

章丽娜,朱禾,周小刚. 2016. 关于虚温订正 CAPE 求算方法的讨论. 气象, 42(8):1007-1012.

关于虚温订正 CAPE 求算方法的讨论^{*}

章丽娜 朱 禾 周小刚

中国气象局气象干部培训学院, 北京 100081

提 要: 对流有效位能(CAPE)是强对流天气分析和预报中的重要参数,准确的 CAPE 计算应该采用虚温订正。目前 MICAPS 和 GRADS 两种常用软件计算经过虚温订正的 CAPE 时,积分起点采用的都是订正前的自由对流高度(LFC),即 LFC 是气块温度与环境温度之差由负值转为正值的转折点的高度。本文理论分析表明,虚温订正后环境的层结曲线和气块的状态曲线都将发生变化。作为求算虚温订正 CAPE 时的积分起点、环境虚温和气块虚温曲线的交点——LFC 也有相应变化,且虚温订正后 LFC 通常是降低的。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。实际分析示例表明, LFC 变化对 CAPE 数值大小的贡献或许是不明显的,但是它在图形上的表示更加合理,物理意义更加清晰。

关键词: 对流有效位能(CAPE), 虚温订正, 自由对流高度(LFC)

中图分类号: P401, P458

文献标志码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2016.08.011

Discussion About the Method of CAPE Calculation with Virtual Temperature Correction

ZHANG Lina ZHU He ZHOU Xiaogang

China Meteorological Administration Training Centre, Beijing 100081

Abstract: Convective available potential energy (CAPE) is an important parameter in severe weather analysis and forecasting. The virtual temperature correction should be used in accurate CAPE calculation. MICAPS and GRADS both choose previous values of level of free convection (LFC) as the integral starting points in CAPE calculation when using virtual temperature corrections. LFC is defined as the altitude in the atmosphere where the temperature difference between air parcel and the environment turns from negative to positive. Using the same altitude of LFC in CAPE calculation with virtual temperature correction, is obviously contrary to the definition of LFC. Theoretical analysis in this paper indicates that LFC changes in CAPE calculation with virtual temperature correction, since two temperature profiles of air parcel and the environment change after correction, and their crossing point (LFC) also changes. The altitude of LFC is usually decreased using virtual temperature correction. Case study shows that although the CAPE increment is not so obvious when using the revised LFC in CAPE calculation with virtual temperature correction, it will be more reasonable in graphical representation and more precise for its physical meaning when considering the variation of LFC.

Key words: convective available potential energy (CAPE), virtual temperature correction, level of free convection (LFC)

^{*} 国家自然科学基金项目(41475042)、中国气象局预报员专项(CMAYBY2015-096)和南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室开放课题基金(KLME1311)共同资助

2016 年 1 月 26 日收稿; 2016 年 3 月 16 日收修定稿

第一作者:章丽娜,主要从事 $T-\ln p$ 图在天气预报中应用的教学和研究工作. Email:zhangln@cma.gov.cn

引言

对流有效位能(CAPE)是气块在给定环境中垂直上升时热浮力的垂直积分(李耀东等,1998;Doswell et al,2004),是判断强雷暴是否能形成的最有用的工具之一(Doswell et al,1994;李娜等,2015),广泛应用于强对流天气的分析和预报(李耀东等,2004;叶爱芬等,2006;陈子通等,2006;魏东等,2011;赵玉春等,2011;王秀明等,2012;李云静等,2013;张建春等,2014;郑媛媛等,2015)。目前,对CAPE的应用已经扩展到了气候领域,可用于统计对流性降水的时空分布和演变特征、研究气候变化、分析热带气旋的形成和加强、改进模式的对流性降水预报等(Ye et al,1998;Adams et al,2009;Riemann-Campe et al,2009;Molinari et al,2012;Barkidija et al,2013)。

CAPE的计算与气块的初始抬升层、气块的温度及温度特性、所取的热力学上升路径、水凝物对密度的影响等有关。因此,CAPE的数值与上述特征关系密切(Craven et al,2002;刘健文等,2007;Vasquez,2009)。除了上述因素对CAPE的影响外,Doswell等(1994)指出:由于CAPE与上升气块和环境的密度差有关,而对密度的准确计算需要用到虚温,因此估计CAPE时也应该使用虚温进行计算。

