

# 动力和能量参数在强对流天气 预报中的应用研究\*

李耀东

(中国科学院大气物理研究所, 北京, 100029; 北京航空气象研究所, 北京, 100085)

刘健文

高守亭

(北京航空气象研究所, 北京, 100085) (中国科学院大气物理研究所, 北京, 100029)

## 摘 要

较强的热力不稳定和适宜的动力环境是强对流发展的基础, 造成灾害的强对流一般是一种深厚对流, 深对流指数和对流有效位能可反映对流上升运动的潜势和强度, 对流有效位能还隐含地反映了对流层大气总体垂直热力结构。下沉对流有效位能和大风指数反映了对流下沉运动和下击暴流潜势, 对流下沉和干空气的入侵高度、干燥程度及对流层中下层的稳定性和湿度有关。强风暴特别是超级单体一般都具有很高的螺旋性, 高螺旋度有利于风暴生命的维持, 而风暴相对螺旋度则对风暴发生及风暴类型有一定的预示。粗里查逊数反映了对流能量和环境场动力之间的平衡关系, 能量螺旋度指数反映了动力和能量对强对流天气发展的共同效应, 它们都综合了动力和热力两方面的因子, 对强风暴及其类型的预报有指示意义。风暴强度指数和瑞士雷暴指数成功地把动力和对流能量参数结合起来, 在实际研究和业务工作中这种方法值得借鉴。随着高分辨率中尺度和风暴模式的发展, 模式输出的对流动力和能量参数将有广泛的应用前景。

关键词: 强风暴, 对流动力参数, 对流能量参数。

## 1 引 言

强风暴是在特定大气环境中发展起来的强大对流系统, 环境场的最重要特征是强位势不稳定和强垂直风切变, 在这种环境中, 对流获得充分发展, 并进行组织化, 形成庞大而高耸的积雨云体, 并准稳定地维持较长时间, 构成相对较严重的天气灾害<sup>[1]</sup>。从形态和动力学角度看, 强风暴不同于普通单体积云雷暴, 它们之间存在明显差别, 至少表现在以下 5 个方面<sup>[2]</sup>: (1) 强风暴是在强垂直风切变下发展的对流系统; (2) 强风暴内部气流结构及微物理过程与普通积云不同; (3) 对强风暴而言, 下沉气流的产生和加强不是风暴减弱的标志, 而是加强和达到强盛的标志; (4) 强风暴明显地偏于平均气流的右方或左方, 也可以发生分裂; (5) 强风暴可产生冰雹、暴雨、雷暴大风和龙卷等非常激烈的天气现象。

一般认为, 强风暴是中尺度对流活动发展的结果。在对流活动中, 热力不稳定决定了对流发展的强度, 而动力作用对触发对流及决定风暴类型起重要作用。为了表述强对流天气(也称强天气)发生、发展的环境, 经常用到各种对流参数, 而物理意义明确的能量、动力和热力稳定度参数最为常用, 新的对流参数不断被提出并应用于研究及预报业务<sup>[3]</sup>。

从能量学角度看, 强对流天气过程是能量的积累和在一定条件下强烈转化和释放的过程。早在 20 世纪 50~60 年代, 中国气象学家推广了与大气湿绝热过程密切相关的假相当位温在暴雨和对流性天气分析中的应用<sup>[4]</sup>, 从而推进了对流稳定度参数和能量方法在中国科研工作及业务预报中的应用和开发。叶笃正<sup>[5]</sup>、陶诗言<sup>[6]</sup>、曾庆存<sup>[7]</sup>都曾指出, 能量方法用于中国暴雨和强对流天气的分析和预报中可揭示许多重要现象。20 世纪 80 年代中期, 雷雨

\* 初稿时间: 2003 年 11 月 17 日; 修改稿时间: 2004 年 3 月 17 日。

资助课题: 国家自然科学基金(40375016)和中国科学院科技奥运专项(2001BA904B09)。

顺<sup>[8]</sup>在能量天气学方面的研究大力推进了对流能量和不稳定度参数在中国的应用;雷雨顺等<sup>[9, 10]</sup>曾用能量方法在强对流天气的分析和预报方面做了大量研究工作;高守亭等<sup>[11, 12]</sup>还把与动力-热力都相关的里查逊数用来判别中尺度波动不稳定,并用于强对流发生机制的研究。

