

对流参数在强对流天气潜势预测中的作用

刘玉玲^{1,2}

(1 北京大学物理学院,北京 100871)

(2 空军第七研究所,北京 100085)

摘要 文章结合强对流天气发生发展的物理机制,介绍了与浮力能和风切变有关的几个对流参数的物理概念和计算方法,并结合具体个例分析了这些参数在强对流天气潜势预测中的作用。

关键词 强对流天气预报 对流参数 不稳定能 风切变

引言

强对流天气包括雷暴大风、下击暴流、冰雹、龙卷和强雷雨(局地短时降水或持续性暴雨的一部分)等中小尺度天气现象,其分析和预报历来是气象业务的难点。近年来,由于观测、探测手段的进步和数值模拟试验的发展,人们对强对流天气现象的认识不断深入,预报方法从以经验为主转变到强调物理过程,并且认识到预报的改进需要着眼于中尺度过程的作用,同时,进一步认识到急流对强对流发展的重要作用。

Doswell 等^[1]认为,龙卷的业务预报包括两部分:对风暴环境中龙卷潜势的预测以及一些风暴发展时对龙卷的识别。这两部分预报、观测过程同样适用于破坏性风和冰雹。美国强局地风暴室(SELS)使用的预报过程是:参数估计、图形识别和气候(学)特征。目前,由于数值模式的发展、观测和探测产品的丰富以及人们对一些对流参数认识的不断加深,参数估计逐渐成为预报强天气潜势的基础。

一次明显的强对流天气过程的成功预报,一般为对相关的天气型并结合一些相关物理参数大小来进行预测。如果这些参数达到了一定的阈值范围,那么,将可以预测这一潜在的事件。沙氏指数、抬升指数等都是预报员常用的物理参数。近年来,通过大量的观测研究,特别是由于数值模拟的广泛使用,人们对强对流天气发生发展的物理机制有了更为深

入的了解,并在业务预报中引入了许多新的物理参数,如对流有效位能(CAPE)^[2]、下沉对流有效位能(DCAPE)、相对螺旋度(SREH)、垂直切变和稳定度的组合指数粗理查逊数(BRN)、能量螺旋度指数(EHI),以及与下击暴流潜势有关的大风指数(WINDEX),与预报风暴强度有关的风暴强度指数(SSI)等。本文着重介绍与浮力能和风切变有关的几个参数,并结合个例进行分析。

1 参数分析

1.1 对流有效位能 CAPE

当气块的重力与浮力不相等且浮力大于重力时,一部分位能可以释放,由于这部分能量对大气对流有着积极的作用,并可转化成大气动能,故称其为对流有效位能。其表达式为:

$$CAPE = \int_{z_f}^{z_c} \frac{1}{T_{ve}} (T_{va} - T_{ve}) dz \quad (1)$$

式中, T_v 表示虚温,下标 a 为地面上升量,下标 e 为环境相关量。 z_f 为自由对流高度, z_c 为平衡高度。在平衡高度处,环境对气块的浮力加速度为0,在此高度之上,对流将因为环境的负浮力作用而受到削弱。CAPE为在自由对流高度之上,气块可从正浮力作功而获得的能量。

对于实际大气,气块与环境的温度差和虚温差非常接近,为方便起见,忽略虚温的影响,CAPE即为通常计算的对应于埃玛图上正面积所对应的能

量。实际计算时,把上式转化到气压坐标系并按气压等间隔离散,变为:

$$CAPE = - R \sum_{i=1}^N (T_{ai} - T_{ei}) \ln(p_{i+1}/p_i) \quad (2)$$

其中,求和上下限分别为自由对流高度与平衡高度。

CAPE 比传统意义上的对流不稳定能量更能恰当地表示出对流发展的强度。按照理想假定,气团若在自由对流高度的垂直速度为零,在自由对流高度之上,由于环境的正浮力而产生一定的加速度,若正浮力能全部转化为动能,则其到达平衡高度时,最大上升速度为:

$$W = \sqrt{2 \times CAPE} \quad (3)$$

1.2 粗里查逊数 BRN

强对流活动是伴随对流风暴发生发展的,对流风暴的发展依赖于大气的热力和动力条件。影响对流风暴的发生最重要的是:中层干(冷)空气和强垂直风切变。中层干空气的作用,增强了热力(浮力)不稳定性,控制对流风暴的强度,而垂直风切变则影响对流风暴的类别。

