算法的11组湿绝热线计算结果比较
- 含液态水感热交换的可逆绝热过程温减率低

虚温影响CAPE计算结果的讨论



计算常规CAPE和虚温订正CAPE时相关的线条和特征高度示意图。a图中红色阴影区为不考虑虚温订正的CAPE，b图中蓝色阴影区为考虑虚温订正后的CAPE（自由对流高度不变），b图中灰色填充表示虚温订正方法中考虑LFC降低后CAPE再增加的部分。

535.5J kg⁻¹, 平衡高度为266.4hPa, CAPE 为638.7J kg⁻¹; 若考虑虚温, CAPE 为680.2J kg⁻¹。

本个例采用的为08时探空。假如到午后, 地面气温增4℃, 露点增0.5℃, 其它层温湿不变, 那么计算所得的抬升凝结高度为833.7hPa, 自由对流高度为663.5hPa, 平衡高度为240.3hPa, CIN 为238.9J kg⁻¹, 不考虑虚温影响, CAPE 值为1418.3J kg⁻¹; 若考虑虚温影响, CAPE 为1495.6J kg⁻¹。

4 讨论

4.1 用微机制作简化埃玛图, 并籍此计算对流有关大气能量参数, 与手工点绘及计算相比, 不仅客观方便, 而且防止了由人为因素引入的误差, 使得能量计算较为准确; 不考虑虚温, CAPE 严格等于埃玛图正面积所表示的能量, 考虑虚温影响, CAPE 值增加。

状态方程

$$p = \rho R_d T_v$$

表达式

$$T_v = T(1 + 0.61q_s(T_d))$$

水汽影响气体密度, 为使含有一定水汽的空气形成状态方程而定义的量。

虚温修正量越大, 故低层修正明显

$$\begin{aligned}\Delta T_v &= T_{va} - T_{ve} \\ &= T_a(1 + 0.61q_s(T_a)) - T_e(1 + 0.61q_s(T_d)) \\ &= (T_a - T_e) + 0.61(T_a q_s(T_a) - T_e q_s(T_d))\end{aligned}$$

- 简单解析可知考虑虚温后CAPE增加
- 早有研究提到过这一结论 (98年《气象》第5期)
- 对MICAPS结论错误不解
- 对多年来错误未更正不解
- 理解和应用仍亟待提高

水物质的拖曳问题

凝结出的液、固态水物质随气块运动产生重力拖曳，消耗能量

水物质重力拖曳: $q_t g$

消耗能量(重力位能): $ME = -\int_{z_{lfc}}^{z_{el}} q_t g dz$

CAPE原始表达式:

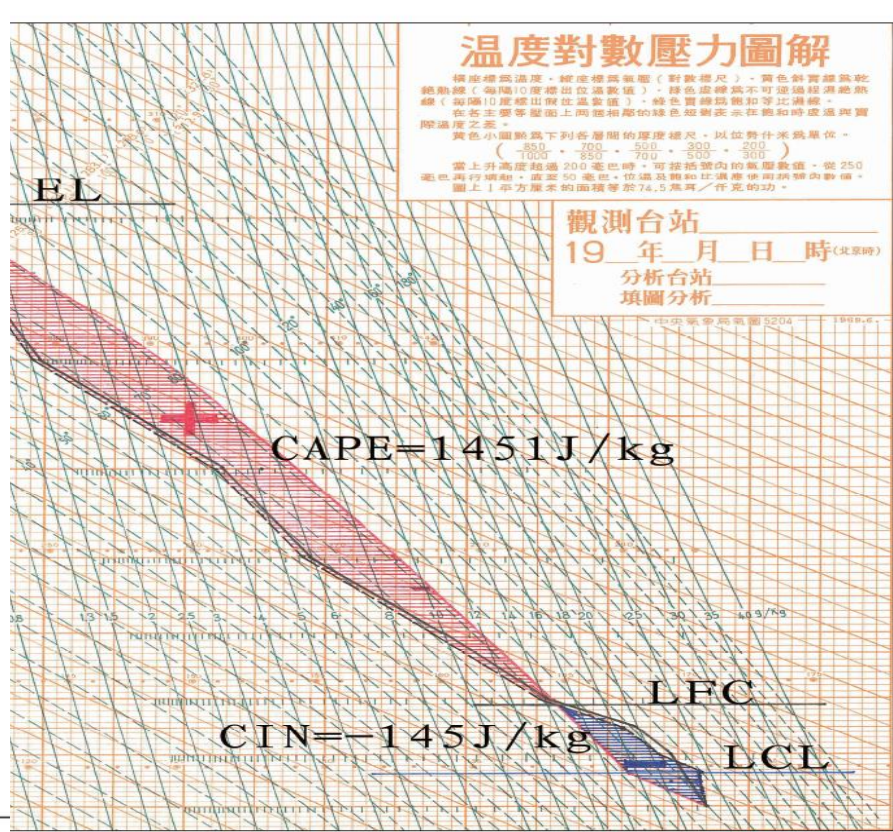
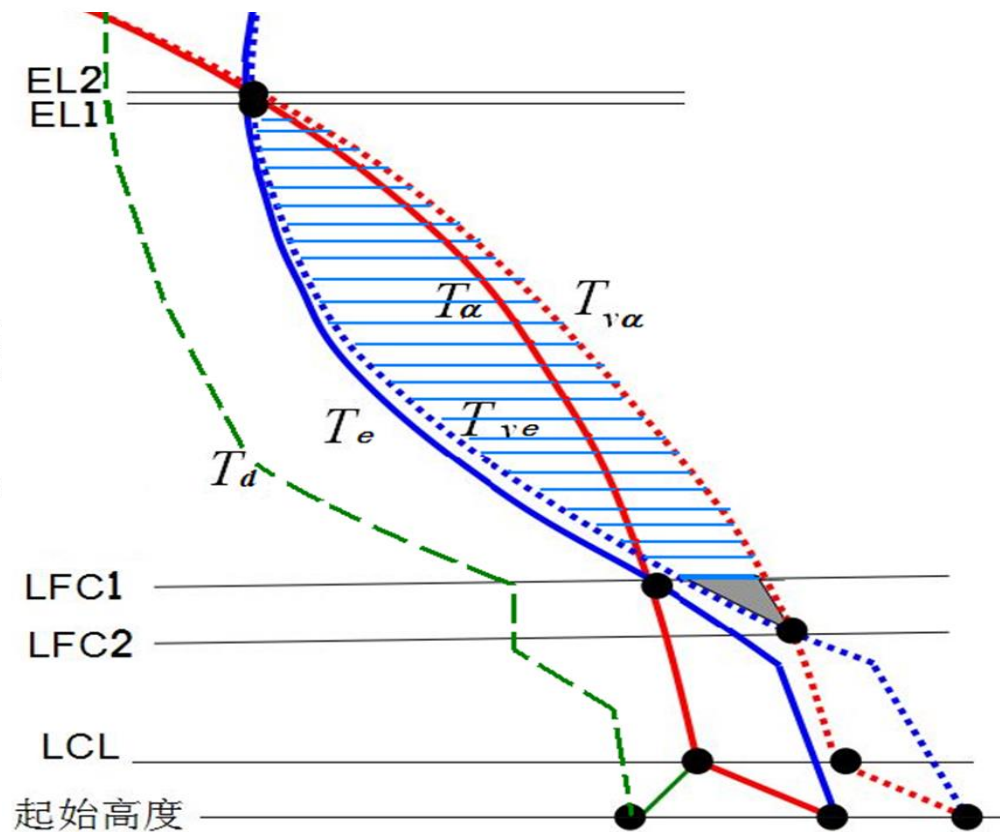
$$CAPE = \int_{z_{lfc}}^{z_{el}} \left(\frac{T_{va} - T_{ve}}{T_{ve}} \right) g dz$$

CAPE修正表达式:

$$MCAPE = \int_{z_{lfc}}^{z_{el}} \left(\frac{T_{va} - T_{ve}}{T_{ve}} - q_t \right) g dz$$