探空资料可直接反映出大气垂直的热力-动力结构,因而探空分析在预报及研究强对流天气时一直有着十分重要的地位,从探空资料不仅可计算出稳定度和能量参数,也可直接计算出很多动力相关参数。近年来,随着探测手段的进步及数值模拟研究的发展,国际上对强对流结构的观测、模拟、分析和预报进展迅速,用于揭示强对流天气现象及用于强对流分析、预报和研究的对流参数发展得也较快<sup>[3]</sup>。而各种强对流参数也经常用于表征及预报强对流系统的结构发展及演变。了解强对流参数及其使用特性无疑对强对流天气的分析和预报有很大帮助。

## 2 热力不稳定和能量在深对流潜势及对流下沉运动潜势中的应用研究状况

强对流是一种深(厚)对流<sup>[13]</sup>,其对流伸展高度一般等于或大于均质大气高度(约 7991 m,与 400 hPa 等压面接近)。有组织的深对流经常可产生诸如强雷暴、冰雹、龙卷、下击暴流等灾害性天气。因此,深对流预报是强对流天气预报的基础。深对流的表示方法还有许多,如 Gadgil<sup>[14]</sup>用云的强度来表示, Graham 和 Barnett<sup>[15]</sup>用射出长波辐射(OLR)来表示,而 Waliser 等<sup>[16]</sup>用高反射率云(HRC)出现的频率来表示。

强对流天气(强天气)中出现频次最多的是强雷暴天气。20 世纪 70 年代, Miller<sup>[17]</sup>研究认为:强雷暴只出现在强热力学不稳定和强动力学因子都出现的环境中。然而,后来的研究发现,在强(弱)的热力学条件和弱(强)的动力学条件下也可出现强天气<sup>[18]</sup>。研究还表明<sup>[19]</sup>,几乎所有的局地强风暴都与深对流有关,而与有组织的深对流系统联系最密切的 3 个重要因素是:(1)对流层低层有足够的湿层以保证有充足的水汽供应;(2)充分大的温度直减率以保证足够的能量;(3)足够的抬升力以使气块能从湿层到达自由对流高度。Barlow<sup>[20]</sup>将其中前两个因素结合,组成一个可用于预报的深对流指数(DCI),其表达式为

$$S_{DCI} = (T_{850} + T_{d850}) - L_1 \quad (1)$$

式中  $T_{850}$ ,  $T_{d850}$  分别为 850 hPa 温度和露点(以  $^{\circ}\text{C}$  为单位),  $L_1$  为地面抬升指数。

深对流指数将 850 hPa 层的假相当位温  $\theta_{se}$ (隐含于右端第 1 项)与地面至 500 hPa 的浮力特性结合,深对流指数越大,预示条件不稳定越强。若同时具备抬升气块触发条件,则很可能出现强对流天气事件。

深对流指数反映了对流层中低层的稳定度情况,其反映的是一种不稳定和对流潜势。在具备深对流发展条件的基础上,其他一些物理量可协助预报风暴强度和类型。在这些物理量中,最具代表性的是对流有效位能(CAPE)<sup>[21]</sup>,它从理论上反映出上升运动受环境浮力作功而能达到垂直运动的强度,这种能量对大气对流发展有积极意义。与传统的不稳定指数相比,对流有效位能更能反应出大气的整体结构特征,因此也经常直接被和间接地用于预报业务<sup>[22~24]</sup>。

深对流指数和对流有效位能反映的是稳定性和上升对流的能量潜势。与强烈上升运动对应,强风暴的另外一个特性是有一支强大而稳定的下沉气流与其伴随。强风暴内下沉气流经常是由中层干空气侵入含水云体蒸发冷却造成的。中层空气的干燥程度、侵入风暴的高度及强度对风暴形态、风暴低层外流以及风暴结构和生命的维持都有很重要的影响。

为表述中层干空气侵入含水云体,云水蒸发冷却而湿下沉的过程, Emanuel<sup>[25]</sup>引入了下沉对流有效位能(DCAPE),其数学表达式为

$$E_{DCAPE} = g \int_{z_s}^{z_D} \frac{1}{T_{ve}} (T_{ve} - T_{va}) dz \quad (2)$$