大量的数值试验分析表明,强对流天气可以发生在弱的垂直风切变结合强位势不稳定或相反的环境中,即垂直风切变与位势不稳定两者之间存在着某种平衡关系。Weisman 和 Klemp^[3]引入了粗里查逊数的概念,可以很好地反映这种平衡关系,其表达式为:

$$BRN = \frac{CAPE}{\frac{1}{2}(u^2 + v^2)} = \frac{CAPE}{\frac{1}{2}[S^2]} \quad (4)$$

式中 CAPE 表示气块相对于环境的正浮力的大小,分母为对流层中层与对流层低层之间的风速切变,它既代表了气流从环境场获得的用以对流发展的动能供应,也代表了上升气流产生旋转的可能性,因此,BRN 代表了对于控制风暴结构和发展都很重要的因子(热力能量和运动能量)之间的一种相对平衡关系。

实际计算时, u 、 v 取 0~6km 的密度加权平均风与 0~500m 近地面层平均风之间的风矢差值的两个分量。风切变的表达式为^[4]:

$$S = \frac{\int_0^6 \rho_z |v_{(z)}| dz}{\int_0^6 \rho_z dz} - \frac{1}{2} |v_{(0)} + v_{(0.5)}| \quad (5)$$

即低层 0~6km 之间的密度加权平均风与 0~500m

近地面层平均风的差。

近年来,BRN 被认为是表征雷暴环境的一个很有用的参数。Weisman 和 Klemp^[5]的研究表明,在一定的 CAPE 情况下,改变垂直风切变 S 值,结果 BRN 不同,出现的风暴类型不同。BRN = 40 是区分超级单体风暴和多单体风暴的界限。出现超级单体风暴, BRN 是比较小的;多单体风暴相反,如果 BRN 更大,就会出现短生命史和普通雷暴。

杨国祥、何齐强等^[6]的研究表明,出现雷暴大风冰雹的样本, BRN 大多较小,若取 S 为 0~10km 密度加权平均风和 0~600m 近地面层风之间的差值,则可将 BRN = 40 作为预报雷暴大风、冰雹的临界值。不过在弱位势不稳定的情况下, BRN 并非好的预报指标,因为这时的 BRN 也可以是比较小的。

1.3 螺旋度

形成强风暴系统的环境条件一个很显著的特点是水平风有强的垂直切变。有研究表明,在对流层低层几公里范围内,相对于风暴的风向随高度顺转是风暴旋转发展的一个关键因子。在低层入流风暴的气流中,如果存在足够强的顺气流方向的水平涡度分量,当这支入流进入风暴内部后,便开始倾斜上升,产生围绕垂直轴线的气旋式旋转运动,有利于风暴的发展。螺旋度就是一个用来衡量风暴入流气流的强弱以及沿气流方向上的水平涡度多少的参数,它可以写为风速和涡度点积的体积分:

$$H = \iiint V \cdot \nabla \times V d\tau \quad (6)$$

其中 $\nabla \times V$ 是相对涡度。Woodall 认为只有相对于风暴的螺旋度 $SREH$ 才是有实际意义的量,他推导出了相对于风暴的局地螺旋度公式:

$$SREH = u_{sr} \left[\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right] + v_{sr} \left[\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \right] + w_{sr} \left[\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right] \quad (7)$$

