

大气稳定度指数ZI及其在对流性 天气预报中的应用

周 军 次旺晋美

(西藏自治区气象局)

提 要

本文设计一个便于计算的新大气稳定度指数ZI, 讨论了它的热力学含义和动力学特征以及对对流性天气过程的指示意义, 提出一种预报对流性天气的方法。并结合近两年华东地区的4次强对流天气过程, 证明这种预报方法有一定的实用价值。

在强对流天气的业务预报工作中, 各地形成了大致相同的预报思路和操作流程^[1-3], 多数流程包括: 1) 稳定度状况的分析, 主要分析预报区及上游临近地区的稳定度状况。2) 环流形势和影响系统的分析, 分析在具备一定的稳定度条件以后, 是否存在有利的触发条件(系统), 和有利于强风暴云生存的环境风场垂直切变形式。

稳定度状况分析, 过去多结合高低空冷暖平流的分析来实现。近年来随着预报工作的深入和气象台站计算条件的改善, 已经越来越注重稳定度指数的实际计算, 因为更具体的稳定度数值, 对确定强对流天气性质有较大的帮助。

表示大气稳定度的判据(指数)有许多种, 归纳起来不外乎静力和位势稳定度两种。在对流性天气的研究和预报中, 主要使用位势不稳定度判据。它是一种潜在的不稳定状况, 只有当整层空气抬升达到饱和以后, 才能表现出来。因此这类判据必须考虑气块的温度和湿度。常用来计算分析的位势不稳定度判据有沙瓦特指数SI、K指数、静力总温度T。以及相当位温 θ_e 随高度的变化等。尽管各种指数对强对流天气的预报效果大致相同^[1], 但在实际工作中, 对所用的指数还是讲究选择的, 因为即使效果大致相同, 对指数的求取还有方便、客观与否的问题, 且各指数的物理含义和预报效果多少还有区别。

现有的稳定度指数, 多数属于温湿特征参量, 用以预报强对流天气时, 还必须结合动力学条件(环流形势和影响系统), 才能得到较满意的结果。要是能寻找一个新的稳定度指数, 既具有清楚的热力学含义, 其分布状况又具有一定的动力学意义, 则对综合考虑预报结果, 定会产生积极的效果。

为此, 我们设计了新的稳定度指数ZI, 并讨论其热力学含义和动力学特点, 最后结合几次强对流天气过程, 分析和验证了它对这类天气过程的预报指示意义。

一、ZI指数的定义及热力学含义

稳定度指数ZI定义为

$$ZI = T_{500} - \theta_{e850}^{500} \quad (1)$$

其中, T_{500} 为测站上空500hPa层上的气温, 也可视为500hPa层上的环境大气当参考气压取为500hPa时的位温 θ_{500}^{500} 。 θ_{e850}^{500} 为同一测站上空850hPa高度上的湿空气块的相当位温(该相当位温的参考气压是500hPa)。

所以, 稳定度指数ZI实际上是500hPa高度上环境大气的温度, 与850hPa高度上的湿空气块上升到500hPa高度时所具有的相当位温之差。也可理解为500hPa高度上环境大气的位温与850hPa高度上湿空气块的相当位温之差(两者的参考气压均取500hPa)。

为此ZI指数也可定义为

$$ZI = \theta_{500}^{500} - \theta_{e850}^{500} \quad (2)$$

根据气块在垂直方向上受力的分析, ZI指数对层结稳定与否的判据应为

$$\begin{array}{ll} ZI > 0 & \text{稳定} \\ = 0 & \text{中性} \\ < 0 & \text{不稳定} \end{array} \quad (3)$$

二、影响ZI值的因子及有关计算

由(1)式可知, 影响ZI值的因子之一是500hPa层上的环境温度 T_{500} , 之二是 θ_{e850}^{500} 。 θ_{e850}^{500} 由4个因素决定: 湿空气块在850hPa等压面上时所具有的气压(850hPa); 气块的温度(T_{85}); 气块的露点温度(T_{d85}); 以及该气块上升到500hPa高度时所具有的气压(500hPa)。后者就是相当位温计算时取的参考气压值。由于气块在850hPa高度上的气压值和参考气压值在计算中均为固定, 从这个意义上讲, θ_{e850}^{500} 只决定于气块在850hPa高度上时所具有的温度 T_{85} 和露点 T_{d85} , 因此ZI指数计算过程中的可变因子是3个: T_{500} 、 T_{85} 和 T_{d85} 。

