

用不稳定能量对稳定度的高分辨诊断

徐 宏 李 洪 勃

一、引言

近年来计算机及先进的通信设备在短时预报业务中的应用，提高了强对流天气的监测和短时预报服务的能力。而为进一步提高短时预报的准确率，研究和选择效果较好的分析预报方法，仍有重要的作用。在强对流天气短时预报中，大气层结条件是十分重要的。当前业务中使用的稳定度因子，是根据探空资料计算的。由于常规高空观测网中测站间的距离平均约400公里左右，观测时间间隔为12小时，这对分析生命史在几个小时左右的中尺度系统来说，其时间和空间分辨率都是不足的。为此，我们提出了用不稳定能量对稳定度的高分辨诊断方法。不稳定能量与雷暴的关系密切，这种方法用了地面观测网的资料参加计算，适于计算机使用，对于强对流天气发生和强度的预报是有帮助的。

二、各种稳定度因子与雷暴关系的统计结果

我们用计算机分析计算了北京1969—1978年7、8月08时共620次探空资料，得出许多稳定度因子，对它们与雷暴的关系作了比较试验。试验中雷暴的标准为当日12—21时内北京有雷暴。资料中雷暴日的气候概率为 $\frac{110}{620} = 17.7\%$ 。考虑到使用单位收到探空报告的时间，计算中地面资料取11时的记录。表1给出了漏报率为1/5时，一些稳定度因子的历史概率。这些因子包括：

表1 各种稳定度因子效果对照

指标名称	P _o	Δq ₅₀₀	P _{θsemin}	C	(T - T _d) ₁₀₀	A	θ _{se11}	Δθ _{semax}	K	Δθ _{se地-500}	S	KYI	S ⁵⁰⁰	W _m	Δt _m	E ⁵⁰⁰
概率	28	31	38	40	44	44	46	47	51	53	58	57	57	59	60	62

1. P_o 为抬升凝结高度上的气压。
 2. Δq₅₀₀ 为绝热上升过程中水的凝结量^[1]。
 3. P_{θsemin} 为探空曲线上假相当位温 θ_{se} 最小值的高度上的气压。
 4. C 为斯拉维指数^[2]。
 5. (T - T_d)₁₀₀ 为 990—900 毫巴间隔 10 毫巴共 10 层的温度露点差之和。
 6. A 指数^[3]。
 7. θ_{se11} 为地面 11 时的假相当位温值。
 8. Δθ_{semax} 为地面 θ_{se} 与探空上 θ_{se} 最小值之差。
 9. K 指数。
 10. Δθ_{se地-500} 为地面与 500 毫巴 θ_{se} 之差。
 11. S 为沙瓦特指数。
 12. KYI 为山崎指数^[4]。
 13. S⁵⁰⁰ 为修正的 S 指数，为自地面绝热上升到 500 毫巴与周围空气的温差。
 14. W_m 为载水湿绝热模式中之中最大垂直速度^[5]。
 15. Δt_m 为自地面绝热上升的空气在 200 毫巴以下与周围空气的最大温差。
 16. E⁵⁰⁰ 为自地面绝热上升的空气经过 850—500 毫巴层释放的不稳定能量。
- 由表1可见，在常用的稳定度因子中，沙瓦特指数 S 效果较好，而不稳定能量指标 E⁵⁰⁰ 的概率要比回 S、S⁵⁰⁰ 高 5—9%，后者只反映上升空气与周围空气在某层上的温差，而前者则反映了整层虚温差的情况。在

探空图解上后者对应一个线段，前者则对应一块面积。由于统计的样本比较大，概括率差别亦较显著，所以这一结果不能认为是偶然的。可见在强对流天气预报中使用不稳定能量指标是比较合适的。

三、计算不稳定能量的区域分布

绝热上升的气块经过气压 $P_1 - P_2$ ($P_1 > P_2$) 层释放的不稳定能量 E ：

$$E = -R_d \int_{P_1}^{P_2} (T_{vi} - T_{ve}) d \ln p \quad (1)$$

式中 R_d 为干空气的气体常数； T_{vi} 、 T_{ve} 分别为气块内、外的虚温。当前在强对流天气预报业务工作中，很少分析 E 。其原因有二，一是应用(1)式计算 E 需要包括标准层、特性点在内的完整探空资料。由于特性点与标准层资料分别发报，特性点资料发报较晚，给计算工作带来不便，时效也受到影响。二是根据(1)式计算 E 需要逐层求出 T_{vi} 、 T_{ve} 后进行积分，比较不方便。为此我们提出了用位势厚度差方法^{[6][7]}。