其中,  $z_D$  和  $z_s$  分别表示下沉开始高度及地面高度,  $T_{ve}$  为环境场虚温,  $T_{va}$  为下沉气块的虚温,  $\overline{T_{ve}}$  为下沉过程中环境场平均虚温。

DCAPE 从理论上反映出干空气侵入含水云体后,气块因蒸发冷却作用下沉到地表时的最大动能。在计算 DCAPE 时,一般把中层干冷空气的侵入点作为下沉起点高度  $z_D$ ,而以大气在下沉起点的温度经等焓蒸发至饱和时所具有的温度(湿球温度)作为大气开始下沉的温度,下沉沿等湿球位温线进行。

从 DCAPE 概念及定义可以看出, DCAPE 值随下沉起点相对湿度的降低而增加<sup>[26]</sup>。这从理论上解释了为何中层空气越干冷,对流发展越强。

DCAPE 值可达到的大小对实际蒸发的雨量很敏感。观测及模拟研究表明, 雨滴谱分布也对下沉气流速度有重要影响。在其他因子保持不变的情况下, 较小的水滴尺度、较大的液态水含量、下沉气流发源地初始湿度较低的环境, 下沉对流更易猛烈地发展。这些条件显然同样有利于 DCAPE 取得较大的值。另外需要说明一点, 由于下沉气流与周围环境混合造成的最强下沉气流经常是不饱和、被稀释了的, 这使得在利用 DCAPE 估计超级单体的下沉气流强度时得出的数值偏大。但 DCAPE 值的大小仍然与地面大风有较强的相关。

中层干空气侵入含水风暴后对风暴发展影响是一个非常复杂的过程, 在风暴发展的不同阶段, 空气的干燥程度、入侵高度和强度对风暴体的影响作用不同。Gilmore 和 Wicker<sup>[26]</sup> 利用三维非静力平衡云模式研究了不同的 DCAPE 状况对超级单体雷暴形态和演变的影响, 得出的结论为: 中层干燥度不同, 产生的超级单体就具有不同的低层外流和旋转特征。在中等垂直风切变、不稳定性大、中层空气较干环境中形成的雷暴能产生强的低层外流, 即这种环境有利于对流下沉运动迅速发展至强盛极至, 最终切断风暴低层上升气流, 反而使风暴体迅速减弱。当风切变较强且干空气位置较高时, 下沉气流稀释较为严重, 下沉对流往往没有理论上 DCAPE 计算的那么强, 地面外流发展滞后且较弱, 而这一切均利于风暴内上升气流的维持。

下沉对流发展强盛时可形成下击暴流, 下击暴流发展而造成的灾害性强风是强对流天气最严重的破坏性之一。与 DCAPE 思想类似, McCann<sup>[27]</sup> 以观测研究及数值模拟结果为基础, 构造了一个用于预报微下击暴流潜势的指数 WINDEX (或 WI), 称为大风指数(或风指数)。其表达式为

$$W_{INDEX} = 5[H_M R_Q (\Gamma^2 - 30 + Q_L - 2Q_M) J]^{0.5} \quad (3)$$

式中  $H_M$  为融化层距地高度,  $Q_L$  为近地面 1 km 层内的混合比,  $R_Q = Q_L/12$ ,  $\Gamma$  为地面与融化层之间的温度直减率,  $Q_M$  为融化层处混合比。

大风指数虽然是一个半经验半理论公式, 但其来源有坚实的物理基础<sup>[27]</sup>。McCann 利用大风指数公式对 207 例下击暴流进行研究后得出, WINDEX 不能直接预报下击暴流, 其大小只代表了微下击暴流的潜势。雷暴外流边界的移向、移速和 WINDEX 配置对下击暴流是否发生起非常重要的作用。外流

边界快速、直接移入 WINDEX 最大处, 将有利于微下击暴流的发展。

### 3 螺旋度、风暴相对螺旋度等动力参数在强对流天气预报中的应用研究状况

热力不稳定和能量是对流发展内在的原因和本质, 而对流的触发和维持却与环境场的动力因子密切相关。各种尺度的水平辐合、抬升对触发强对流起非常重要的作用(本文不再详述)。而风场的垂直结构特征也对风暴的形成、发展和演变起着重要作用。