据相当位温定义, θ_{e850}^{500} 的表达式是

$$\theta_{e850}^{500} = \theta_{850}^{500} \exp \left[\frac{L \cdot q_{85}}{c_p T_L} \right] \quad (4)$$

这里, c_p 是定压比热, 一般取 0.24。

$$L \text{ 是凝结潜热, } L = 597.3 - 0.566t \quad (5)$$

T_L 是 850hPa 层上气块的抬升凝结温度, 其值决定于 T_{85} 和 T_{d85} , 可用迭代法求得*。

q_{85} 是 850hPa 高度上气块所含的比湿

$$q_{85} = 0.622E_{85}/(850 - 0.378E_{85}) \quad (6)$$

此处, E_{85} 是 850hPa 高度上湿空气块的绝对湿度, 可用 T_{d85} 求得^[4]

$$E_{85} = 6.1078 \exp \left[\frac{17.2693882t_{d85}}{t_{d85} + 273.16 - 35.86} \right] \quad (7)$$

θ_{850}^{500} 是 850hPa 高度上湿空气块的位温 (参考气压为 500hPa)

$$\theta_{850}^{500} = (273.16 + t_{85}) \left(\frac{500}{850} \right)^{0.286} \quad (8)$$

(5) 式中的 t 是气块凝结过程中的温度, 计算时可取 850hPa 层上气块的抬升凝结温度 T_L 与 500hPa 层上环境温度的平均值。

三、ZI 指数与其他稳定度指数的比较

沙氏指数 ($SI = T_{500} - T'_{500}$) 是热力学含义清楚、在对流性天气研究和业务预报工作中使用很广泛的稳定度指数。它表示 850hPa 层上的湿空气块先按干绝热过程上升到凝结高度, 再按湿绝热过程上升到 500hPa 高度时, 气块所具有的温度与实际环境大气温度的差异。SI 指数实际上认为湿空气块上升到 500hPa 高度时水汽没有全部凝结完毕, 原气块中所含有的水汽潜热也未全部释放转变为气块的视温度。

ZI 指数则表示 850hPa 高度上的湿空气块上升到 500hPa 高度时, 假设所含的水汽已经全部凝结, 气块所含水汽潜热已全部释放用于气块自身的增温, 这时气块所具有的温度与环境大气温度的差异。

因此, SI 与 ZI 两指数在考虑问题时有其类同点: 都取 850hPa 高度上的湿空气块作为考虑大气稳定度的主要对象; 在气块上升过程中, 均考虑了抬升凝结高度以下的干绝热变温过程和抬升凝结高度以上的湿绝热变温过程; 都考虑了上升到 500hPa 高度时气块温度与环境大气温度的差异; 而且求算 SI 时所用的因子和计算 ZI 值的也完全一样。但在考虑水汽是否全部凝结完毕, 潜热是否全部释放用以气块温度的变化这一点上, 则有一定的差别。图 1 是 $T-\ln p$ 的示意图, 图中表示了 T'_{500} 与 θ_{850}^{500} 的差别, 因此也反映了 SI 与 ZI 的差别。照两种指数的定义, SI 指数对指示气块上升到 500hPa 时所受的浮力更加确切一些, ZI 指数表示的浮力有些夸大, 但文献[5]指出, 降水区内云中水汽的凝结

*周 军, 温湿特征参量的计算, 天气学诊断讲义, 22—45

过程,主要集中在700—500hPa之间。可以认为任何高度上的气块上升到500hPa高度时,其内部所含的汽态水分已经不多,因此 T'_{500} 与 θ_{850}^{500} 间的差别不会很大,又由于两者