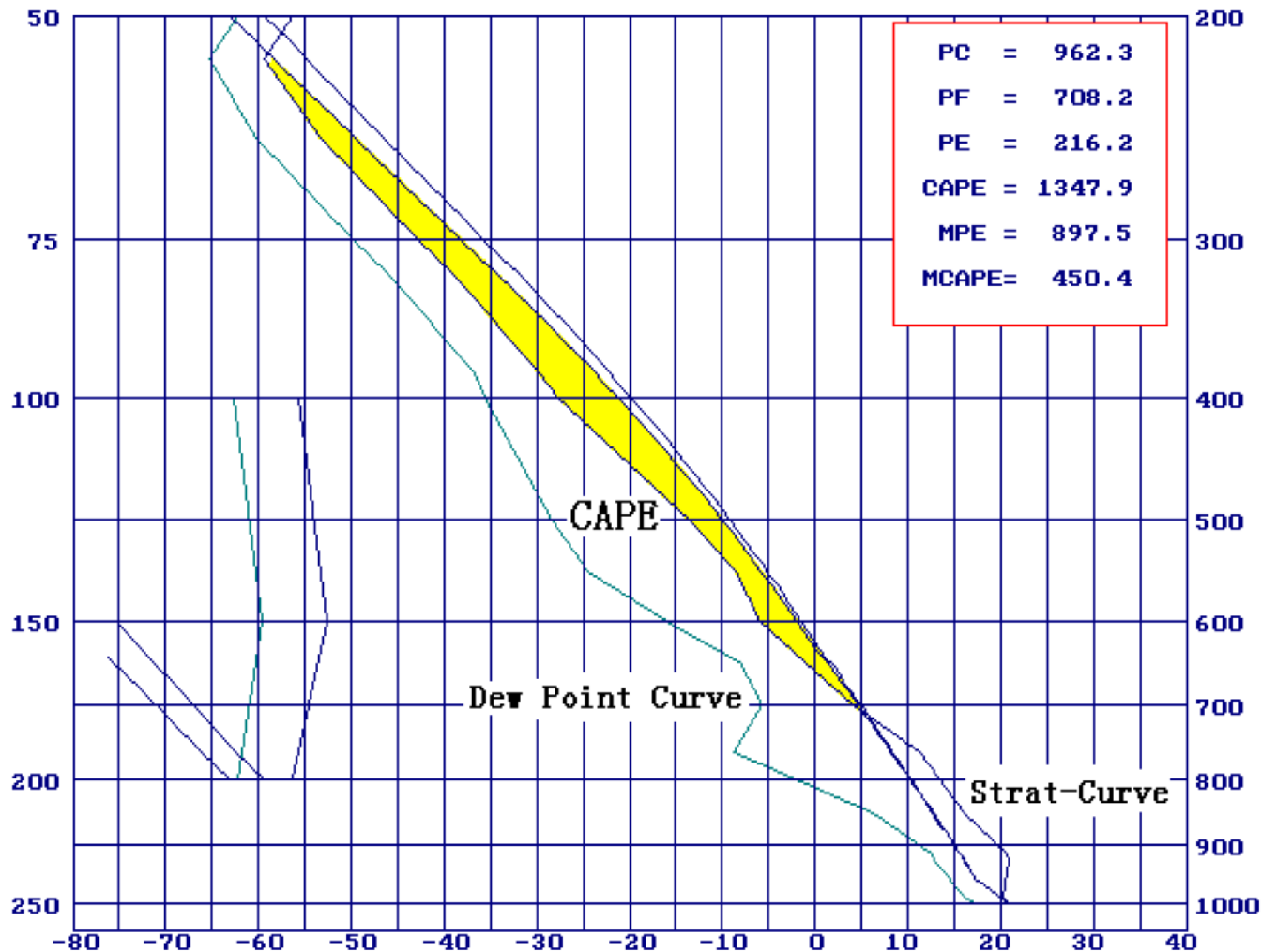
1度温差造成的浮力约可抵消4g/kg
水物质产生的重力拖曳

$$\frac{1}{273.15} \approx 0.0037$$



非載水氣塊的“靜力平衡溫度”比層結溫度要低，從形式上，作者硬是把“氣塊虛溫作用引起的浮力增加效應歸結到“層結”溫度的降低作用（形態上確實是這樣的），這種方法雖然不存在原則錯誤，但著實是把簡單問題複雜化，是作者用純數學思路解決問題而走的一條彎路，本人認為非常不可取。（本圖修正量也不合理）

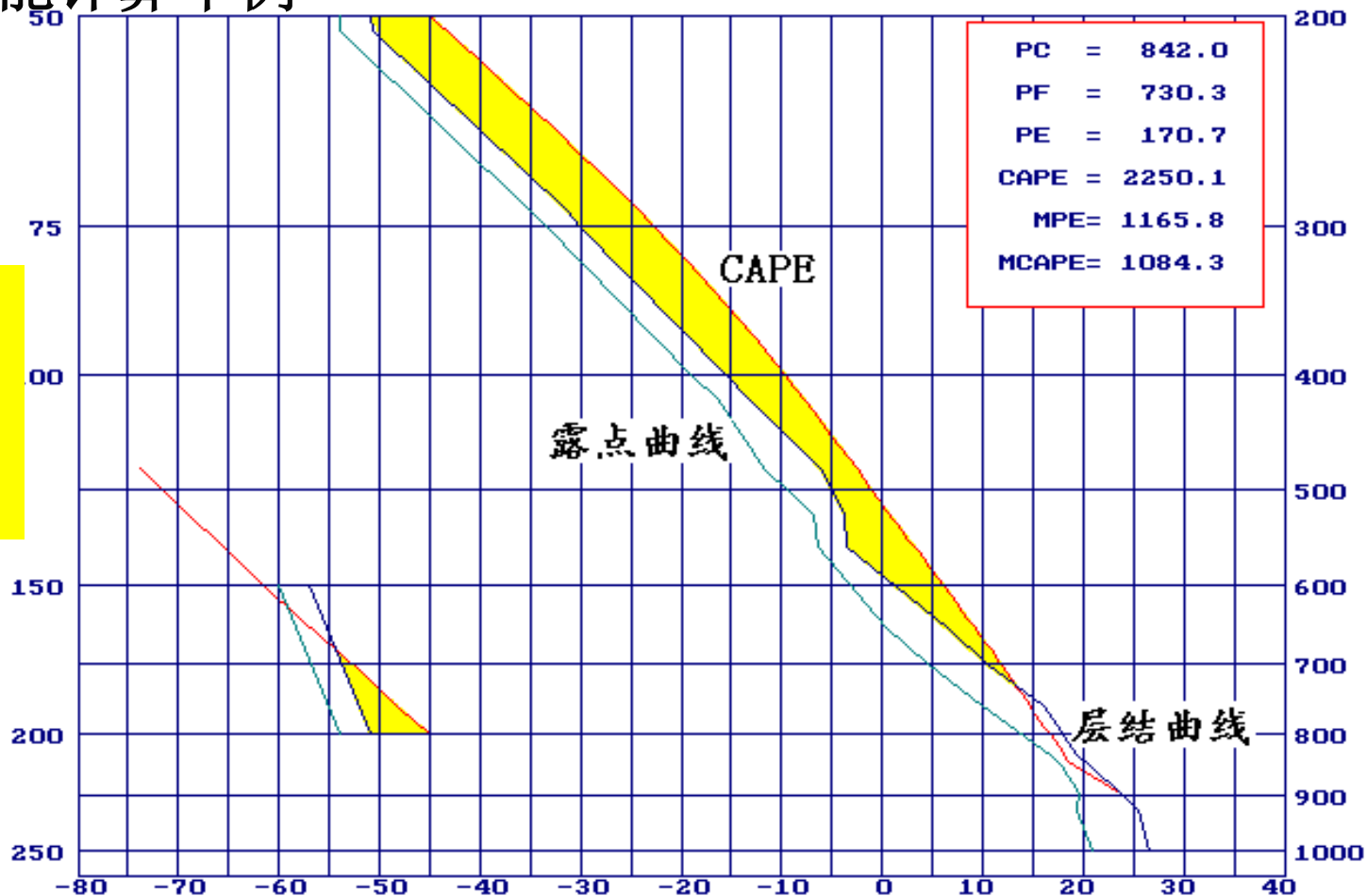
采用不同的
湿绝热过程，
CAPE及其多
种修正量都
可以从理论
上进行准确
计算



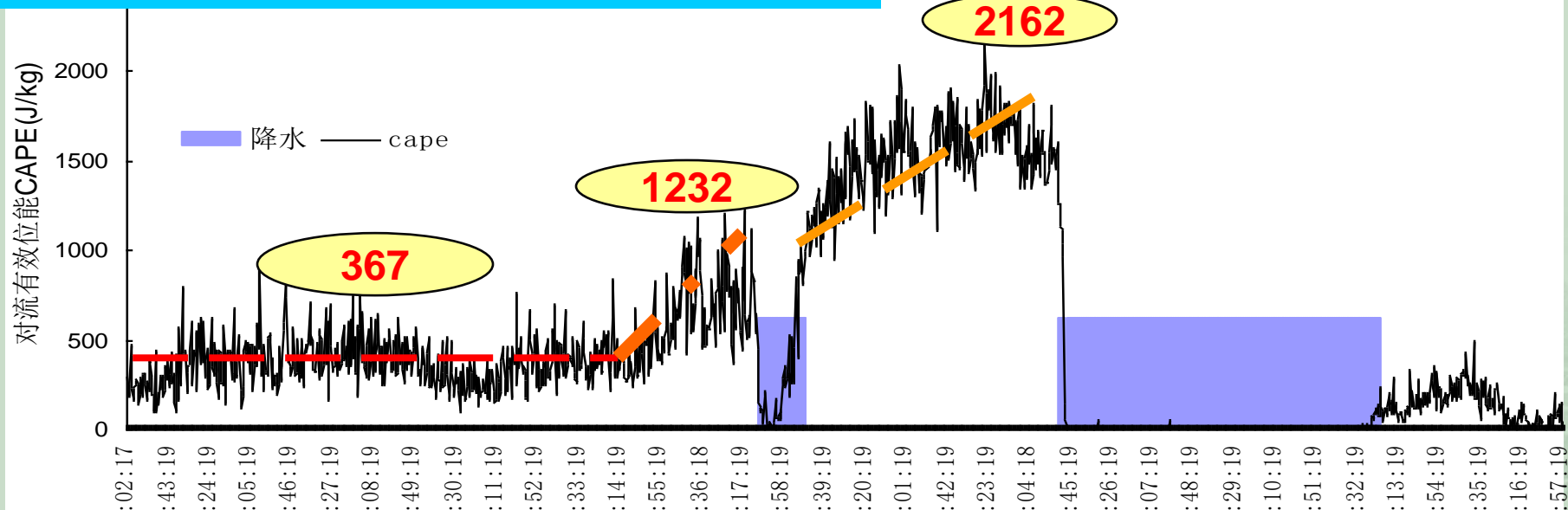
对流有效位能计算个例

98年8月3日20时

CAPE对抬升
起点选择敏
感



2009年7月13日北京强降水天气过程CAPE变化 间隔2分钟微波辐射计资料计算



- CAPE计算涉及许多问题，对应于每个不同的探空和抬升起点，有相应的自由对流高度或平衡高度，也有唯一对应的CAPE
- CAPE有变化倾向，但不存在变化倾向方程（对应大气垂直层结变化的方程是不存在的）