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是否发生以及属于何种类型的重要指标。但是在教学过程中发现,MICAPS中经过虚温订正的CAPE会小于没有经过虚温订正的CAPE。这不但影响了对虚温订正CAPE概念的理解,也给预报员带来了非常大的困惑。仔细查看MICAPS计算CAPE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。

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。

1 虚温订正CAPE的理论公式

1.1 常规CAPE与虚温订正CAPE

对流有效位能CAPE常用的表达式为:

$$CAPE = -R_d \int_{p_{LFC1}}^{p_{EL1}} (T_v - \bar{T}_v) d \ln p \quad (1)$$

式中, T_v 和 $\bar{T}_v$ 分别表示气块和环境的虚温, p_{LFC1} 为自由对流高度,即 $T_v - \bar{T}_v$ 由负值转正值的转折点的高度,也即是气块密度开始小于环境密度,气块开始受环境正浮力作功的高度; p_{EL1} 为平衡高度,即 $T_v - \bar{T}_v$ 由正值再次转负值的转折点的高度(刘健文等,2007)。

在忽略水汽作用时,式(1)可写为:

$$CAPE \approx -R_d \int_{p_{LFC2}}^{p_{EL2}} (T - \bar{T}) d \ln p \quad (2)$$

式中, T 和 $\bar{T}$ 分别表示气块和环境的温度, p_{LFC2} 为不用虚温订正计算CAPE时的自由对流高度,即 $T - \bar{T}$ 由负值转为正值的转折点高度; p_{EL2} 为不用虚温订正计算CAPE时的平衡高度,即 $T - \bar{T}$ 由正值再次转为负值的转折点高度。

由于现在很多计算CAPE的程序是用式(2)计算得到,因此我们将之称为常规CAPE。而用式(1)得到的原始CAPE称为虚温订正CAPE。

可见式(1)和(2)中自由对流高度LFC和平衡高度EL是CAPE计算的关键点。查看MICAPS和GRADS中计算CAPE的源程序发现,在用虚温订正方法计算CAPE时, p_{LFC1} 和 p_{EL1} 都和用常规方法计算CAPE的 p_{LFC2} 和 p_{EL2} 相等,即取的是 $p_{LFC1} = p_{LFC2}$, $p_{EL1} = p_{EL2}$ 。这样的取法是否正确?下面先

从理论上说明虚温订正前后自由对流高度和平衡高度有何变化。

1.2 虚温订正 CAPE 计算中 LFC 和 EL 高度

图 1 示意了计算常规 CAPE 和虚温订正 CAPE 时的主要特征高度。虚温订正后的自由对流高度记为 LFC1, 常规的自由对流高度记为 LFC2。在 LFC2 处, 由于气块的温度和环境的温度相等, 因此 $T_{L2} = \bar{T}_{L2}$ (下标 L2 表示 LFC2)。

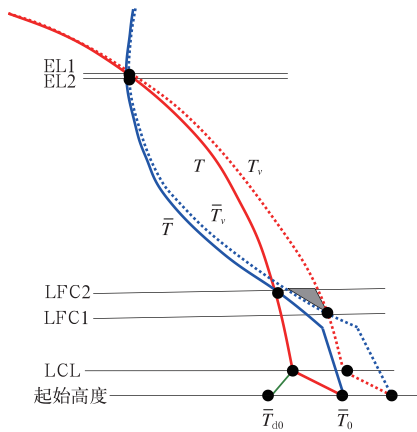


图 1 计算常规 CAPE 和虚温订正 CAPE 时相关的线条和特征高度示意图

(蓝色和红色粗实线分别表示环境和气块的温度廓线, 蓝色和红色虚线分别表示环境和气块的虚温廓线, 阴影表示虚温订正方法中考虑 LFC 降低后 CAPE 增加部分; LCL 为抬升凝结高度, LFC 为自由对流高度, EL 为平衡高度; 下标 1 和 2 用以区分采用虚温订正和不用虚温订正的特征高度; 气块起始高度的温度和露点分别用 T_0 和 $\bar{T}_{d0}$ 表示)

Fig. 1 Diagrammatic sketch about associated lines and heights in CAPE calculation using normal and revised methods

(The blue and red solid lines are temperature profiles of the environment and the air parcel; the dashed lines indicate new profiles after virtual temperature correction; the shaded area indicates CAPE increment when considering the decrease of LFC in virtual temperature correction. LCL, LFC and EL mean lifting condensation level, level of free convection, equivalent level and the convective condensation level, respectively. And the subscripts 1 and 2 are used to distinguish the typical heights whether using or not using virtual temperature correction)