其中, u_{sr} , v_{sr} , w_{sr} 分别为相对于风暴的风矢量 V_{sr} 在 x , y , z 三个方向的分量。 $V_{sr} = V - C$, C 为风暴平移速度。略去涡度的垂直分量和垂直速度在水平方向上的变化项,上式简化为:

$$SREH = v_{sr} \frac{du}{dz} - u_{sr} \frac{dv}{dz} \quad (8)$$

考虑到风暴入流空气主要来自于对流层低层几公里范围内, Davies - Jones 等^[8]在上式的基础上发

展了一个利用单站探空风资料计算相对于风暴的螺旋度,其表达式为:

$$SREH = \int_0^h k \cdot (V - C) \times \frac{dV}{dz} dz \quad (9)$$

h 为风暴入流厚度,通常取 $h = 3 \text{ km}$,可见对于局地中小尺度对流风暴而言,在低层,螺旋度可以理解为相对于风暴的风速与风随高度顺转(或逆转)的乘积,当风向顺转时, $SREH$ 为正;反之, $SREH$ 为负。

如果 (u_0, v_0) 为地面风, $(u_1, v_1), (u_2, v_2), \dots, (u_{n-1}, v_{n-1})$ 为 $0 \sim 3 \text{ km}$ 间各层的实测风, (u_n, v_n) 为 3 km 层上内插的风,那么,根据解析几何可以推导出计算螺旋度的公式:

$$SREH = \sum_{n=0}^{n-1} \left| (u_{n+1} - c_x)(v_n - c_y) - (u_n - c_x)(v_{n+1} - c_y) \right| \quad (10)$$

这里,风暴的移动速度的确定,在业务预报中是个棘手的问题。Leftwich^[9]提出了风暴运动的几种假设来计算螺旋度,结果发现,风暴速度对于螺旋度十分敏感。通常,它可以由雷达测定或直接从观测确定,也可以根据垂直方向上的平均风来估计,其效果要经过验证。

Davies - Jones 等人的试验结果表明,对于弱龙卷,中等强度龙卷和强龙卷,其螺旋度大小分别为 $150 \sim 299 (\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2})$, $300 \sim 499 (\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2})$ 和大于 $450 (\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2})$ ($h = 3 \text{ km}$)。有关文献^[10]也证实,当 $SREH > 150 (\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2})$ 时发生强对流的可能性极大。

1.4 能量螺旋度指数 EHI

John 和 Doswell^[11]指出,强对流天气既可以发生在低螺旋度 ($SREH < 150 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$) 结合高对流有效位能 ($CAPE > 2500 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$) 的环境中,也可以发生在相反的环境中 ($SREH > 300 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ 结合 $CAPE > 1000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$),即两者之间存在着一种平衡关系。

Hart 和 Korotky^[12]将对流有效位能和螺旋度组成能量螺旋度指数,其定义为:

$$EHI = (SREH \cdot CAPE) / 160000 \quad (11)$$

这里, $SREH$ 为低空 0 至 2 km 的螺旋度。

EHI 指数反映了在强对流天气出现时,对流有效位能与螺旋度之间的相互平衡特征。初步的研究表明:当 $EHI > 2$ 时,预示着发生强对流的可能性极大。 EHI 数值越大,强对流天气的潜在强度越大。

研究表明,与单独使用切变或 $CAPE$ 的各种指

标相比, $CAPE$ 和风切变的组合 (BRN, EHI) 提高了根据探空资料识别强对流活动的的能力。很显然,低空风切变在强龙卷的产生中起着更重要的作用。

2 个例分析

1998 年 6 月 21 日河北、河南部分地区遭受了一次强对流风暴的袭击。这次过程是午后从天津西部发展起来的,15 时 24 分出现雷暴冰雹,之后向西南方向推进。18 时 30 分至 19 时 30 分,影响衡水地区,最大风速 $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,降水 55 mm ;19 时至 21 时,影响邢台地区,降雹持续 30 分钟,冰雹最大直径达 50 mm ;至午夜,影响到安阳地区,持续 1 小时的过程雨量达 160 mm 。此后,逐渐减弱消散。