与强风暴类型密切相关的最基本的动力物理量是风的垂直切变, 其对强风暴的发展和维持都至关重要。而以风切变这一最基本物理量为基础, 近些年来, 又发展出一些针对强风暴预报和分析的动力参数, 其中, 最重要的是螺旋度和风暴相对螺旋度。

旋转性和上升运动都较强是很多强对流系统最重要的共同特征, 而螺旋度把这两个特征综合在一起。螺旋度<sup>[28]</sup> 是表征流体旋转及沿旋转方向运动动力特性的物理量, 其本身为伽利略不变量, 最早用来研究流体力学中的湍流问题, 在等熵流体中具有守恒性质。而通常气象上所使用的螺旋度是指局地螺旋度  $S_{hel}$ , 定义为

$$S_{hel} = \mathbf{V} \cdot (\nabla \times \mathbf{V}) \quad (4)$$

自 20 世纪 80 年代以来, 广大气象学者将螺旋度应用到强风暴的旋转发展维持机制及其相关的大气现象研究中, 并对其在强对流天气分析预报中的应用进行了数值试验。强风暴具有高螺旋度特征, 且稳定的强对流风暴常发生在螺旋度值大的地方<sup>[29]</sup>; 高螺旋度阻碍了扰动能量串级, 对超级单体风暴的维持有重要作用, 而超级单体风暴的传播又使得螺旋度的作用达到最优<sup>[30,31]</sup>。流体稳定性也与螺旋度密切相关<sup>[32]</sup>。

中国的气象学者也较早对螺旋度的性质、理论和应用做了很多研究。伍荣生等<sup>[33,34]</sup> 指出: 若不计摩擦, 在准地转运动中, 大气的螺旋度具有守恒的性质。刘式达等<sup>[35]</sup> 还应用描写大气运动的方程组求得了中尺度涡旋的三维定常流场以及相应的压力场和温度场, 解析地得出: 若中尺度涡旋的下层流体呈气旋(反气旋), 且伴有水平辐合(散)的螺旋转动, 则通过上升(下沉)运动, 其上层流体呈反气旋(气旋)且伴有水平辐散(辐合)的螺旋转动, 从而形成中尺

度涡旋的三维螺旋结构<sup>[36]</sup>。这说明在旋转有粘性的大气中,为保证质量守恒,必须有这种螺旋结构,这与实际大气中的中尺度涡旋结构相似。Fei等<sup>[37]</sup>利用风暴尺度的数值模式 ARPS<sup>[38]</sup>成功地模拟一次强对流风暴过程。模拟表明,初始环境场的螺旋性结构有利于风暴的发展。在风暴成熟阶段,高螺旋度有利于对流单体的能量维持,从而形成长生命周期的对流系统。

螺旋度在中国的暴雨和强对流天气分析及预报中也有一定的应用。杨越奎等<sup>[39]</sup>用螺旋度分析了1991年7月江淮的梅雨暴雨,发现 $z$ -螺旋度与几次中尺度暴雨过程有很好的对应关系。吴宝俊等<sup>[40,41]</sup>用地转螺旋度分析了三峡大暴雨过程,也发现螺旋度的垂直分布结构与暴雨过程有一定的联系。李耀辉、寿绍文<sup>[42]</sup>根据螺旋度理论,分析暴雨过程中暴雨演变以及对流层低层的中尺度低涡及地面气旋发生发展的原因,结果表明:正的旋转风螺旋度大值中心及其演变较好地反映了暴雨中心及造成暴雨的中尺度涡旋的发生位置及演变;较大的螺旋度是暴雨及低层中尺度低涡和地面气旋系统发生发展的机制之一。

强风暴特别是发展起来的超级单体风暴经常具有很强的螺旋性,分析和计算风暴的螺旋性需要高时空分辨率的三维观测资料。在风暴形成之前,螺旋特性一般表现得并不十分明显,因此螺旋度作为分析和诊断风暴特性较好,而作为预报强风暴及其类型发展并不十分好用。