LFC2 高度处的环境虚温和气块虚温分别为:

$$\bar{T}_{vL2} = (1 + 0.608\bar{q}_{L2})\bar{T}_{L2} \quad (3)$$

$$T_{vL2} = (1 + 0.608q_{L2})T_{L2} \quad (4)$$

式中, $\bar{q}_{L2}$ 和 q_{L2} 分别为 LFC2 处环境大气和气块的比

湿。由式(3)和(4)可知, LFC2 处, $\bar{T}_{vL2}$ 和 T_{vL2} 两者的大小比较取决于 $\bar{q}_{L2}$ 和 q_{L2} 的大小。

比湿 q 的计算公式为

$$q = 0.622 \frac{e}{p} \quad (5)$$

式中, e 为实际水汽压。一般而言, $e \leq e_s$, e_s 为饱和水汽压; $q \leq q_s$, q_s 为饱和比湿。饱和水汽压仅是温度的函数, 并随温度升高而增加, 计算实际水汽压可将露点代入饱和水汽压公式。

由式(5)可得环境大气的比湿为

$$\bar{q}_{L2} = 0.622 \frac{\bar{e}_{L2}}{p_{LFC2}} \quad (6)$$

而对于气块而言, LFC2 处已经饱和, 因此

$$q_{L2} = q_{sL2} = 0.622 \frac{e_{sL2}}{p_{LFC2}} \quad (7)$$

下面分两种不同的情况考虑:

(1) 当 LFC2 处环境的温度露点差为 0 时, $\bar{e}_{L2} = e_{sL2}$, 考虑到 LFC2 处气块与环境的温度相等, 因此两者的饱和水汽压相等, $e_{sL2} = \bar{e}_{sL2}$, 因此 $\bar{T}_{vL2} = T_{vL2}$ 。那么经过虚温订正后的 LFC 与常规方法算得的 LFC 高度相同, 即 $p_{LFC1} = p_{LFC2}$ 。

(2) 当 LFC2 处的温度露点差 > 0 时, $\bar{e}_{L2} < e_{sL2}$, 则 $\bar{T}_{vL2} < T_{vL2}$ 。那么经过虚温订正后的 LFC 低于常规方法算得的 LFC, 则 $p_{LFC1} > p_{LFC2}$, 如图 1 所示。

通常是第二种情况。也就是说, 虚温订正后, 自由对流高度多数情况下会下降。图 1 中, EL1 和 LFC1 之间红色和蓝色虚线所围面积代表的是虚温订正 CAPE, 而图 1 灰色阴影区表示的即是第二种情况下, 考虑与不考虑 LFC 变化时 CAPE 的差异。

从图 1 也可以看到, 当图中的 LFC1 和 LFC2 高度不变且虚温订正后气块的状态曲线不变时, 阴影区的面积与 LFC2 高度上 $T_v - \bar{T}_v$ 的大小有关。定性而言, $T_v - \bar{T}_v$ 越大, 阴影区面积越大。根据式(3)和(4)以及 $T_{L2} = \bar{T}_{L2}$, 可得

$$T_{vL2} - \bar{T}_{vL2} = 0.608\bar{T}_{L2}(q_{L2} - \bar{q}_{L2})$$

将式(6)和(7)代入上式得

$$\begin{aligned} T_{vL2} - \bar{T}_{vL2} &= C\bar{T}_{L2} \left(\frac{e_{sL2}}{p_{LFC2}} - \frac{\bar{e}_{L2}}{p_{LFC2}} \right) \\ &= \frac{C\bar{T}_{L2}}{p_{LFC2}} [e_s(\bar{T}_{L2}) - e_s(\bar{T}_{dL2})] \end{aligned} \quad (8)$$

式中, C 为常数, $C = 0.608 \times 0.622$, $\bar{T}_{dL2}$ 为 LFC2 处的环境露点。通过上式可知, 当 LFC2 处环境空气的温度露点差越大时, 则 $T_v - \bar{T}_v$ 也越大。也就是说, 在其他条件相同的情况下, 原 LFC 高度上环境

空气越干,则由于 LFC 取法不同造成的虚温订正 CAPE 之差越大。反之,如果原 LFC 高度上环境空气越湿,则由于 LFC 取法不同造成的虚温订正 CAPE 之差越小。