这是 1998 年华北地区范围最大、强度最强的一次对流风暴,它是在平原地区发展起来的,具有突然爆发的特点,在此前几天,华北在高空偏西北气流控制下,天气炎热晴好,对这次过程,许多气象台站未所料及,都没有预报出来。该风暴形成后,成为一个“自组织”,逆高空气流而动,直至河北南部。从雷达回波看(图略),这次过程强度大,持续时间长,而且移动很快。从卫星云图上(图 1a - c)也可以看出这次过程的发展情况。

资料采用探空资料的 TTAA、TTBB 部分以及部分测风资料,从 21 日 02 时至 22 日的 02 时,各参数的计算结果如下:

表 1 降雹出现前后的各物理参数值

时间 (日·时)	CAPE ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$)	BRN	SREH ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$)	EHI ($\text{m}^4 \cdot \text{s}^{-4}$)	SI ($^{\circ}\text{C}$)	LI ($^{\circ}\text{C}$)
21.02	822.0	63.5	138.1	0.7	-4.1	-3.9
21.08	1078.0	147.0	86.5	0.6	-3.3	-5.4
21.14	3406.9	177.5	104.4	2.2	-3.3	-10.9
21.20	1845.5	115.3	94.9	1.1	-4.3	-7.2
22.02	806.6	360.3	-161.6	-0.8	-2.0	-3.3

采用下午 14 时的探空资料,计算 $CAPE$ 达到 $3406.9 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,这在探空图(图 2)上看有直观的反应。另外,从表 1 上看,08 时的 $CAPE$ 也已达 $1078.0 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,在降雹发生前数小时对流不稳定能量就有明显的反映。根据 SI 指数和抬升指数的计算结果也可以看出,该地区层结极不稳定,稍有扰动就会造成强烈的对流。14 时和 20 时的相对螺旋度 $SREH$ 分别为 $104.4 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ 和 $94.9 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$,虽然与前面介绍的阈值相比偏小,但 14 时 $CAPE$ 值大

于平均阈值,满足低螺旋度结合高对流有效位能的平衡关系,14 时的能量螺旋度指数达到了 $2.2 \text{ m}^4 \cdot \text{s}^{-4}$ 。BRN 的值比统计阈值偏大,这与这次风暴的类型有关。分析有限时次的探空资料可以发