$$E = g_0 (\Delta H_s - \Delta H) \quad (2)$$

式中 $g_0 = 9.80665$ 焦耳/千克·位势米； ΔH 为 $P_1 - P_2$ 气层中的位势厚度：

$$\Delta H_s = -\frac{R_d}{g_0} \int_{P_1}^{P_2} T_{vi} d \ln p$$

称为绝热位势厚度。在 P_1 、 P_2 一定时， ΔH_s 是上升空气的初始状态气压、温度、露点的函数，也就是 θse 的函数。我们曾制作了 ΔH_s 的查算表，使业务工作中手工计算 E 变得可行。

ΔH_s 是 θse 的函数。为了便于计算机计算，我们用插值多项式^[8]，代替查算表。设

$A(\theta se) = a_0 + a_1 \theta se + a_2 \theta se^2 + \dots + a_n \theta se^n$

多项式中系数 $a_0, a_1, a_2, \dots, a_n$ 可以通过解 $n+1$ 元的线性方程组得到。我们计算 $n=2, 3, 4, 5, 6$ 五种情况，对于一定的 P_1, P_2 ，得到 35 个多项式。将多项式 $A(\theta se)$ 的计算值与查表值对比，计算最大距离

$$S = \max_{2 \leq i \leq n} |\Delta H_s - A(\theta se)_i|.$$

我们看到 S 并不随多项式的次数 n 增

加而减小，于是取 S 为最小的多项式作为最佳逼近多项式，结果表明均以 $n=3$ 时效果最好。最大误差 $S < 1.5$ 位势米。下面分别给出了 $\Delta H_{850-500}$ 、 $\Delta H_{850-400}$ 、 $\Delta H_{850-300}$ 相应的最佳逼近多项式及其 S 值，

$$\left. \begin{aligned} A(\theta se)_{850-500} &= -9995 + 102.76 \theta se - \\ &\quad 0.2493 \theta se^2 + 0.000209 \theta se^3, S = 0.94 \\ A(\theta se)_{850-400} &= -13064 + 132.34 \theta se - \\ &\quad 0.3085 \theta se^2 + 0.0002488 \theta se^3, S = 1.13 \\ A(\theta se)_{850-300} &= -13998 + 141.886 \theta se - \\ &\quad 0.30023 \theta se^2 + 0.0002187 \theta se^3, S = 1.47 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$309K < \theta se < 386K$$

式中 θse 的取值范围可以满足诊断强对流天气产生的需要。误差 S 在高空观测误差范围内。因此，可以用(3)式替代 ΔH_s ，参加(2)式的计算。

在利用计算机内插厚度时，可以根据探空站上的厚度，求出拟合 ΔH 的曲面， $B(x, y)$ ，其中 x, y 为测站的坐标，实际工作中，可根据最小二乘法原理，用一次曲面拟合法或二次曲面拟合法求 $B(x, y)$ 。

$$B(x, y) = b_0 + b_1 x + b_2 y \quad (4)$$

$$\text{或 } B(x, y) = b_0 + b_1 x + b_2 y + b_3 xy + b_4 x^2 + b_5 y^2. \quad (4')$$

一次曲面拟合中有三个待定系数，至少需要 3 个以上的厚度记录，相应二次曲面拟合中，则需要 6 个以上的厚度记录。前者适于分析地区小、测站少的情况，得到的是梯度均匀的厚度分布，后者适于分析范围大，测站多的情况，可以获得厚度槽或脊的分布特征。在得到拟合曲面(4)式后，就可以根据地面测站的坐标 (x, y) 值，得到相应 $B(x, y)$ 值。

我们利用华东中尺度试验探空网的资料，对二次曲面拟合厚度作了检验。在华东 7 个常规探空站（徐州、射阳、阜阳、南京、安庆、杭州、上海）区域内加密了 20 余个站，取得水平距离约 90 公里的探空资料。1982 年 5 月 30 日 08 时在该区域有 29 个探空记录。400—850 毫巴厚度拟合值的均方差为 10.9 位势米，在 1982 年 6 月 17 日 08 时，区域内得到 24 次探空记录，均方差为 10.1