Woodall<sup>[43]</sup>认为只有相对于风暴的螺旋度才对风暴的发展和维持具有实际意义,他提出了风暴相对螺旋度(SRH)的概念。风暴相对螺旋度异于螺旋度表达式在于水平风速为相对于风暴的风速。从预报角度来看,在强对流天气发展之前,大环境场涡度的垂直分量一般比风的垂直切变小一个量级以上,在螺旋度方程中可以忽略。此外,在强对流发生前,与风的垂直切变相比,垂直速度在水平方向上的变化不大。另外,对流层中低层的流程结构对风暴的发展贡献更为重要。在综合考虑这些因素后,风暴相对螺旋度表达式可简化为

$$H(C) = \int_0^h \mathbf{k} \cdot (\mathbf{V} - \mathbf{C}) \wedge \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial z} dz \quad (5)$$

式中, $C$ 是风暴移速, $h$ 是入流厚度(一般取3~4 km), $\mathbf{k}$ 是垂直方向的单位向量。风暴相对螺旋度的概念提出以后,即被用于风暴发生环境条件评估

及风暴类型的预报研究。风暴相对螺旋度用于诊断分析时计算不存在难度,但若要用于风暴预报时,首先必须预先确定风暴移动速度 $C$ ,目前确定 $C$ 的方法尚不统一。Maddox<sup>[44]</sup>估计风暴运动以平均风速75%的速度,移向平均风右侧的 $30^\circ$ ,这种方法应用于北美经典(右移)超级单体效果较好,目前这种方法较为通用。

风暴相对螺旋度与垂直风切变密切相关,但与风切变相比,SRH有如下特性:(1)理论上与上升气流旋转有关;(2)考虑了风暴的移动;(3)正比于相对风暴的大小和风的垂直切变;(4)包含的是积分,体现了低层风结构的整体效应,不像风切变那样对个别层次资料过分敏感,因此有利于在业务中使用。由于以上特性,近年来,在研究环境风场对强风暴的作用时,常用到这个物理量。Davis<sup>[45]</sup>认为,与超级单体内中尺度气旋形成有关的SRH值大约是 $150 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ;Brooks<sup>[46]</sup>模式模拟还表明,中尺度气旋能够在SRH值大于 $120 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 的环境中形成。

风暴相对螺旋度(有时也简称螺旋度)在中国也有一定的应用<sup>[47]</sup>。李英<sup>[48]</sup>用风暴螺旋度对滇南的冰雹大风天气进行分析,结果表明:低层螺旋度的演变与滇南冰雹大风天气有一定的关系,低层螺旋度的大值中心比较靠近降雹区。李向红<sup>[49]</sup>、郑传新<sup>[50]</sup>等研究发现,螺旋度对中国局部地区的强对流天气的发生有一定的指示意义。

#### 4 强对流参数的发展及应用于业务预报应注意的问题

强对流天气类型的发展很大程度上取决于其所处环境尺度的大小。各种对流参数从不同侧面反映了环境特性,对判断对流发展与否及预报对流天气类型都有一定的帮助。热力不稳定和能量参数主要反映的是大气的热力结构状况及与其相关的对流潜在的可能性和强度;动力不稳定参数反映了大气的动力环境是否有利于强对流的发生及环境场对风暴类型的可能影响。

强的热力学不稳定结合强的动力学环境有利于强天气的发生和发展,而大量的观测和数值试验分析也同时表明:弱的垂直风切变结合强位势不稳定或相反的环境中也可以发生强对流,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<sup>[51]</sup>据此引入了粗里查逊数(BRN)的概念。粗里查逊数的表示式为

$$R_{Bn} = \frac{E_{CAPE}}{(u^2 + v^2)/2} = \frac{E_{CAPE}}{s^2/2} \quad (6)$$

分母为上、下气层的切变动能。

与传统的里查逊数把热力不稳定和动力不稳定结合起来考们中低层的干对流不稳定和动力不稳定之间的平衡关系相比,把浮力能(稳定度)与垂直风切变结合起来的粗里查逊数(也称总体里查逊数)反映干湿两种对流不稳定的综合效应,其对强对流发展趋势预测是一个较好的物理量。有研究表明,粗里查逊数不仅与对流的发展有关,而且可以较有效地区分超级单体和多单体风暴<sup>[52]</sup>;而配合粗里查逊数使用的粗里查逊数切变(BRNSHR)也被证明对分辨龙卷或非龙卷超级单体非常有用<sup>[53]</sup>。