影响因子相同,所以SI和ZI应有大致接近的值和很好的正相关关系。

图2是某次过程中,用公式1和4—8算出的ZI值与用人工方法在T-lnp图上查出的SI值之间的相关分布图。为避免SI值查算中

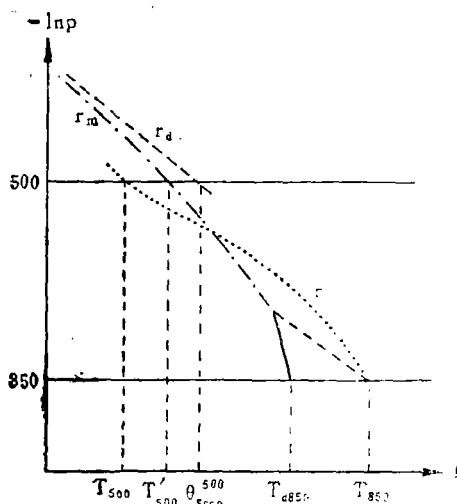


图1 T'_{500} 与 θ_{850}^{500} 在T-lnp图上数值差示意图

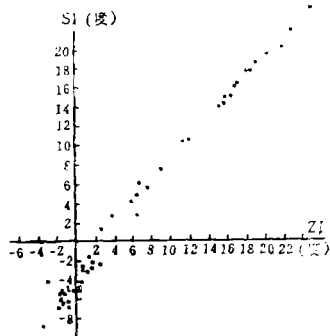


图2 ZI与SI值的相关分布图

出现的人为差异,图中的SI值是分别由两人查算以后所得结果的平均值。从图2可以看出,ZI与SI间大致呈正的线性相关,总的说来这种关系在层结稳定时较好,相关线附近点子比较集中,稳定度较差时点子比较分散。同一个ZI值对应的SI值可以相差2—3℃,说明如果SI求算不准,会给确定对流性天气的性质造成影响。用最小二乘法求得的两者的线性关系为

$$ZI = 1.17014SI - 3.10672 \quad (9)$$

沙氏指数以往常在T-lnp图上查算,或者用查表的办法求得^[6],两种办法均遇到反复内插和用线性插值求取非线性变化的 T'_{500} 的问题,费时费神查取结果又因人而异,业务工作中很不方便。若用微机计算, r_s 曲线需逐层求取*,dq取值较小时,计算步骤增加,计算速度变慢;dq取值较大时,又影响 T'_{500} 的精度。且在物理过程的考虑上与气块上升时降压、凝结、变温同时发生的真实情况有较大出入*。ZI值的求取比较简单,在求出抬升凝结温度 T_L 后经一步计算可直接求出 θ_{850}^{500} ,若将通讯机与微机连接,可迅速获得大范围ZI值的平面分布。而且ZI指数分布图既反映大气稳定度水平分布特征,也反映了某些天气系统的位置和强度,具有一定的动力学含义,因此用ZI指数作对流性天气预报,有较高的实用价值。

*南京气象学院大气物理教研室,大气物理讲义

四、ZI指数密集带的动力学特征

在稳定度指数的平面分布图上, 常常有等值线密集带出现, 常称为能量锋。平时温湿要素场上的锋面, 是温湿要素空间分布的突变区, 也是能量空间分布不连续的地方。因此稳定度指数的密集带, 也应与温湿场上的锋面有内在的联系。由于各个稳定度指数的定义不同, 其等值线密集带与锋面之间内在联系的方式也不同。下面讨论ZI指数密集带与大气锋之间的特殊关系。

在图3所示的锋面坐标系中, ZI指数在与锋面垂直方向上的变化率可表示为

$$\frac{\partial}{\partial n}(ZI) = \frac{\partial T_{500}}{\partial n} - \frac{\partial \theta_{e850}^{500}}{\partial n}$$