下面再看一下平衡高度 EL 的变化。记虚温订正后的 EL 高度为 p_{EL1} ,常规方法计算的 EL 高度为 p_{EL2} 。在 p_{EL2} 处,由于气块的温度和环境的温度相等,因此 $T_{E2} = \bar{T}_{E2}$ (下标 E2 表示 EL2)。该高度上环境虚温和气块虚温分别为:

$$\bar{T}_{vE2} = (1 + 0.608\bar{q}_{E2})\bar{T}_{E2} \quad (9)$$

$$T_{vE2} = (1 + 0.608q_{E2})T_{E2} \quad (10)$$

$$\bar{q}_{E2} = 0.622 \frac{\bar{e}_{E2}}{p_{EL2}} \quad (11)$$

$$q_{E2} = q_{sE2} = 0.622 \frac{e_{sE2}}{p_{EL2}} \quad (12)$$

到了高层,水汽稀少,不论是环境大气的实际比湿 $\bar{q}_{E2}$ 还是气块的饱和比湿 q_{sE2} 都非常小。

与式(8)类似,式(10)和(9)相减,并将式(11)和(12)代入可得

$$\begin{aligned} T_{vE2} - \bar{T}_{vE2} &= C\bar{T}_{E2} \left(\frac{e_{sE2}}{p_{EL2}} - \frac{\bar{e}_{E2}}{p_{EL2}} \right) \\ &= \frac{C\bar{T}_{E2}}{p_{EL2}} [e_s(\bar{T}_{E2}) - e_s(\bar{T}_{dE2})] \end{aligned} \quad (13)$$

通常情况下, $e_s(\bar{T}_{E2}) > e_s(\bar{T}_{dE2})$ 。即在 EL2 处,气块虚温仍高于环境虚温,因而订正后的 EL1 高于常规方法得到的 EL2,即 $p_{EL1} < p_{EL2}$ (如图 1 所示)。但由于高层的水汽含量极少,式(13)的值非常小,因此可认为 EL 在订正前后没有明显变化,近似相等,它的取法对虚温订正 CAPE 的影响可以忽略。

2 实际分析示例

目前 MICAPS 计算的 CAPE 包括常规 CAPE 和 LFC 不变的虚温订正 CAPE,这些值都是自动输出,不便修改源程序。因此本文的实际分析示例中采用 GRADS 软件,按上节的方法来计算虚温订正 CAPE(注:GRADS 软件中缺省的虚温订正 CAPE 没有考虑 LFC 的改变)。

首先,对比 MICAPS 和 GRADS 两种软件绘制的 $T-\ln p$ 图以及计算的一些相关物理量是否存在显著差异。选取 2005 年 6 月 14—15 日的一次强对流个例作分析。2005 年 6 月 14 日晚到 15 日凌晨,安徽东北部、江苏北部出现了强对流风暴,造成特大雹

暴灾害。强对流风暴自西北向东南方向移动,14 日夜间影响安徽的宿州、蚌埠、滁州等市,15 日 02:50 移出安徽省进入江苏,南京、徐州等多地相继发生冰雹和暴雨灾害。在强对流发生前的 14 日 20 时,安徽和江苏的多个探空图显示具有很强的不稳定能量。其中南京的探空显示 CAPE 较大,且具有第 1.2 节中提到的虚温订正前 LFC 高度处环境大气较干的特征(图 2)。

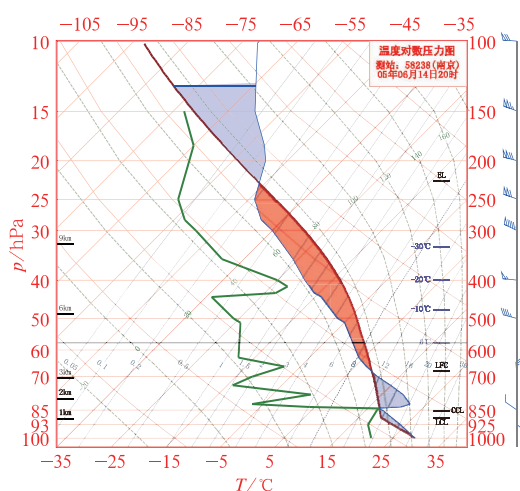


图 2 MICAPS 绘制的 2005 年 6 月 14 日 20 时江苏南京(58238)斜 $T-\ln p$ 图

(采用常规方法),在图上标有 LFC、EL 和 LCL 等特征高度,以及 CAPE(红色阴影)、CIN(地面到 LFC 之间的蓝色阴影)