粗里查逊数包含了动力和热力参数,反映了强风暴发生时动能和热力能量之间平衡关系对风暴发展类型的影响。而把浮力能和动力参数有效相结合起来的还有能量螺旋度指数(EHI)<sup>[54]</sup>

$$S_{EHI} = E_{CAPE} \times H(C)/160000 \quad (7)$$

与粗里查逊数不同,EHI反映了动力和热力对风暴发展的共同影响,其数值越大,风暴发生的强度和可能性就越大。有研究表明,能量螺旋度大于2.0的地区,发生强风暴的可能性极大,用能量螺旋度指数来预报超级单体发展潜势也被证明是一种较为有效的方法<sup>[55, 56]</sup>。

预报和分析强风暴必须同时考虑动力、热力(不稳定度或能量)两方面,单一条件满足并不能形成强风暴。Turcotte与Vigneux<sup>[57]</sup>在采用点聚图方法检验强雷暴与非强雷暴发生情况下的浮力能-风切变分布时发现,采用风切变的自然对数与线性的浮力能可以较好地分强雷暴与非强雷暴,他们进而提出了风暴强度指数(SSI),其表达式为

$$\delta_{SSI} = 100/2 + 0.276\ln(S_{hr}) + 2.011 \times 10^{-4} \times E_{CAPE} \quad (8)$$

式中, $S_{hr}$ 为对流层中低层的风切变。在业务上一般取 $\delta_{SSI} > 100$ 作为强天气发生的必要条件。

SSI的引入给预报员提供了一个客观工具,同时,给分析和预报强对流天气提供了一条有价值的思路。将SSI用于预报时包括以下步骤:(1)挑选具有代表性的探空资料;(2)预报地面温度、露点或确定低层200 hPa内湿球位温达最大值处作为抬升起点计算CAPE;(3)利用推算的SSI值,确定强风暴潜势;(4)研究可能触发对流现象的动力学因子、中尺度因子(辐合线、湿舌、加热不均等),确定强天气

出现地区;(5)如果条件符合或已出现强风暴,则评估强风暴发展趋势;(6)利用最新观测资料,细化步骤(3)~(5)。

强天气发生和发展有某些共性,但随不同地域的气候环境不同,强对流天气发生条件及演变趋势也存在差异,因此在使用强对流参数进行预报时不能生搬硬套。如Huntrieser等<sup>[22]</sup>认为,许多预报雷暴的指数用于瑞士雷暴预报时,效果并不理想。因此,他们针对瑞士的情况,在做了大量统计分析后,研究出适用于当地雷暴预报的指数SWISS和CS,成功地把表征雷暴发生所需的热力学和动力学参数进行组合。其中,SWISS(瑞士雷暴指数)被用于确定是否有雷暴发生,它类似于美国气象学家提出的强天气威胁指数<sup>[58]</sup>。其具体表达式为

$$\delta_{SWISS} = S_{I850} + 0.4S_{hr_{3-6}} + 0.1(T - T_d)_{600} \quad (9)$$

式中, $S_{I850}$ 为传统的沙瓦特指数的数值; $S_{hr_{3-6}}$ 为3~6 km垂直风切变的数值; $(T - T_d)_{600}$ 是600 hPa温度露点差的数值。统计结果表明,当 $\delta_{SWISS} < 5.1$ 时预报有雷暴;否则预报无雷暴。在预报有雷暴的基础上,CS主要用于判别是否会出现大范围雷暴,其功能与能量螺旋度指数类似,表达式为

$$S_{CS} = E_{CAPE_{cd}} \cdot S_{hr_{0-6}} \quad (10)$$

其中 $E_{CAPE_{cd}}$ 是一个修正的对流有效位能; $S_{hr_{0-6}}$ 为6 km以下密度加权垂直风切变。Huntrieser<sup>[22]</sup>研究表明,在瑞士大范围雷暴日, $E_{CAPE_{cd}}$ 和 $S_{hr_{0-6}}$ 的值均特别大。当 $S_{CS} > 2700 (J \cdot kg^{-1} m \cdot s^{-1} (6 km)^{-1})$ 时,预报有大范围雷暴;否则,不预报有大范围雷暴。