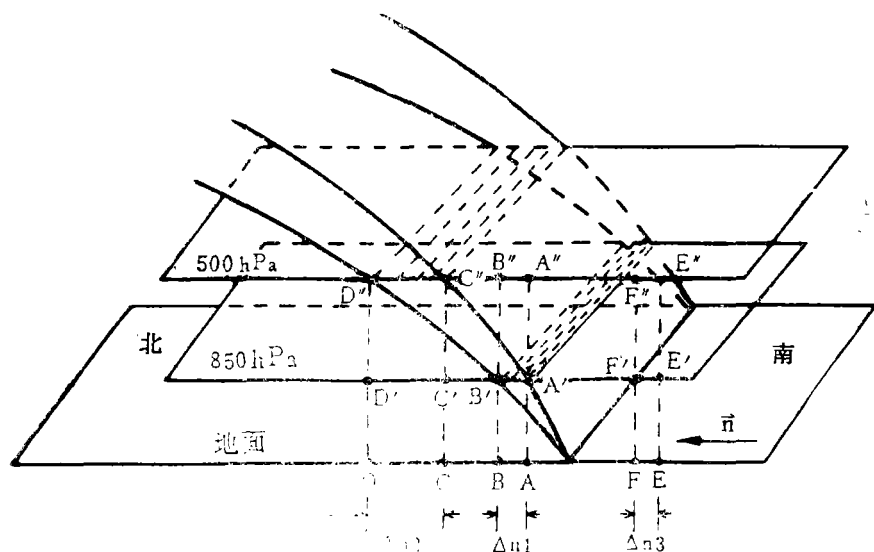


图3 ZI指数在垂直于锋面方向上的变化率示意图

对于AB、CD、EF各段, 上式可分别写成

$$\frac{\partial}{\partial n}(ZI)_{AB} \approx \frac{1}{\Delta n_1}(T_{B''} - T_{A''}) - \frac{1}{\Delta n_1}(\theta_{eB'} - \theta_{eA'})_{850}^{500} \quad (10)$$

$$\frac{\partial}{\partial n}(ZI)_{CD} \approx \frac{1}{\Delta n_2}(T_{D''} - T_{C''}) - \frac{1}{\Delta n_2}(\theta_{eD'} - \theta_{eC'})_{850}^{500} \quad (11)$$

$$\frac{\partial}{\partial n}(ZI)_{EF} \approx \frac{1}{\Delta n_3}(T_{F''} - T_{E''}) - \frac{1}{\Delta n_3}(\theta_{eF'} - \theta_{eE'})_{850}^{500} \quad (12)$$

比较上述三个等式右端第一项的情况, 它们分别表示500hPa等压面上不同部位的温度梯度值。在(10)式右端第一项中, 由于A''、B''均处于500hPa等压面上锋区前方的暖气团中, 两点间的水平温度梯度绝对值要比该等压面上锋区两侧C''D''之间小一个量

级, 所以(10)式右端第一项相对于(11)式右端第一项是个小量。同样(12)式右端第一项也是个小量。

若将锋面附近的热力学性质差异用温湿特征参量 θ_e 来表示, 由于锋区中 θ_e 的水平梯度绝对值要比锋区两侧气团中的大一个量级, 所以(11)式和(12)式右端第二项相对于(10)式右端第二项也是小项。

由于大气锋区越到高空越宽, 而锋的上下界面基本上是等熵面, 又由于(11)式右端第一项未包含锋区两侧湿度的差异, (11)式右端第一项的绝对值比(10)式右端第二项也要小得多。因此, 当大气锋区坡度较小时, ZI平面分布图上有可能出现两条密集带。北边一条较稀, 与500hPa上的温度锋区相对应; 南边一条较密, 与850hPa上的温湿能量锋相对应。当大气锋区坡度较大时, 两条密集带衔接在一起, 靠暖区的部分对应着850hPa上的温湿能量锋, 这时密集带南界一般应对应850hPa上的大气锋的上界, 但在850hPa上的露点锋与温度锋位置不重合的局部地区, ZI密集带南界与大气温度锋上界的位置会有些差异。

在分析的4次华东春季强对流天气个例中, 均只见到一条ZI密集带, 说明对流性天气发生时, 锋面均较陡。且4例中ZI密集带南界与850hPa上温度锋上界一致(图略), 说明在春季对流性天气发生时, 温度锋两侧的湿度差异也很明显。为此ZI密集带南界附近必然是系统性上升运动明显存在和充分发展的地区, 也是实际风垂直切变十分显著的地区。系统性上升运动是形成对流性天气必要的触发机制, 很强的实际风垂直切变又是强风暴云系形成和发展的另一重要条件^[7], 因此ZI密集带具有明显的动力学特征, 从能量的角度看, 它又是湿斜压结构最明显的地带。为此它的位置和未来的移动状况, 对对流性天气的发生范围就具有很好的指示意义。