现,垂直风切变并不是很大,这次过程发生在相对较弱的垂直风切变结合强位势不稳定的环境中。如果有时空尺度更密的探空资料,应该可以更好地揭示这次过程的发展移动情况。

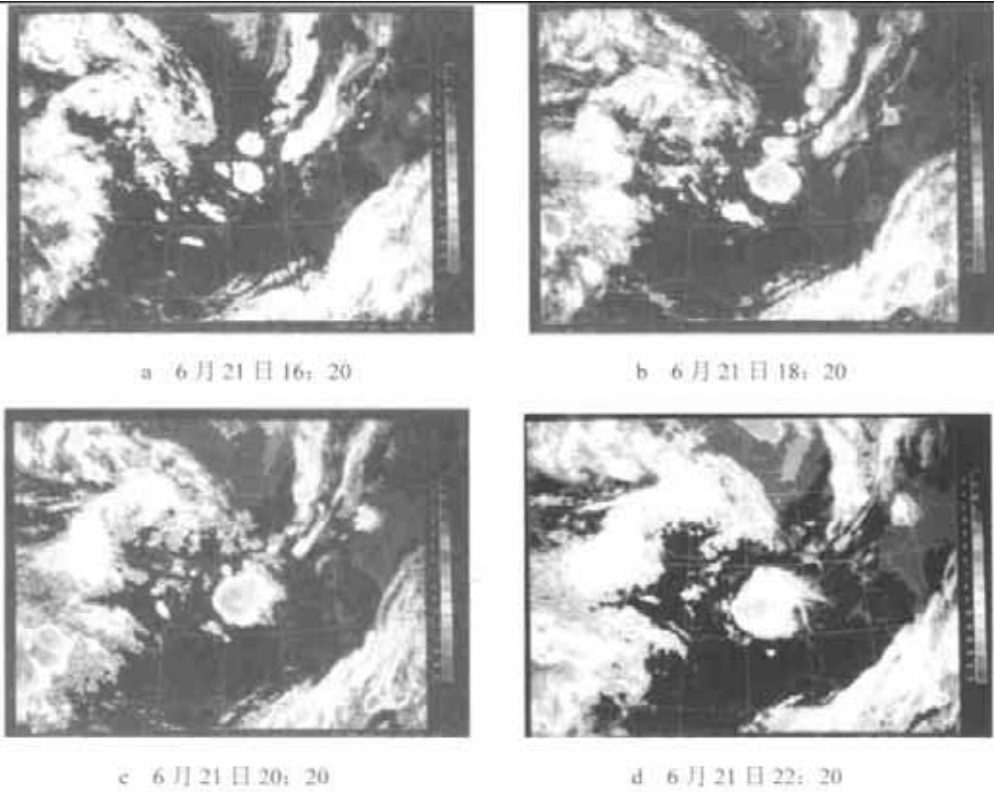


图 1 1998 年 6 月 21 日卫星云图

进一步分析该个例,可以发现:

(1) 对流有效位能 (CAPE) 对于此次降雹有着很好的指示意义。在冰雹发展所需的物理条件中,强上升气流是冰雹发展的必要条件,上升气流越强,对冰雹的承托力越强,足以长时间地支持冰雹,使其达到较大的尺度。而上升气流的强弱,主要取决于热力浮力(对流不稳定能),浮力大,出现大冰雹的可能就大。杨国祥等依据 1982~1992 年 6~8 月北京地面和探空资料用判断树法作北京的冰雹临近预报。在冰雹出现的样本中,冰雹出现前的 CAPE,最高为 $2923.5 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,最低为 $12.5 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,但大于 $700 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的占总样本数的 85%,因而他认为,可用 $\text{CAPE} > 700 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 作为判断有无冰雹出现的必要条件。美国曾有人作过统计^[13](表 2),产生大冰雹(直径大于 4 英寸) CAPE 的平均值为 $3352 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,抬升指数为 $-9 \text{ }^\circ\text{C}$ 。本文分析的个例,其沙氏指数 (SI) 和抬升指数 (LI) 也均有很好的指示意义。

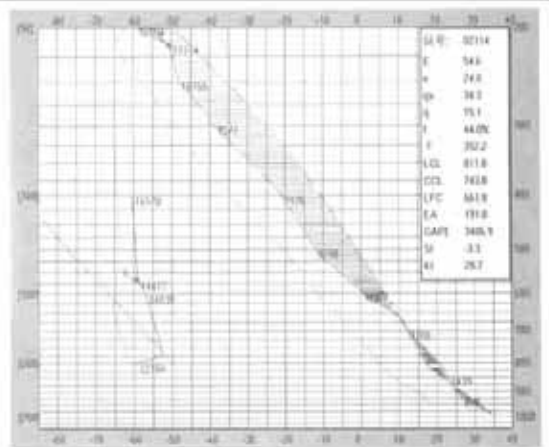


图 2 1998 年 6 月 21 日 14 时那台站探空

表 2 产生大冰雹时一些参数的平均值

CAPE ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$)	LI ($^\circ\text{C}$)	SREH(2km) ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$)	SREH(3km) ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$)	EHI ($\text{m}^4 \cdot \text{s}^{-4}$)
3352	-9	130	153	2.75