四、对流有效位能错误计算方法及其原因分析

修订稿 通讯作者 XXX 联系电话: 0XXX-XXXXXX XXXXXXXXXXXX

对流有效位能和对流凝结高度 及对流温度等若干问题新的研究

1 南京信息工程大学 南京市, 210044

2 中国气象局气象干部培训学院: 分院 市

3 国家气象中心 北京市, 100081

提要 对对流有效位能 CAPE、对流凝结高度 CCL、对流温度 T_c 的计算等若干问题进行了新的研究。

简要介绍了与 CAPE 等计算有关的一些物理过程和物理量;初步分析了 CAPE 的收支方程。对 CAPE 等的计算分三种情形: 1、可逆湿绝热过程; 2、假绝热过程; 3、等假相当位温过程。通过实例计算, 三种情形计算结果有较大差异, 第三种情形比较接近中央气象台 MICAPS 的计算结果, 但仍有不少差距。CCL 新的计算方法与传统的计算方法和 MICAPS 的计算结果相比, 气压增高 10 至 30hPa, 高度降低 100 至 300m, 对流温度 T_c 降低 0.6 至 3℃。这些研究对深入理解“对流有效位能”的本质有所助益, 可供研究人员和业务工作者参考。

关键词 对流有效位能 对流凝结高度 对流温度 可逆湿绝热过程 假绝热过程 等假相当位温过程

中图法分类号 P401 P455 P457.9

方法: ↖

$$E_{p_0}^p = c_p(T_0 - T_p) + L_v(q_0 - q_{sp}) - g_0 H_0^p \quad (13) \quad \leftarrow$$

式中 $c_p = c_{pd}(1 + q_0(c_w/c_{pd} - 1))(T_0 - T_p) \approx c_{pd}$; q_0 是地面的比湿, q_p 是上升气块达到高层 p 等压面时气块的比湿, H_0^p 是气层厚度, $g_0 = 9.8 \text{ J/kg/gpm}$ 。↖

将式 (13) 改写为: ↖

$$\Delta E_k = \frac{1}{2} w_p^2 - \frac{1}{2} w_0^2 = E_{p_0}^p = c_p T_0 \left(1 - \frac{T_p}{T_0}\right) + L_v q_0 \left(1 - \frac{q_p}{q_0}\right) - g_0 H_0^p \quad (14) \quad \leftarrow$$

对式 (14) 两边分别求导数: ↖

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\Delta E_k) &= c_{pd} \left[\left(1 - \frac{T_p}{T_0}\right) \frac{\partial}{\partial t} T_0 - T_0 \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{T_p}{T_0}\right) \right] \leftarrow \\ &+ L_v \left[\left(1 - \frac{q_p}{q_0}\right) \frac{\partial}{\partial t} q_0 - q_0 \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{q_p}{q_0}\right) \right] - g_0 \frac{\partial}{\partial t} H_0^p \quad (15) \quad \leftarrow \end{aligned}$$

式中, $\frac{\partial}{\partial t}(T_p/T_0) \approx 0$, $\frac{\partial}{\partial t}(q_p/q_0) \approx 0$, 忽略较小的项, 式 (15) 简化为: ↖

$$\frac{\partial}{\partial t}(\Delta E_k) = \frac{\partial}{\partial t}(Eh_0) - g_0 \frac{\partial}{\partial t} H_0^p \quad (16) \quad \leftarrow$$

式 (16) 中, $\frac{\partial}{\partial t}(\Delta E_k)$ 就是 $CAPE$ 的增量。 $Eh_0 = c_{pd}T_0 + L_vq_0$ 是地面附近的湿焓。由式 (16)

可见, $CAPE$ 对地面温湿变化非常敏感, 若比湿不变, 地面每增加 1°C , 则 $CAPE$ 增加约 1000 J/kg 。若气温不变, 比湿每增加 1 g/kg , 则 $CAPE$ 增加约 2500 J/kg ; 等式右边第二项是厚度变化项, 如果高层等压面位势高度降低, 则 $CAPE$ 增大, 高层等压面位势高度每降低 40 gpm , $CAPE$ 增加约

$$\frac{\partial}{\partial t}(\Delta E_k) = c_p [(1 - \frac{T_p}{T_0}) \frac{\partial}{\partial T_0} T_0 - T_0 \frac{\partial}{\partial T_p} (\frac{T_p}{T_0})] \dots$$

- CAPE-基于能量守恒
- CAPE ——本身是从外部获取的能量
- 内能（静力能）-外能不能混淆
- CAPE既不是大气层结之间的静力能差
- CAPE随时间变化也不是抬升气块静力能的改变（严格说没有CAPE倾向变化方程存在，CAPE收支的说法也不准确）

高层等压面位势高度降低，则 CAPE 增大，高层等压面位势高度每降低 40gpm，CAPE 增加约 400J/kg。↵

不考虑非绝热加热影响，不考虑水分蒸发和水汽凝结，在静力平衡条件下，式（16）可改写为：↵

$$\frac{\partial}{\partial t}(\Delta E_k) \approx -\dot{V}_{h0} \bullet \nabla(Eh_0) + \dot{V}_{hL} \bullet g_0 \nabla H_0^p \quad (17) \quad \leftarrow$$

研究一辈子，也会范错误——原因——脱离物理本质
启示：一定要从物理学角度理解气象问题

局地对流云的云底高度。对流温度在局地对流云的预报中具有一定的指示意义，对流凝结高度能在一定程度上反映出局地对流云的云底高度。↵

4.1 对流凝结高度和对流温度常用的计算方法↵

(7)

L_{vf} 分别为载水汽块

在 (12) 式和 (18) 式中，如果将水的汽化潜热看做常量，并用 L_0 代替，再舍去等式右端量级极小的项，可以得到更为简洁

- CAPE 已经成为可完全积分-得出表达式了!
- CAPE 不需一步步计算状态和温差 (浮力) 做功了!
- CAPE 由气块自由对流和平衡高度两点终态确定了!

$T_0 H_f$ (8)

气象, 1987年第11期

达平衡高度时的温度,

~~某某~~等 (1987, 2010) 提出了可逆湿绝热过程不稳定能量新的计算公式 (详见附录):

- 根据结论简单分析以及实际计算就知道, 错了!
- 结论比较怪诞, 作者竟然没有发现, 奇了!
- 错误持续多年, 多篇文章竟有似乎合理的结果, 怪了!

对上文错误根源进行初步解析，目前发现2主要错误

- 公式变换时气块和环境物理量混淆，浮力项隐匿
- 在垂直运动学方程中对气块应用“静力平衡”假定

$$(1+r_1)\frac{dw}{dt} = (1+r_2)\frac{v}{T_{va}}g - (r_1 - r_2)g \quad (31)$$

其中 $\frac{dw}{dt}$ 为垂直加速度， r_1 为水物质总的混合比， r_2 为水蒸气的混合比， T_v 为湿空气的虚温， T_{va} 为环境空气的虚温。

~~原文~~认为，上(31)两边同乘以 dz ，代入静力学方程 $dP = -\rho_e g dz$ 和状态方程 $P = \rho_e R_d T_{va}$ ，有：

$$(1+r_1)d\left(\frac{1}{2}w^2\right) = -(1+r_2)R_d T_v d\ln P - (1+r_1)g dz \quad (32)$$

下面此对(31)和(32)式进行分析。

(31)式中，右端第一项为气块所受的环境静浮力，第二项可看成是水物质拖曳。公式(31)从受力分析角度，应用牛顿第二定律得出的气块垂直运动方程，应该没有问题。但是在(32)式中明显可反映出，环境的静浮力项却不知所踪，是否隐藏在其他项内？这说明有必要对(32)式进行进一步分析。

如果不考虑水汽，即假设为干空气，那么(32)式可蜕变为：

$$d\left(\frac{1}{2}w^2\right) = -R_d T d\ln P - g dz \quad (33)$$

利用环境空气满足气态方程 $P = \rho_e RT$ 及静力平衡 $dP = -\rho_e g dz$ ，可以对(33)式作如

4.2 “对流有效位能计算的新方案” 计算公式存在的悖论浅析

下面首先 (21) 式进行一下分析。

由于绝热过程中气块的静力能 $E = C_{pd}T + Lq + gz$ 守恒，故气块从地面抬升到抬升凝结高度过程中，由于比湿度不变，那么可知在以上过程中，有 $C_{pd}(T_0 - T_c) = g(H_c - H_0) = gH_0^c$ ，这样，就进一步可得：

$$CIN_{woc} = q_0(C_{pv} - C_{pd})(T_0 - T_c) \quad (22)$$

对上文错误公式简单应用就可发现许多悖论

■对CIN极为简单的应用剖析就可发现许多问题

■T-LnP图CAPE的实际计算结论完全不同于该公式结果

根据李得出的公式，地面升温后地面至抬升凝结高度处的对流抑制反而增大，这完全违反了常规大气热力学特性，再一次验证此公式是不正确的。

再对以上公式作一特殊但却合理的假设：假设大气层结除抬升起点较湿外 ($q_0=0.015$)，其他层结空气均很干（比湿接近 0，可当干空气处理），且假设在地面至对流凝结高度处大气的温度递减率刚好等于干绝热递减率，并假设抬升凝结温度比抬升起点温度低 10 度，那么对应常规探空分析可知此段对流抑制一定为 0，但从李的公式得出的结论为：

$$CIN_{woc} = q_0(C_{pv} - C_{pd})(T_0 - T_c) \approx 0.015 \times (1860 - 1004) \times 10 = 128.4$$