五、ZI指数对对流性天气的指示性

根据ZI指数的定义, $ZI < 0$ 的地区表示大气层结处于对流性不稳定的地区。因此对流

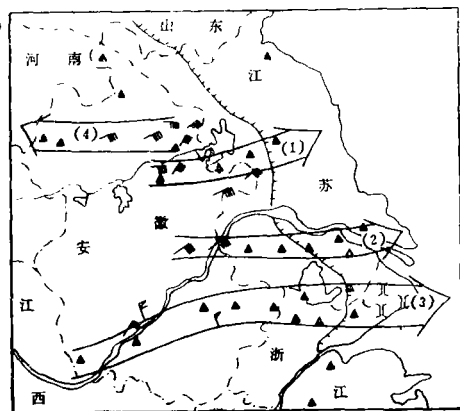


图4 1987年3月6日江苏、安徽、浙江、上海灾害性天气分布

性天气只会出现在ZI指数平面分布图上的负值区。根据近年来华东4次对流性天气过程实例的分析, 发现ZI指数的零等值线总出现在ZI密集带中(见图5)。并且随密集带位置一起变动。密集带形成后有两种变化形式, 一是向南移动, 另一种是向北推进或者就地减弱消失后在北方某地再次形成。当密集带向南移动时, 对流性天气就出现在密集带中零等值线扫过的大气层结不稳定的地区。其中零等值线扫过的ZI值小于-4的地区是冰雹、龙卷等恶劣天气最容易出现的地区。

图4是1987年3月6日发生在苏、皖、浙、沪4省市的一次强对流天气灾情分布图。图

中箭头分别表示相对独立的4个时段中灾害性天气的移向。据不完全统计,该过程中安徽省有20多个县市受雷暴大风和冰雹的袭击,江、浙两省分别有12个和8个县市出现雹灾,上海市郊县有12个乡镇受龙卷风袭击,死2人伤数10人。图中2、3两箭头表示重灾区域。

图5是这次过程前后ZI指数的分布状况。可见强对流天气的范围,在6日08时ZI零值线的南方,而7日08时在ZI零值线的北方。冰雹和龙卷风等恶劣的强对流天气,出现在6日08时ZI零值线扫过的范围内 $ZI < -4$ 的区域里。因此当ZI密集带已经形成,密集带及其中的ZI零值线未来位置的变化状况,就成了用ZI指数预报强对流天气落区和性质的关键。

ZI等值线密集带及其中零值线未来动态的预报,可以用一般的天气学方法进行。特别需要指出的是,目前大量的数值预报产品已经通过传真方式发给有关气象台站,为业务工作提供了较可靠的有关未来天气系统强度和位置的信息。传真图中有36小时的850hPa温度场预告图,对于了解未来850hPa等压面上锋区的位置,进而判断未来ZI密集带的动向提供了很好的依据。我们在1987和1988年春季华东地区4次对流性天气个例研究中发现,用当天08时ZI指数的分布实况,结合昨天的36小时850hPa温度场的预告,可以提前报出当天下午到夜间的对流性天气落区,大致确定对流性天气的强度(有关预报情况另行讨论)。预报模式如图5b所示,其中阴影区为对流性天气预报区,它位于当天08时ZI零值线之南,前一天20时850hPa 36小时温度场预告图上锋面上界之北。最可能出现冰雹、龙卷等恶劣天气的地方,在上述预告区中当天08时ZI值小于-4的地区内。