位势米。分析表明，造成这一差别的原因，一是由于较密的探空资料反映出了某些中尺度扰动；其次是探空资料的观测误差。对于后者，目前无线电探空计算的400—850毫巴厚度误差有时可达12位势米以上^[9]。可见，用二次曲面拟合方法来反映常规探空站间的厚度场是可以的。

根据(3)、(4)式，将(2)式改写成

$E \approx g_0 [A(\theta_{se})_{P_1-P_2} - B(x, y)_{P_1-P_2}]$ (5)

应用(5)式计算E时，首先选择分析计算范围，确定测站的坐标(x, y)，选取适当的层次P₁、P₂；其次根据厚度记录用曲面拟合法确定(4)或(4')式中的系数；再根据测站地面的气压、温度、露点资料，求出各站的θ_{se}值，代入(3)式算出A(θ_{se})_{P₁-P₂}最后在各地面测站的位置上，求出相应的E值，从而得到E的水平分布。

四、不稳定能量的高分辨的分析

下面以1982年6月17日和5月30日在苏皖及苏浙地区产生的两次强对流天气过程，说明不稳定能量的分布。我们取徐州、射阳、阜阳、南京、上海、安庆、杭州7个常规探空站850—400毫巴的厚度ΔH₈₅₀₋₄₀₀和相应地区地面测站网的资料。用上述方法算出了6月17日08时的E分布(图1)。

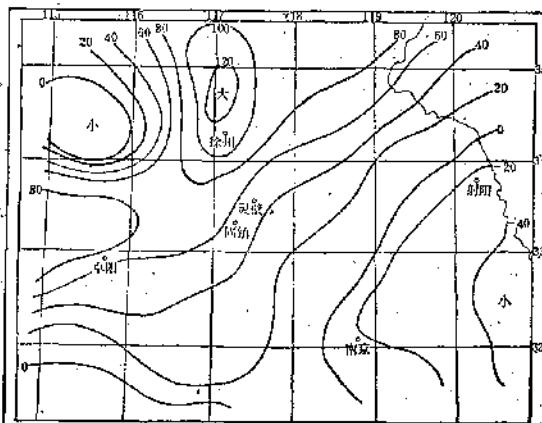


图1 拟合法计算的1982年6月17日08时的E分布

单位：9.8焦耳·千克⁻³(下同)

2为根据这期间中尺度观测试验取得的水平距离约90公里的探空资料，计算的E水平分布。可以看出，两种方法得到的E分布，除边远地区外，分布形态和中心位置都基本一致(边远地区的差异主要决定于探空站选取的范围)。可见本文所述的方法是可行的。

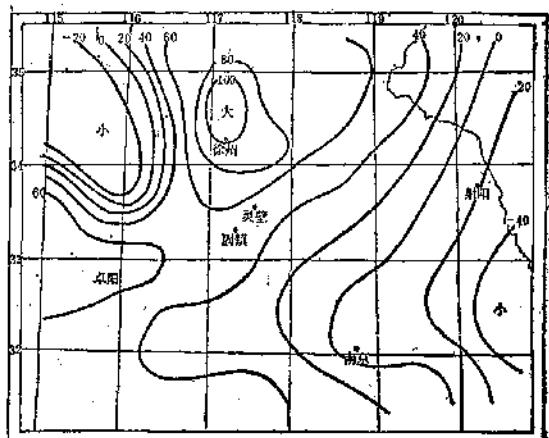


图2 加密探空站计算的1982年6月17日08时的E分布

在图1的西北及东南侧有两个E小值区，两区之间为E大值区，正的不稳定能量中心在徐州以北地区。下午雷暴天气首先在徐州以北附近形成。而在E<0的地区当天基本上没有出现雷暴天气。对流天气形成后，逐渐南移，下午17⁴⁰前后在灵壁、固镇附近达到最强，出现了冰雹大风天气。图3是当

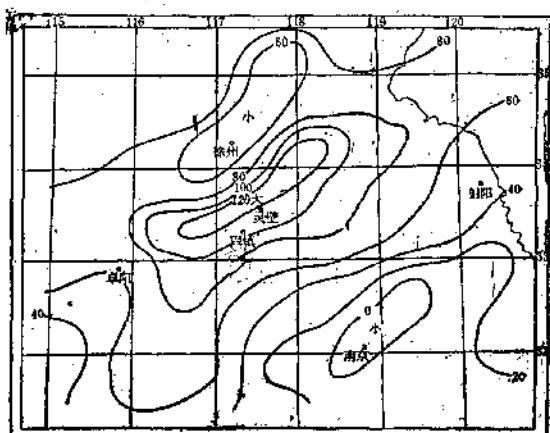


图3 1982年6月17日17时的E分布

天 17 时的 E 分布。E 的正值中心正移到灵壁附近，这一地区恰好处于四周探空站的中间。如果仅以探空站的资料计算，徐州已处于小值中心，前方南京的为负值，得不到如图所示的东北、西南向的 E 大值中心。也就不可能较准确地预报出强对流天气的强度及落区。