瑞士雷暴指数也把浮力能和动力环境结合在一起,再次为人们业务和研究中开发新的适合的强对流参数提供了一个范例。目前,在业务预报中倾向于使用多个对流参数的组合,特别是使用垂直风切变和稳定度(浮力能)的各种组合。SELS还在业务预报中引入了这些参数及其变形,取得了明显的效果。

目前在美国,强对流参数的应用和研究开展比较普遍,而在中国近十年来没有太大的发展。中国的强对流天气类型、强度和美国存在较大差别。从大环境来说,中国大范围的强对流天气发生之前,对流层中层受一支冷干的偏西气流影响<sup>[59]</sup>。这支冷干空气伴随着较强的下沉运动,在它的低空有时会出现厚度较薄、强度较弱的下沉逆温层。大范围系

统性下沉运动抑制了小股不稳定能量的释放,而不稳定能量的积累主要靠近地面太阳辐射增温。而在美国中西部,强风暴发生前,来自墨西哥高原暖干的偏南气流叠加在平原的冷湿空气上,由于温度差动平流而形成了深厚而强的低空逆温层,因此,不稳定能量的积累,除了近地面辐射增温外,温度的差动平流也起了很大的作用,抑制不稳定能量释放的主要机制是低空平流逆温。由于积累、储存的能量较多,加之西风气流过洛矶山涡度增强的地形效应,美国的强对流天气发展的强度及旋转性一般都较强,强风暴中经常爆发许多龙卷。而在中国,由于储存的能量相对较少,强对流天气一般较弱,很少出现龙卷。由于储存和积累能量的机制及地理与气候环境的不同,中、美两地区强对流天气的性质和强度有很大差异。这些强对流参数如何用于中国的业务预报值得认真研究,风暴强度指数和瑞士雷暴指数给中国气象科技工作者开发和使用强对流参数提供了有价值的思路。又如王沛霖等<sup>[60]</sup>研究了北京地区局地强风暴和探空之间的关系,得出有利于北京地区强风暴的条件是:中低层为低压;层结不稳定和中下层位势不稳定强;中低层水汽含量高和对流层深厚气层相对湿度大。他认为北京的局地强风暴和对流中层的干燥度、高空强风和风的垂直切变关系不太明确。由此,在使用对流参数预报北京地区局地强对流天气如何着重考虑热力和不稳定性参数,同时考虑风场效应值得认真研究。

## 5 数值预报产品在强对流天气分析和预报中的应用前景

随着探测手段特别是卫星和雷达等非常规探测技术的不断进步和数值预报的发展,对强天气的认识在不断加深,预报水平也逐渐提高。特别是随着数值预报模式时空分辨率的提高,气象学家对强对流天气成因及发展过程有了更进一步的认识。目前,预报员根据探空及数值预报资料分析已经能够较成功地确定预报区域中是否会发生对流,而预报的主要困难在于确定对流发生的时间、落区、强度及类型。

目前,主要发达国家运用有限区域数值天气预

报(NWP)模式来指导强对流天气的展望预报,其中许多国家业务模式的分辨率已经或正在接近中尺度分辨率,而且这些模式的准确率还在不断提高。尽管模式预报还不完全尽如人意,但是这些模式的输出产品却包括了有关大气运动和热力学结构时空变化的信息。如果对数值模式提供的大气结构及其演变能够有更深刻的理解,无疑将使预报员(和预报)受益匪浅。虽然这些输出产品并不提供单个雷暴的具体预报,而是提供一种警报,但此可将短时报的注意力集中到强雷暴最可能发生的地区,如果模式和诊断足够准确的话,则其就可为强风暴的预报提供良好的基础<sup>[61]</sup>。