起始抬升温度24.6度

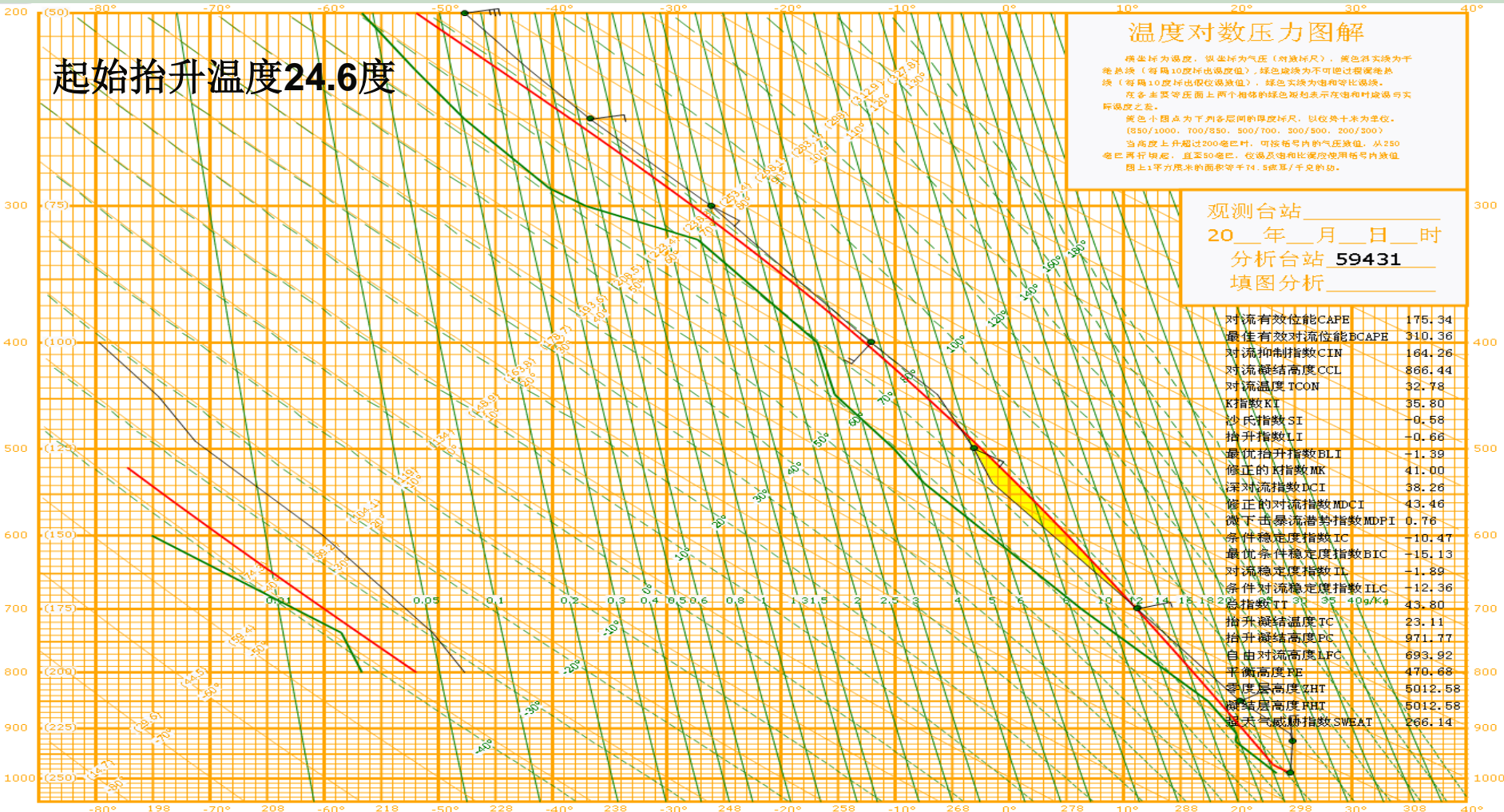
温度对数压力图解

横坐标为温度，纵坐标为气压（对数标尺），黄色实线为干绝热线（每隔10度标出假绝热线），绿色虚线为不可逆过程假绝热线（每隔10度标出假绝热线），蓝色实线为饱和比湿线。
 在各主要等压面上两个相邻的绿色短划表示在饱和时虚线与实际温度之差。

黄色小圆点为下列各层间的厚度标尺，以每十米为单位。
 (850/1000, 700/850, 500/700, 300/500, 200/300)
 当高度上升超过200毫巴时，可按括号内的气压数值，从250毫巴两行读取，且至50毫巴，位置及饱和比湿度使用括号内数值。
 图上1平方厘米的面积等于74.5毫米/千克的功。

观测台站 _____
 20__年__月__日__时
 分析台站 **59431**
 填图分析 _____

对流有效位能CAPE	175.34
最佳有效对流位能BCAPE	310.36
对流抑制指数CIN	164.26
对流凝结高度CCL	886.44
对流温度 TCON	32.78
K指数KI	35.80
沙氏指数SI	-0.58
抬升指数LI	-0.66
最优抬升指数BLI	-1.39
修正的K指数MK	41.00
深对流指数DCI	38.26
修正的对流指数MDCI	43.46
微下击暴流潜势指数MDPI	0.76
条件稳定度指数IC	-10.47
最优条件稳定度指数BIC	-15.13
对流稳定度指数IL	-1.82
条件对流稳定度指数ILC	-12.36
总指数TT	30 35 40g/kg
抬升凝结温度TC	23.11
抬升凝结高度PC	971.77
自由对流高度LFC	693.92
平衡高度PE	470.68
零度层高度ZHT	5012.58
凝结层高度PHT	5012.58
湿天气威赫指数SWEAT	2661.14