Fig. 2 The skew $T-\ln P$ of Nanjing (58238) at 20:00 BT 14 June 2005 drawn by MICAPS using normal method (neglecting the virtual temperature correction). The red area means CAPE and the lower blue area means CIN, the important levels such as LFC, EL and LCL are labeled on the right side of the plot

图 3 是利用 GRADS 软件绘制的斜 $T-\ln p$ 图,图上包含了常规方法和虚温订正方法得到的能量区、主要特征高度等信息。GRADS 利用常规方法绘制的 CAPE 区及主要交点与 MICAPS 绘制的基本相当,形状也一致,但数值有一定差异(见表 1)。MICAPS 的常规 CAPE 为 $1358.5 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,而 GRADS 计算的常规 CAPE 为 $1563.5 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,GRADS 比 MICAPS 计算的常规 CAPE 大了约 $200 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。CAPE 数值的差异可能与采用的热力学近似公式(尤其是湿绝热线的计算)的差异有关。仔细比对发现,在同样高度的 LCL 处 GRADS 对应的湿绝热线比 MICAPS 偏右一些。GRADS 得到的

LFC 较 MICAPS 的 LFC 略低 5 hPa,而 EL 的情况相反,略高 10 hPa。于是相比 MICAPS 而言,GRADS 根据公式(2)计算常规 CAPE 时,下限降低而上升升高,且由于状态曲线略右偏,积分区间内,气块的温度也略偏高,使得整个积分值偏高,CAPE 偏大。

虽然两个软件之间对流参数的具体数值有一些偏差,但是总体而言斜 $T\text{-}\ln p$ 图相似。下面采用

GRADS 软件按上节的公式来计算 LFC 不变与变化时的虚温订正 CAPE。图 3a 是严格按照定义(LFC 变化)计算虚温订正 CAPE 的斜 $T\text{-}\ln p$ 图,图 3b 是 LFC 取为不变时计算虚温订正 CAPE 的斜 $T\text{-}\ln p$ 图。如图 3 和表 1 所示,LFC 在虚温订正后降低,从 683.6 hPa 降低到 716.5 hPa, LFC 处的温度升高了 3.8°C 。EL 高度在虚温订正后略有升高,气压从 215.3 hPa 变为 215.1 hPa,其变化可以忽略。

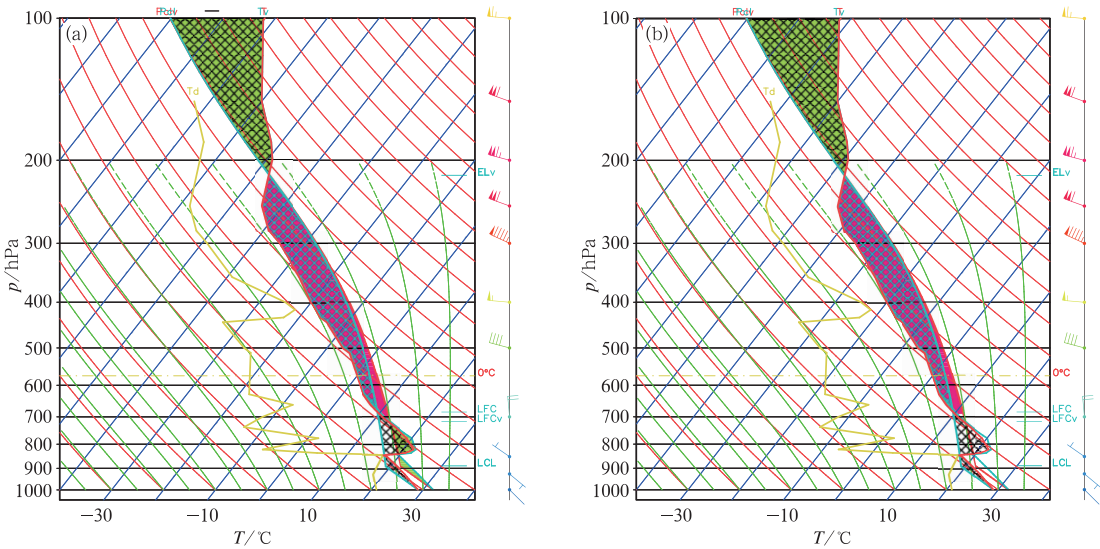


图 3 利用 GRADS 软件绘制的 2005 年 6 月 14 日 20 时江苏南京(58238)斜 $T\text{-}\ln p$ 图
(两图的主要差别是在计算虚温订正 CAPE 时积分起点的不同)
(a)考虑了 LFC 变化,(b)LFC 不变