又如 1982 年 5 月 30 日从江苏盱眙、高邮向东南到杭州湾附近，从 11 时左右开始出现大片雷暴天气。下午在杭州湾附近出现了冰雹大风天气。这片地区基本上位于南京、射阳、上海、杭州四个探空站中间。由图 4 可知，这四个站本身 08 时 E 值并不太大，但在其中间有三块 E 大值区，其中二块对应着雷暴最活跃地区，而最南边一块正是强对流天气出现的地区。

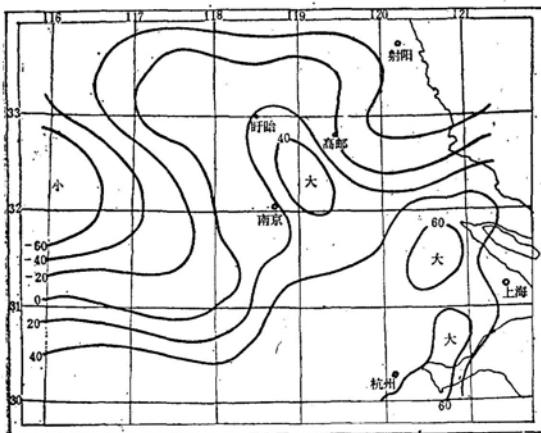


图 4 1982年 5 月 30 日 08 时的 E 分布

五、结语

观测表明，积雨云上升气流主要来自低层。因此，低层空气上升释放的不稳定能量的多少对强对流天气活动有重要影响。边界层内大气状态的水平分布是不均匀的。在实际业务工作中，我们只有水平尺度约 400 公里的探空网资料，密度比地面站疏得多。如用上述方法，利用地面观测网资料参加计算，可以得出分辨率较高的 E 的水平分布，提高了不稳定能量对稳定性水平分布诊断的分辨

率。这种方法便于在微机或袖珍机上进行，对分析预报暴雨、强对流天气是有利的。

参考文献

- [1] 雷雨顺等，冰雹概论，科学出版社，1978。
- [2] 梁必骐等，天气学，中央气象局科技处组织出版，1980。
- [3] Оатеев, А. В., Об использовании некоторых индексов для прогноза гроз, Мет. и Гид. Ио. 2, 1968.
- [4] 山崎孝治，对流 3 条件上 K. Y. Index—大雨予想の一方法，研究时报，27 卷，347—352，1975。
- [5] Chisholm, A. J., Alberta hailstorms, AMS, 1973.
- [6] 李洪勤，分析不稳定能量水平分布的一种方法，气象，1982, 9。
- [7] 李洪勤，计算不稳定能量的一种新方法，北方天气文集，3, 1982。
- [8] Hornbeck, 数值方法（中译本），中国铁道出版社，1982。
- [9] 丁一汇，现代天气学中的诊断分析方法，28—29，大气物理研究所，1984。

国家气象局科教司 气象出版社
《中国气象》编辑部 《气象知识》编辑部
联合举办“学气象竞赛”活动

气象出版社和中国气象学会共同组织编辑出版的《气象知识丛书》是一套系统地介绍气象科学各分支基本理论和基础知识的科普读物。这套丛书内容丰富、取材新颖，有助于满足广大青年、中小学教师、气象爱好者以及各行各业的科技人员在四化建设中对气象知识的需求。

为了推动气象知识的普及，帮助广大读者，特别是气象部门未经专业培训的业务人员和城乡知识青年获得较系统的气象科学知识，鼓励大家学气象、用气象、爱气象，促进我国气象事业的发展和社会主义的四化建设，国家气象局科教司、气象出版社、《中国气象》编辑部、《气象知识》编辑部决定以这套丛书和《气象知识》杂志为内容，联合举办两期“学气象竞赛”活动。具体办法请见《气象知识》1985 年第 3 期及《中国气象》1985 年第 6 期。