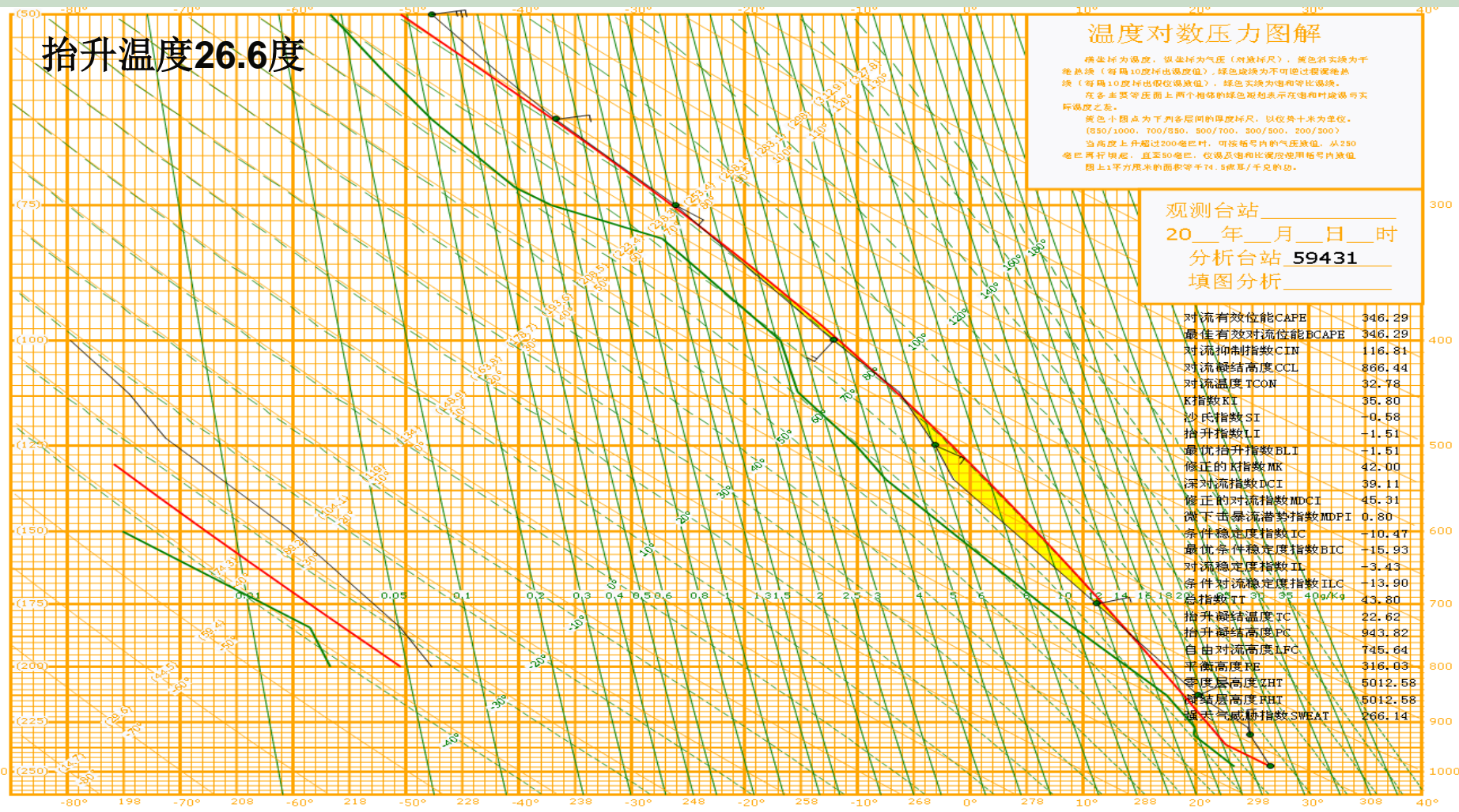


抬升温度26.6度

温度对数压力图解

横坐标为温度，纵坐标为气压（对数标尺），黄色斜实线为干绝热线（每隔10度标出温度值），绿色虚线为不可逆过程湿绝热线（每隔10度标出湿度值），绿色实线为饱和湿绝热线（每隔10度标出湿度值），绿色实线为饱和湿绝热线。
 在各主要等压面上两个相邻的绿色短粗线表示在饱和时湿绝热线与实际湿绝热线之差。
 黄色小圆点为下列各层间的厚度标尺，以公里十米为单位。
 (850/1000, 700/850, 500/700, 300/500, 200/300)
 当高度上升超过200毫巴时，可按括号内的气压比值，从250毫巴再行读取，直至50毫巴，比值及饱和湿绝热线号内数值图上1平方厘米的面积等于74.5厘米/千克的边。

观测台站 _____
 20__年__月__日__时
 分析台站 **59431**
 填图分析 _____



对流有效位能CAPE	346.29
最佳有效对流位能BCAPE	346.29
对流抑制指数CIN	116.81
对流凝结高度CCL	866.44
对流温度TCO	32.78
K指数KT	35.80
沙氏指数SI	-0.58
抬升指数LI	-1.51
最优抬升指数BLI	-1.51
修正的K指数MK	42.00
深对流指数DCI	39.11
修正的对流指数MDCI	45.31
微下击暴流潜势指数MDPI	0.80
条件稳定度指数IC	-10.47
最优条件稳定度指数BIC	-15.93
对流稳定度指数IL	-3.43
条件对流稳定度指数ILC	-13.90
露指数TT	38.38
抬升凝结温度TC	22.62
抬升凝结高度PC	943.82
自由对流高度LFC	745.64
平衡高度PE	316.03
零度层高度ZHT	5012.58
融化层高度MHT	5012.58
湿空气感湿指数SWEAT	266.14

抬升温度28.6度

温度对数压力图解

横坐标为温度，纵坐标为气压（对数标尺），黄色斜实线为干绝热（每隔10度标出虚值），绿色虚线为不可逆过程绝热（每隔10度标出假假值），绿色实线为饱和比湿线。
 在各主要等压面上两个相邻的绿色矩形表示在饱和时湿绝热与实际湿绝热之差。
 黄色小圆点为下列各层间的湿度标尺，以每十米为单位。
 (850/1000, 700/850, 500/700, 300/500, 200/300)
 当高度上升超过200毫巴时，可将括号内的气压数值，从250毫巴再行读取，直至50毫巴，位置及饱和比湿度使用括号内数值。
 图上1平方厘米的面积等于74.5毫米/千克的边。

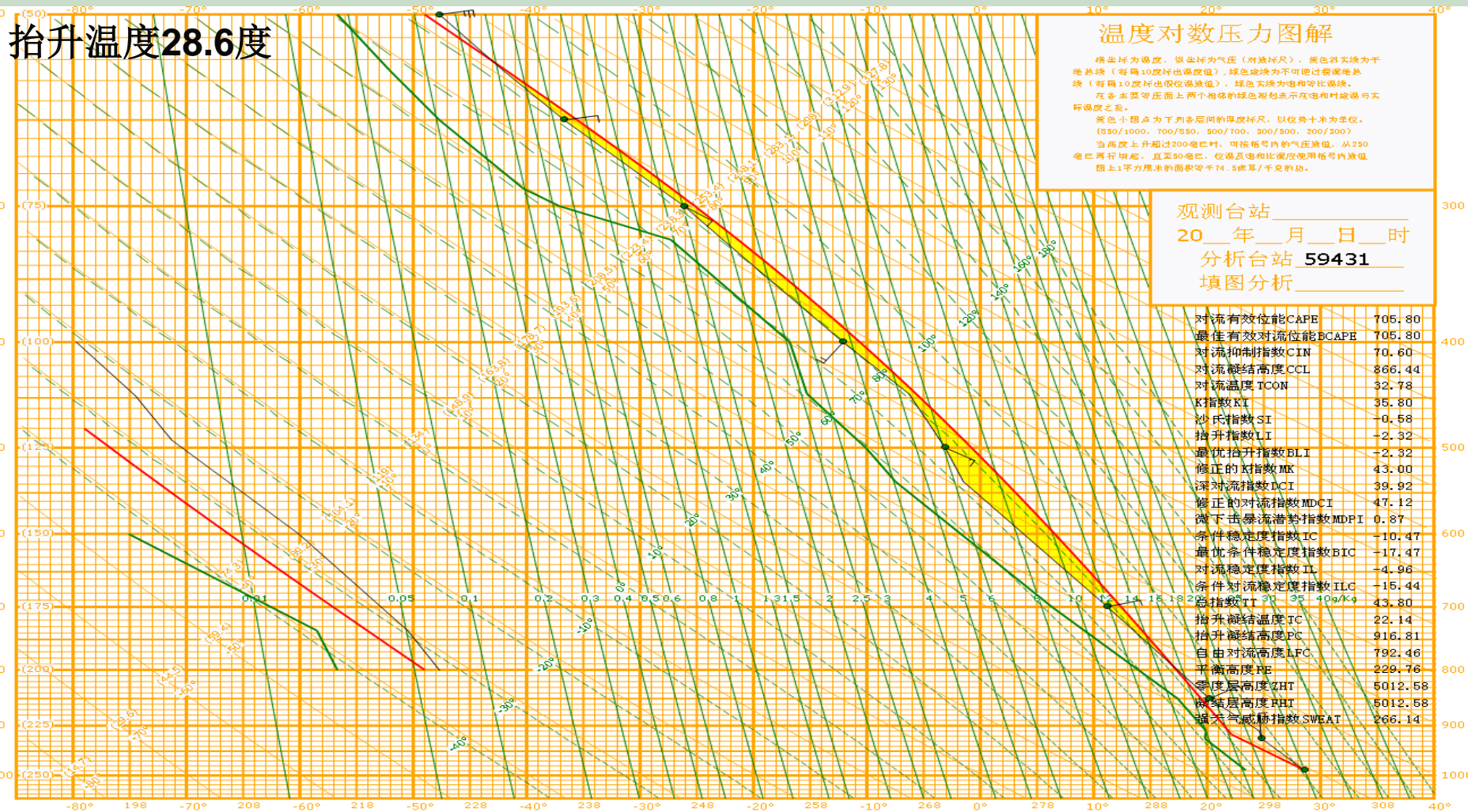
观测台站

20__年__月__日__时

分析台站 **59431**

填图分析

对流有效能CAPE	705.80
最佳有效对流位能BCAPE	705.80
对流抑制指数CIN	70.60
对流凝结高度CCL	866.44
对流温度 TCON	32.78
K指数KI	35.80
沙氏指数SI	-0.58
抬升指数LI	-2.32
最优抬升指数BLI	-2.32
修正的K指数MK	43.00
深对流指数DCI	39.92
修正的对流指数MDCI	47.12
微下击暴流潜势指数MDPI	0.87
条件稳定度指数IC	-10.47
最优条件稳定度指数BIC	-17.47
对流稳定度指数IL	-4.96
条件对流稳定度指数ILC	-15.44
总指数TT	30 35 40g/kg 43.80
抬升凝结温度TC	22.14
抬升凝结高度PC	916.81
自由对流高度LFC	792.46
平衡高度PE	229.76
零度层高度ZHT	5012.58
冰层高度PHT	5012.58
湿空气威利指数SWEAT	266.14