(红色和黄色曲线分别为探空测得的温度和露点廓线,对应的浅蓝色曲线为常规方法绘制的状态曲线,蓝色和低层黑色网状阴影分别表示常规 CAPE 和 CIN。经过环境和气块虚温曲线分别用浅蓝色和桃红色曲线表示,订正后的 CAPE 和 CIN 面积用桃红色和浅绿色阴影表示,特征高度也在图右侧标注,下标 v 代表用了虚温订正)

Fig. 3 The skew $T\text{-}\ln p$ of Nanjing (58238) at 20:00 BT 14 June 2005 drawn by GRADS
(The main difference between above two figures is the integral starting point is different)
(a) the LFC changed, (b) the LFC unchanged

(Red and yellow lines are the environmental temperature and dew point temperature profiles, respectively; blue and lower black shaded areas are the CAPE and CIN without virtual temperature correction; light blue and pink lines are temperature profiles of environment and air parcel using revised method; the pink and green areas mean CAPE and CIN using revised method; the important levels such as LFC, EL and LCL are labeled on the right side of the plot, and these labeled v indicates revised ones)

表 1 利用不同的 CAPE 计算方法得到的 2005 年 6 月 14 日 20 时南京探空主要对流参数
Table 1 Main convective parameters according to Nanjing sounding at 20:00 BT 14 June 2005 using different CAPE calculation methods

特征量及单位	MICAPS 无虚 温订正	MICAPS 虚温订正 (LFC 不变)	GRADS 无虚 温订正	GRADS 虚温订正 (LFC 变化)	GRADS 虚温订正 (LFC 不变)
CAPE/ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$	1358.5	1328.9	1563.5	1746.7	1734.5
$p_{\text{LCL}}/\text{hPa}$	889	889	889	889	889
$p_{\text{LFC}}/\text{hPa}$	679.3	679.3	683.6	716.5	683.6
p_{EL}/hPa	225.3	225.3	215.3	215.1	215.3

注:MICAPS 无虚温订正的 $T\text{-}\ln p$ 图中有特征高度输出(如图 2),而有虚温订正只输出 CAPE 值,无特征高度输出值。表中 MICAPS 虚温订正(LFC 不变)的特征高度是从 MICAPS 源程序中确定的

前面我们提到,很多软件(包括 MICAPS 和 GRADS),在计算虚温订正 CAPE 时,采用的积分上下限 LFC 和 EL 的高度与计算常规 CAPE 时一样。那么 LFC 变与不变会造成 CAPE 数值上有多大的变化呢?利用 GRADS 软件,通过计算 LFC 不变时的虚温订正 CAPE(见表 1),发现 CAPE 由 $1746.7 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 降低为 $1734.5 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,减少了 $12.2 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。虽然考虑了 LFC 变化的虚温订正 CAPE 与 LFC 不变得到的虚温订正 CAPE 相比增加值并不是太多,但是比较图 3 可以看到,它在图形上的表示更加合理,可以确保 LFC 的高度是气块虚温与环境虚温之差由负值转为正值的转折点高度,物理意义更加清晰。

3 结论和讨论

MICAPS 和 GRADS 是预报员常用的两种用来计算某地 CAPE 大小的软件。但是目前两种软件在计算虚温订正 CAPE 时,都没有考虑 LFC 的变化。本文从理论分析和实例计算来说明虚温订正 CAPE 的正确求解方法,得到了以下结论:

(1) MICAPS 虚温订正 CAPE 的求算方法存在原则错误。从理论角度可以证明,考虑虚温订正后,LFC 会降低,而 EL 基本不变。在一般情况下,考虑 LFC 降低计算的虚温订正 CAPE 会比采用 LFC 不变的虚温订正 CAPE 大。

(2) 尽管实例分析表明,考虑了 LFC 变化的虚温订正 CAPE 比起 LFC 不变得到的 CAPE 增加并不是太多,但是它在图形上的表示更加合理,物理意义更加清晰。可以确保 LFC 的高度是气块虚温与环境虚温之差由负值转正值的转折点高度。

(3) 目前很多省在利用一些对流参数来开展统计研究,CAPE 的计算偏差会影响阈值选取的准确性。在使用过程中不但要注意到虚温订正 CAPE 计算中 LFC 高度是否改变,同时还要注意抬升气块取法等信息。

致谢:本文写作过程中恰逢 Doswell 先生来气象干部培训学院讲学,就虚温订正 CAPE 的求算方法问题与之进行了讨论,在此表示谢意!