(2) 相对螺旋度是一个较易发生变化的参数,因

此当根据有限时次的空中风观测资料计算得到的螺旋度小于临界值时,并不能排除发生强对流的可能性。在有条件的情况下,应不断更新测风资料,及时掌握螺旋度的变化。另外,风暴速度对螺旋度计算也很敏感,因而在编制螺旋度的软件用于业务预报时,应考虑增强人机交互功能,及时输入新的观测资料。

(3) 此次个例对应的强对流天气出现在相对较弱的垂直风切变结合强位势不稳定的环境中,不稳定能量和相对螺旋度之间存在着一定的平衡关系。用常规观测资料计算的结果有时不能完全反映这种关系,这与探测的资料距降雹发生的时间、距离、风切变的计算方法以及风暴的类型都可能有关,因而预报时应结合多种因素综合考虑。

致谢:河北省气象局赵亚民同志提供了部分资料,特表谢意。

参考文献

- 1 Doswell C A III, Weiss S J and Johns R H. Tornado forecasting - a review. Proc., Tornado Symp. Church III C, Ed., Amer. Geophys. Union, 1993
- 2 Emanuel KA. Atmospheric Convection. Oxford University Press. 1994. 165 - 188
- 3 Weisman M L and Klemm J B. The structure and classification of numerically simulated convective storms in directionally varying wind shears. *Mon. Wea. Rev.*, 1984, 112: 2479 - 2489
- 4 Huntreser H, Schiesser H H, Schmid W, et al. Comparison of traditional and newly developed thunderstorm indices for Switzerland. *Wea. Forecasting*, 1997, 12(1): 108 - 125
- 5 Weisman M L and Klemm J B. Characteristics of isolated convection mesoscale meteorology and forecasting. P. S. Ray, Ed., 1986. 331 - 358
- 6 杨国祥,何齐强.北京雷暴大风和冰雹临近预报的研究.空军气象学院学报, 1994, 15(3): 202 - 211
- 7 Woodall G R. Qualitative forecasting of tornadic activity using storm - relative environmental Helicity. 16th Conf. on Severe Local Storms. *Amer. Meteor. Soc.*, 1990. 311 - 315
- 8 Davies - Jones R P. Test of helicity as a tornado forecast Parameter. 16th Conf. Severe Local Storms. *Amer. Meteor. Soc.*, 1990. 588 - 592
- 9 Leftwich P W. On the use of helicity in operational assessment of severe local storm potential. Preprint. 16th Conf. On Severe Local Storms. *Amer. Meteor. Soc.*, 1990. 306 - 310
- 10 章华东,舒慈勋.螺旋度概念及其在强对流风暴预报中的应用试验.空军气象学院学报, 1994, 15.(1): 20 - 27
- 11 Johns R H and Doswell III C A. Severe Local Storms Forecasting. *Wea. Forecasting*, 1992, 7(4): 588 - 612
- 12 Hart J A and Korotky W D. The SHARP workstation - 1.50. Askew T/ hodograph analysis and research program for the IBM and compatible PC. User's manual. NOAA/ NWS Forecast Office, Charleston, WV., 1991. 62
- 13 Kevin L P. Synoptic pattern and environmental conditions associated with very large (4" and greater) hail events. 18th Conf. On Severe Local Storms. *Amer. Meteor. Soc.*, 1996. 349 - 355

A STUDY OF SEVERE CONVECTIVE PARAMETERS AND THEIR POTENTIAL PREDICTABILITY TO SEVERE CONVECTIVE STORMS

Liu Yuling^{1,2}

(1 Physics School Peking University, Beijing 100871, China)

(2 Beijing Aviation Meteorological Institute, Beijing 100085, China)

Abstract: In view of the mechanism of development of severe convective storms, the physical concepts and the calculating methods of several convective parameters related with buoyant energy and vertical wind shear are introduced. A case is studied in detail. The results indicate that some parameters may serve as forecaster parameters for severe convective storms.

Key words: severe convective parameters, buoyant energy, vertical wind shear