抬升温度30.6度

温度对数压力图解

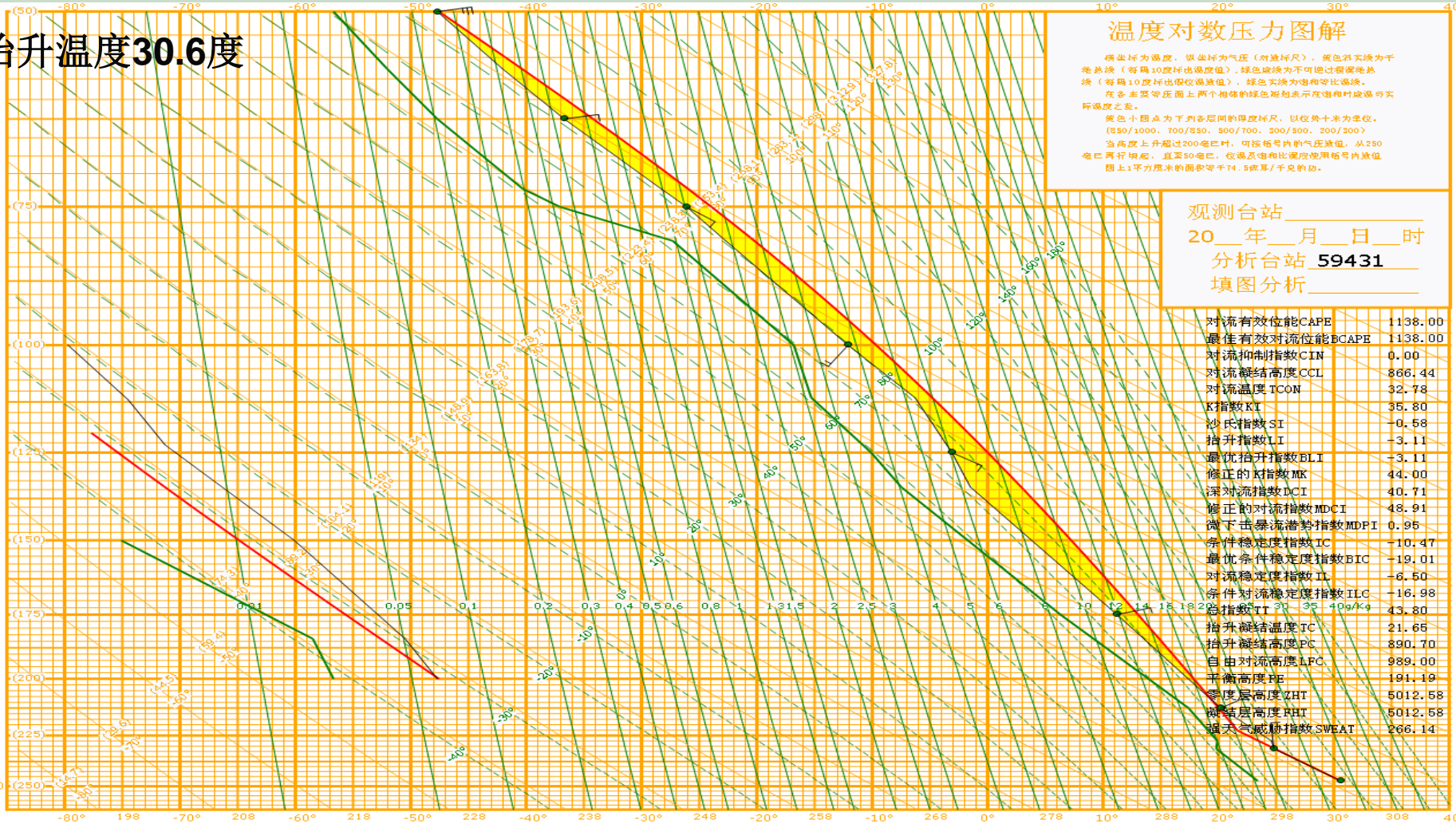
横坐标为温度，纵坐标为气压（对数标尺），黄色斜实线为干绝热线（每隔10度标出温度值），绿色虚线为不可逆过程湿绝热（每隔10度标出假位温值），绿色实线为饱和湿绝热，在各主要等压面上两个相邻的绿色短标表示在饱和时实际温度之差。

黄色小点图为下列各层间的厚度标尺，以公里十米为单位，(850/1000, 700/850, 500/700, 300/500, 200/300)

当高度上超过200毫巴时，可按括号内的气压数值，从250毫巴两行读取，直至50毫巴，气压及饱和比湿度使用括号内数值图上1厘米的面积等于74.5厘米/千克的值。

观测台站 _____
 20__年__月__日__时
 分析台站 **59431**
 填图分析 _____

对流有效位能CAPE	1138.00
最佳有效对流位能BCAPE	1138.00
对流抑制指数CIN	0.00
对流凝结高度CCL	866.44
对流温度TCON	32.78
K指数KI	35.80
沙氏指数SI	-0.58
抬升指数LI	-3.11
最优抬升指数BLI	-3.11
修正的K指数MK	44.00
深对流指数DCI	40.71
修正的对流指数MDCI	48.91
微下击暴流潜势指数MDPI	0.95
条件稳定度指数IC	-10.47
最优条件稳定度指数BIC	-10.01
对流稳定度指数IL	-6.50
条件对流稳定度指数ILC	-16.98
总指数TTI	43.80
抬升凝结温度TC	21.66
抬升凝结高度PC	890.70
自由对流高度LFC	989.00
平衡高度PE	191.19
零度层高度ZHT	5012.58
凝结层高度PHT	5012.58
强天气威胁指数SWEAT	266.14



抬升温度32.6度，接近对流温度

温度对数压力图解

横坐标为温度，纵坐标为气压（对数标尺），黄色斜实线为干绝热线（每隔10度标出温度值），绿色虚线为不可逆过程绝热线（每隔10度标出假位温值），绿色实线为饱和湿绝热线（每隔10度标出假位温值），绿色实线为饱和等比湿线。在各主要等压面上两个相邻的绿色虚线表示在饱和时湿绝热与实际绝热之差。

黄色小圆点为下列各层间的厚度标尺，以位势十米为量尺。
(850/1000, 700/850, 500/700, 300/500, 200/300)
当高度上升超过200毫巴时，可按括号内的气压比值，从250毫巴开始读取，直至50毫巴，比值及饱和比湿均使用括号内数值。图上1平方厘米的面积等于14.5厘米/千克的功。

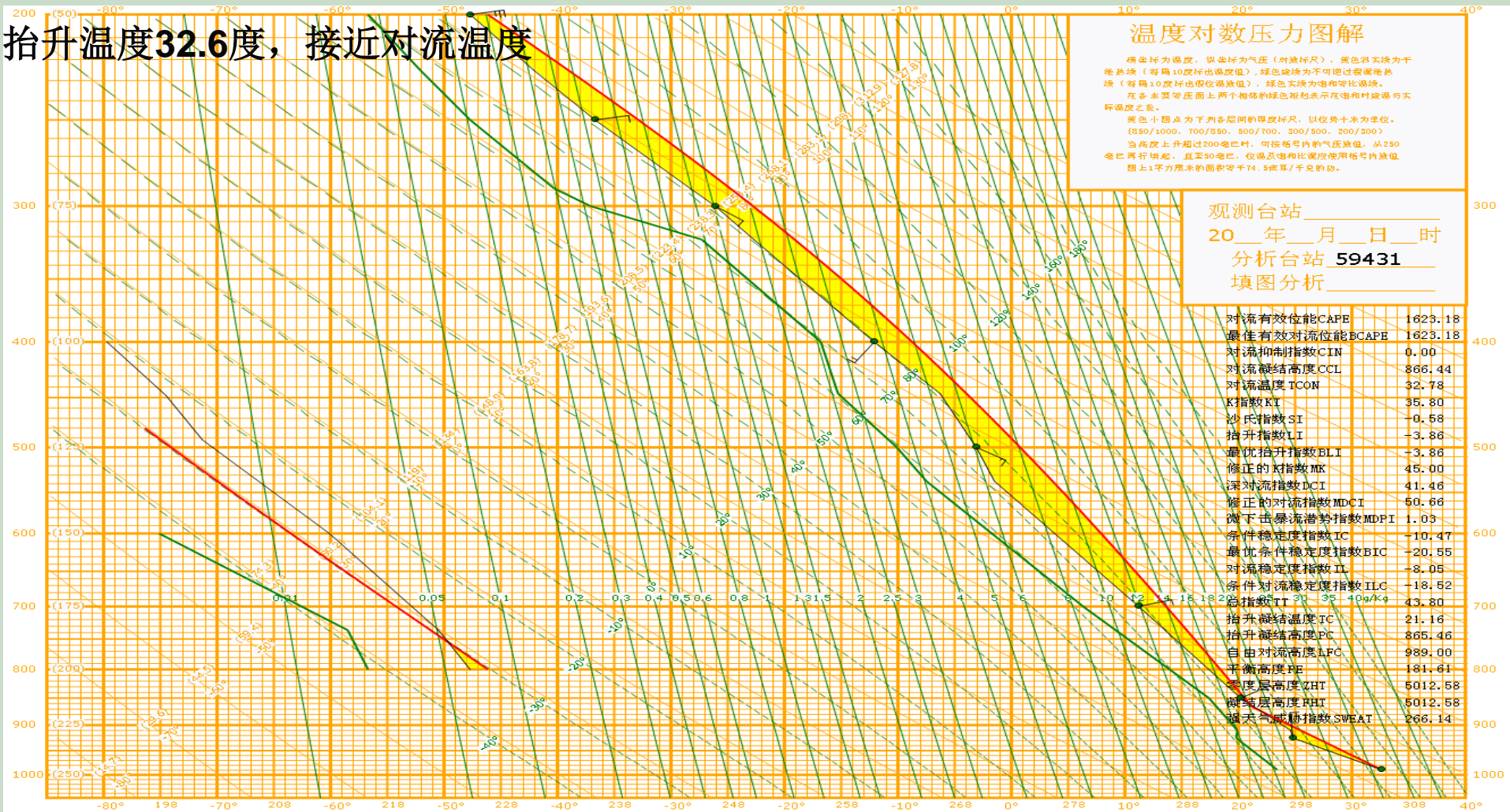
观测台站 _____

20__年__月__日__时

分析台站 **59431**

填图分析 _____

对流有效能CAPE	1623.18
最佳有效对流位能BCAPE	1623.18
对流抑制指数CIN	0.00
对流凝结高度CCL	866.44
对流温度TCOIN	32.78
K指数KI	35.80
沙氏指数SI	-0.58
抬升指数LI	-3.86
最优抬升指数BLI	-3.86
修正的K指数MK	45.00
深对流指数DCI	41.46
修正的对流指数MDCI	50.66
微下击暴流潜势指数MDPI	1.03
条件稳定度指数IC	-10.47
最优条件稳定度指数BIC	-20.55
对流稳定度指数IL	-8.05
条件对流稳定度指数ILC	-18.52
总指数TT	31.35
抬升凝结温度TC	21.16
抬升凝结高度PC	865.46
自由对流高度LFC	989.00
平衡高度PE	181.61
零度层高度ZHT	5012.58
零度层高度PHT	5012.58
强天气威胁指数SWEAT	266.14