参考文献

- 陈子通,闫敬华,苏耀辉. 2006. 模式探空的评估分析及其在强对流天气预报中的应用研究. 大气科学, 30(2): 235-247.
- 冯民学,周俊驰,曾明剑,等. 2012. 基于对流参数的洋口港地区雷暴预报方法研究. 气象, 38(12): 1515-1522.
- 李娜,冉令坤,孙建华,等. 2015. 基于 NCEP/GFS 资料的中国东部地

- 区雷暴预报研究. 气象学报, 73(3): 459-470.
- 李耀东,刘健文,高守亭. 2004. 动力和能量参数在强对流天气预报中的应用研究. 气象学报, 62(4): 401-409.
- 李耀东,刘健文,刘玉玲,等. 1998. 埃玛图微机制作和对流有效位能计算. 气象, 24(5): 23-27.
- 李云静,张建春,王捷纯,等. 2013. 一次冷涡背景下强对流不稳定条件的成因分析. 气象, 39(2): 210-217.
- 雷蕾,孙继松,王国荣,等. 2012. 基于中尺度数值模式快速循环系统的强对流天气分类概率预报试验. 气象学报, 70(4): 752-765.
- 林新彬,刘爱鸣,林毅,等. 2013. 福建省天气预报技术手册. 北京: 气象出版社, 400.
- 刘健文,郭虎,李耀东,等. 2005. 天气分析预报物理量计算基础. 气象出版社, 253.
- 王秀明,俞小鼎,朱禾. 2012. NCEP 再分析资料在强对流环境分析中的应用. 应用气象学报, 23(2): 139-146.
- 王镇铭,杜惠良,杨诗芳. 2013. 浙江省天气预报技术手册. 气象出版社, 459.
- 魏东,孙继松,雷蕾,等. 2011. 三种探空资料在各类强对流天气中的应用对比分析. 气象, 37(4): 412-422.
- 叶爱芬,伍志方,肖伟军,等. 2006. 对流有效位能在强对流预报中的应用研究. 热带气象学报, 22(5): 484-490.
- 张建春,王海霞,陶祖钰. 2014. 对流有效位能预报能力的统计分析. 暴雨灾害, 33(3): 290-296.
- 赵玉春,王叶红,崔春光. 2011. 大对流有效位能和条件不稳定下地形降水的三维理想数值研究. 气象学报, 69(5): 782-798.
- 郑媛媛,张备,王啸华,等. 2015. 台风龙卷的环境背景和雷达回波结构分析. 气象, 41(8): 942-952.
- Adams D K, Souza E P. 2009. CAPE and convective events in the southwest during the North American monsoon. Mon Wea Rev, 137(1): 83-98.
- Barkidija S, Fuchs Z. 2013. Precipitation correlation between convective available potential energy, convective inhibition and saturation fraction in middle latitudes. Atmos Res, 124: 170-180.
- Craven J P, Jewell R E, Brooks H E. 2002. Comparison between observed convective cloud-base heights and lifting condensation level for two different lifted parcels. Wea Forecasting, 17(4): 885-890.
- Doswell C A, Markowski P M. 2004. Is buoyancy a relative quantity? Mon Wea Rev, 132(4): 853-863.
- Doswell C A, Rasmussen E N. 1994. The effect of neglecting the virtual temperature correction on CAPE calculations. Wea Forecasting, 9(4): 625-629.
- Molinari J, Roms D M, Vollaro D, et al. 2012. CAPE in Tropical Cyclones. J Atmos Sci, 69(8): 2452-2463.
- Riemann-Campe K, Fraedrich K, Lunkeit F. 2009. Global climatology of Convective Available Potential Energy (CAPE) and Convective Inhibition (CIN) in ERA-40 reanalysis. Atmos Res, 93: 534-545.
- Vasquez T. 2009. Severe storm forecasting. Weather Graphics Technologies, 262.
- Ye B, Delgenio A D, Lo K W. 1998. CAPE variations in the current climate and in a climate change. J Climate, 11(8): 1997-2015.