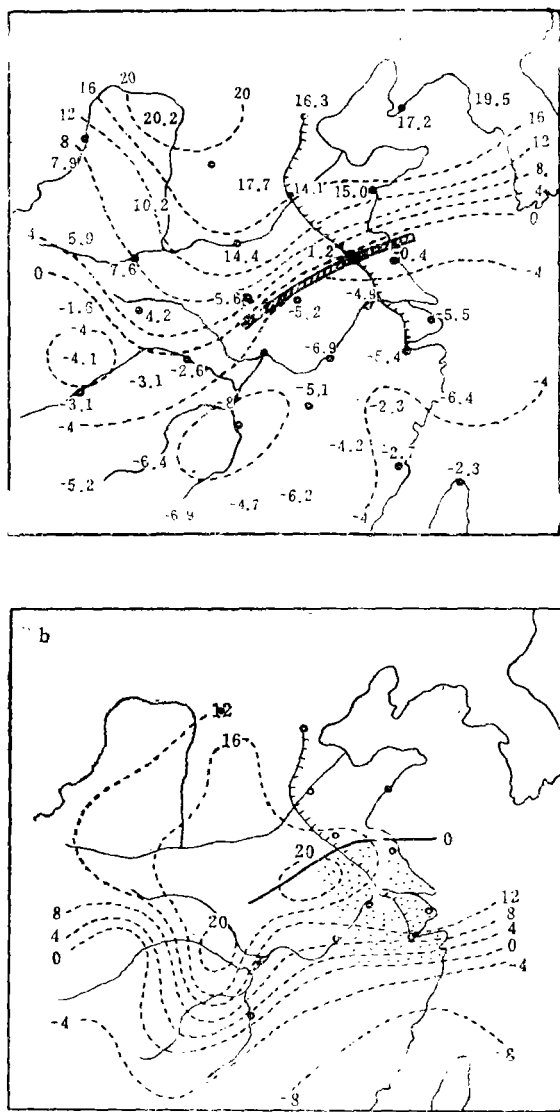


图5 ZI指数分布图 a. 3月6日08时
b. 3月7日08时(实线表6日08时
ZI零值线位置)

六、小 结

综上所述,归纳如下:

1. ZI指数是一个物理含义清楚,计算比较方便的稳定度指数。其平面分布图上的负值区是大气层结不稳定的区域。图上的密集带是一条能量锋,是湿斜压结构最明显的地方,它的南界与850hPa上温度锋上界有较好的对应关系。因此密集带南界附近有明显的上升运动和实际风的垂直切变。ZI密集带具有明显的动力学含义,其附近是对流性天气发生发展的理想场所,其所处的空间位置对对流性天气的预报有较好的指示作用。ZI图同时反映大气的热力和动力分布特征,是一种较理想的对流性天气预报图。

2. 对流性天气发生在ZI密集带南移过程中,具体落区出现在密集带中零值线的初始和终止位置之间,冰雹、龙卷等天气则出现在上述落区中ZI初始值小于-4的区域内。

3. ZI密集带的移动可用天气学方法预报,数值预报产品中提供的未来36小时850hPa锋面位置,可作为ZI密集带未来预报位置的重要参考。这一点也是定义ZI指数并用来预报对流性天气的一个优点。

4. 上述预报指标是从华东4次春季对流性天气实例中总结而得的,都是冷锋存在的情况,对于其他季节和地区,或者冷锋不清楚的过程尚无实践,有待进一步研究。

参 考 文 献

- [1] 游景炎,华北雹暴发生条件及预报问题,强对流天气文集,1—7,气象出版社,1983。
- [2] 林一北、宋阳生,甘肃省雹暴的分类及其诊断分析,强对流天气文集,15—24,气象出版社,1983。
- [3] 陈忠敏、吴哲明等,强对流天气,江苏省重要天气分析和预报,105—136,气象出版社,1988。
- [4] 中央气象局科技情报研究所,能量天气分析资料附刊,气象科技,1977。
- [5] 朱乾根、周 军,暴雨的水汽源地,华南前汛期暴雨文集,136—142,气象出版社,1981。
- [6] 朱乾根等,天气学原理和方法,气象出版社,1981。
- [7] 李吉帆、田春生,北京地区强对流天气环境风垂直分布的一些统计特征,强对流天气文集,149—152,气象出版社,1983。

STABILITY INDEX ZI AND ITS APPLICATION IN THE FORECASTING OF CONVECTIVE EVENTS

Zhou Jun Ci Wang Jin Mei*

ABSTRACT

In this paper a new stability index ZI is designed for convenience of calculation. Its thermodynamic implication, dynamic feature and indicative significance to the convective weather process are discussed. A method of convective weather forecasting is thus given, which is proved to be of practical value in the four severe weather occurrences in East China in recent two years.

*Affiliated with the Weather Bureau of the Xizang Autonomous Region