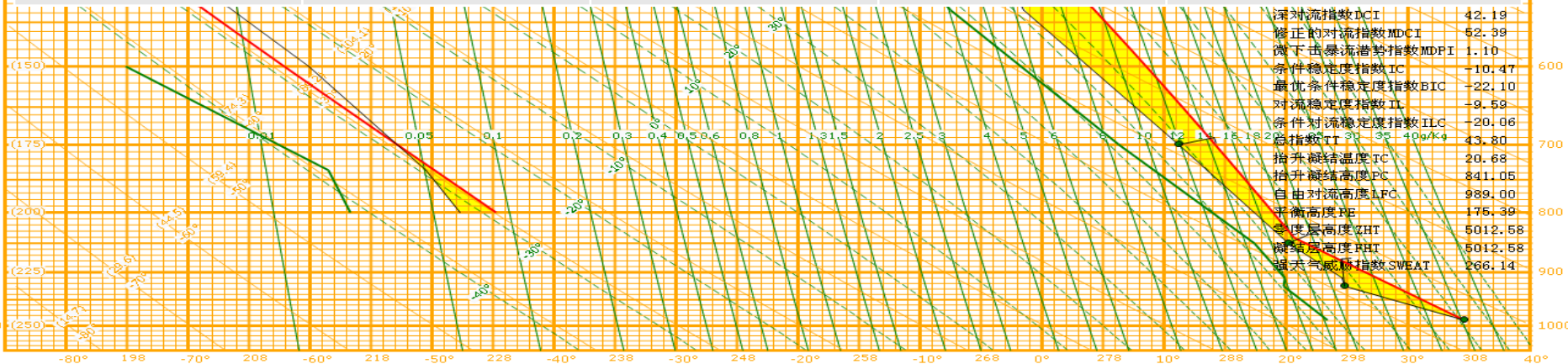


抬升温度34.6度

温度对数压力图解

横坐标为温度，纵坐标为气压（百帕），黄色斜实线为干绝热线（每箱10度标出温度值），绿色虚线为不可逆过程湿绝热线（每箱10度标出假位温值），绿色实线为饱和等比湿线。在各主要等压面上两个相邻的绿色短粗表示层结和时层结与实际层结之差。黄色小圆点为下列各层间的厚度标尺，以公里十米为单位。

温度	增加	CAPE	CAPE增量	CAPE增量/度
24.6	0	175.34	—	—
26.6	2	346.29	170.95	85.6
28.6	4	705.80	359.51	179.8
30.6	6	1138.00	432.2	216.1
32.6	8	1623.18	485.18	242.6
34.6	10	2152.56	529.38	264.7



五、对对流有效位能物理本质理解偏差引起的思考

- 理解尚有差距（已发表论文、MICAPS错误、审稿遇到的问题）——一定的普遍性
- 气象是物理问题，理解是应用的基础
- 警惕空头理论家与Bad Science（陶祖钰教授）



六、下沉对流有效位能、下击暴流和雷暴大风 ——有助于全面理解强对流天气过程

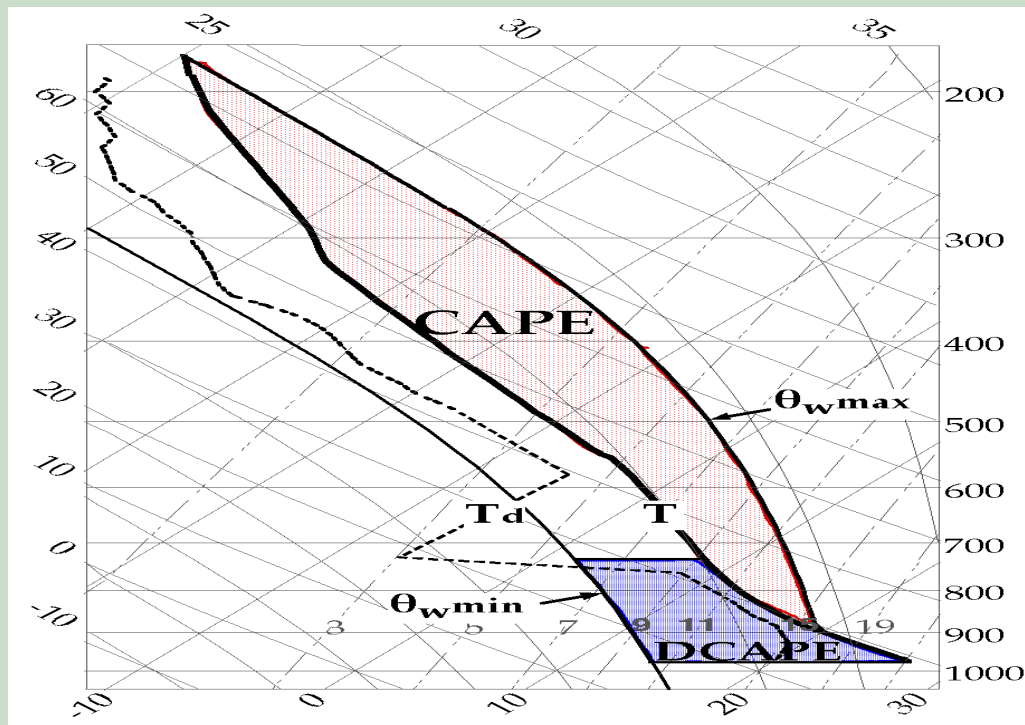
- 对流下沉运动产生的根本原因
- 下沉对流有效位能的物理意义
- 下沉对流有效位能的表达式

$$DCAPE = g \int_{Z_{sfc}}^{Z_D} \frac{1}{\bar{T}_{ve}} (T_{ve} - T_{va}) dz$$

$$DCAPE = R \int_{P_i}^{P_n} (T_{va} - T_{ve}) d \ln p$$

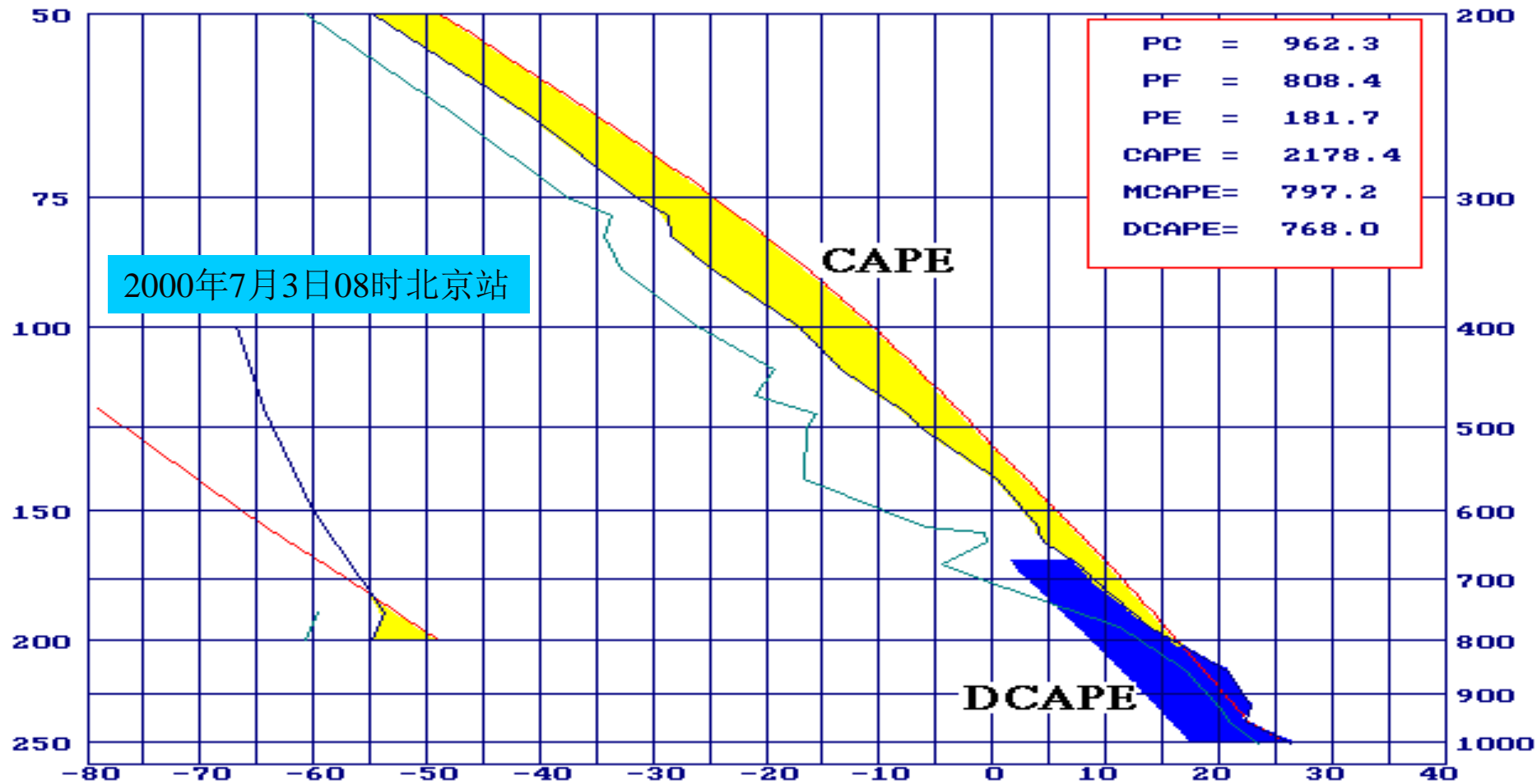


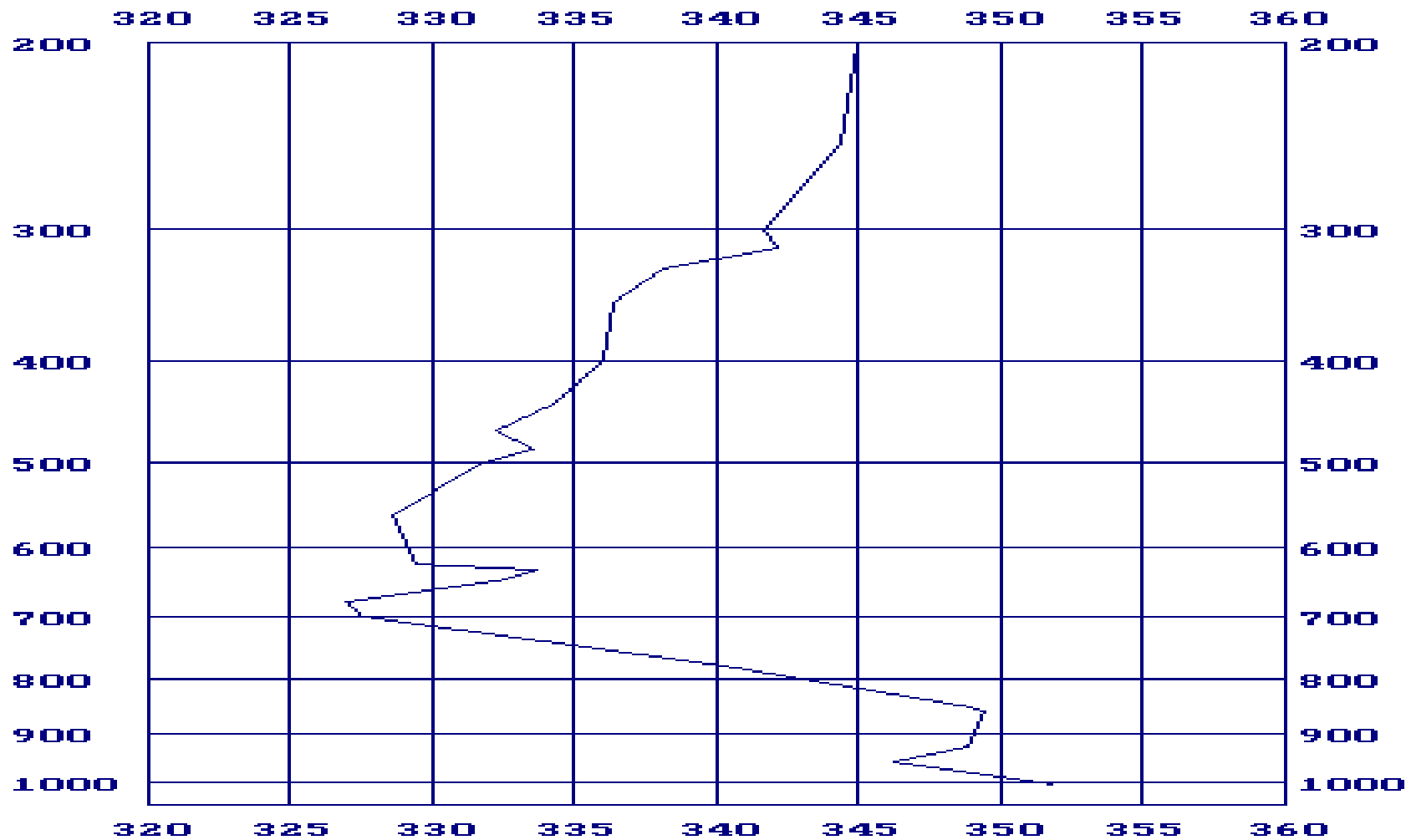
下沉对流有效位能 (续)

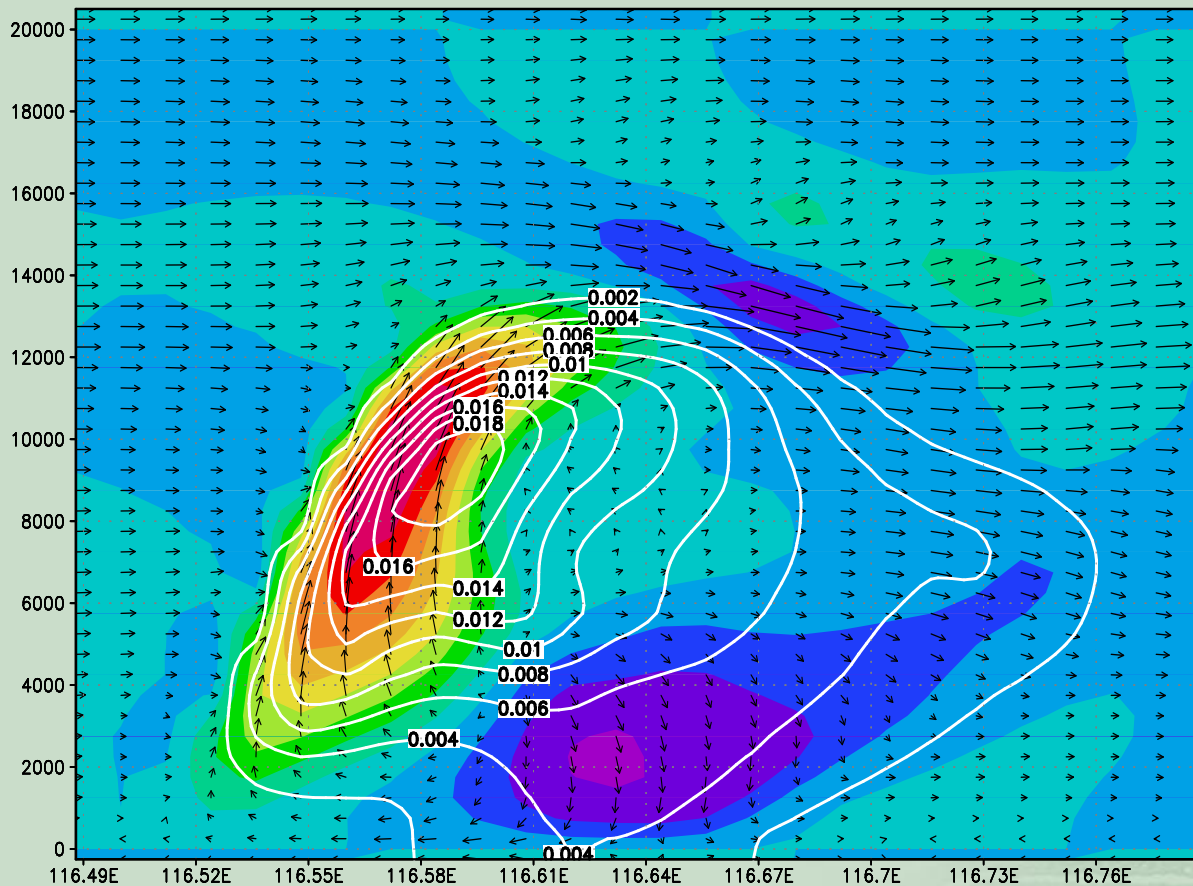


- 此图诠释了中层干空气与下沉对流的关系，解释了雷暴冷高压。
- 下沉对流很难受小扰动自由发展，泛泛地对每个探空都计算DCAPE没有意义
- 慎重对待区域DCAPE分布问题

冷下沉至地面的温度可以计算得到







- 1、发展强盛
- 2、雨水中心和垂直速度中心分离
- 3、倾斜明显
- 4、阻挡绕流
- 5、高空急流
- 6、两下沉中心
- 7、主下沉起点
- 8、地面辐散风
- 9、自组织结构
- 10、DCAPE

模拟24分钟的沿风暴中心垂直速度（伪彩）、u-w风矢、液态水含量剖面图

总结

- 对流有效能量对于对流天气分析非常重要
- 理解是应用的前提和基础
- 不理解就……



个人体会，一家之言

欢迎斧正！