强对流天气预报水平的提高最终取决于探测资料、同化技术和数值模式水平的不断进步。目前,利用多普勒雷达资料变分同化技术,高分辨率风暴模式已可以成功地模拟某些强天气过程,并用于强对流天气的临近预报,但这种预报时效还较短。更普遍地说,利用大、中尺度模式的输出结果,制作强天气落区和强天气发展趋势的展望预报仍然是很多气象业务单位当前所面临的共同任务。新的观测资料来源和模式输出产品给预报员提供数量巨大的可选资料,在了解当地气候特性的基础上,准确地使用这些资料并充分利用各种动力和能量参数的特性,可以有效地提高各类强天气的预报水平。近几年来,气象学家也就此研究了各种方法。Stensrud<sup>[62]</sup>认为,在强对流天气预报决策中必须使用释用方法,并提出了模式输出参数法;与此同时,Hart等<sup>[63]</sup>提出了另一种释用方法——逐时模式生成探空廓线法;而Ostby<sup>[64]</sup>也指出,对于各个对流参数,不仅可以用初始分析资料很容易计算出,而且可以使用各种预报时效的预报模式输出资料计算出,使它成为更有用的工具。与由大尺度模式输出计算对流参数相比,由中尺度模式输出计算的这些参数将更有用。在掌握中尺度环境如何影响强对流演变的基础上,不但确定强对流出现的地点和时间,还要确定对流的型式已成为强风暴预报现在和未来的方向与目标,中尺度及高分辨率风暴模式输出对流参数也将会在此过程中进一步发挥重要作用。

## 参考文献

- 1 陆汉城. 中尺度天气原理和预报. 北京: 气象出版社, 2000. 297pp
- 2 丁一汇. 暴雨和中尺度气象学问题. 气象学报, 1994, 52(3): 274~ 284

- 3 彭治班, 刘建文等. 国外强对流天气的应用研究. 北京: 气象出版社, 2001. 414pp
- 4 谢义炳. 中国夏半年几种降水天气系统的分析研究. 气象学报, 1956, 27(1): 1~ 24
- 5 叶笃正. 近年来我国大气科学的研究进展. 大气科学, 1979, 3(3): 195~ 202
- 6 陶诗言, 丁一汇, 周晓平. 暴雨和强对流天气的研究. 大气科学, 1979, 3(3): 227~ 237
- 7 曾庆存. 我国大气动力学和数值预报研究工作的进展. 大气科学, 1979, 3(3): 256~ 269
- 8 雷雨顺. 能量天气学. 北京: 气象出版社, 1986. 159pp
- 9 雷雨顺, 吴宝俊, 吴正华. 冰雹概论. 北京: 科学出版社, 1978. 174pp
- 10 雷雨顺, 吴宝俊, 吴正华. 用不稳定能量理论分析和预报夏季强风暴的一种方法. 大气科学, 1979, 3(3): 297~ 306
- 11 高守亭, 孙淑清. 应用里查逊数判别中尺度波动的不稳定. 大气科学, 1986, 10: 171~ 182
- 12 黎清才, 高守亭. 强对流发生机制的一种研究. 应用气象学报, 1991, 12: 385~ 391
- 13 Ogura Y, Philips N A. Scale analysis of deep and shallow convection in the atmosphere. J Atmos Sci, 1962, 19: 172~ 179
- 14 Gadgil S, Joseph P V, Joshi N V. Ocean atmosphere coupling over monsoonal regions. Nature, 1984, 312: 141~ 143
- 15 Graham N E, Bamett T P. Seasurface temperature, surface wind divergence, and convection over tropical oceans. Science, 1987, 238: 657~ 659
- 16 Waliser D A, Graham N E, Gautier C. Comparison of the highly reflective cloud and outgoing longwave radiation datasets for use in estimating tropical deep convection. J Climate, 1993, 6: 331~ 353
- 17 Miller R C. Notes on analysis and weather forecasting procedures of the Air Force Global Weather Central. Air Weather Service, Technical Report 200. 1976
- 18 Maddox R A, Doswell C A. An examination of jet stream configurations, 500 mb vorticity advection and low level thermal advection patterns during extended periods of intense convection. Mon Wea Rev, 1985, 110: 184~ 197
- 19 John R H, Doswell C A. Severe local storms forecasting. Wea Forecasting, 1992, 7: 588~ 612
- 20 Barlow W B. A new index for the prediction of deep convection. Preprints, 17th Conf on Severe Local Storms. 1993. 129~ 132
- 21 Moncrieff M W, Miller M J. The dynamics and simulation of tropical cumulonimbus and squall lines. Quart J Roy Meteor Soc, 1976, 102: 373~ 394
- 22 Huntrieser H, Schiesser H H, Schmid W A. Comparison of traditional and newly developed thunderstorm indices for Switzerland. Wea Forecasting, 1997, 12: 108~ 125
- 23 Desautels G, Verret R. Canadian Meteorological Centre summer severe weather package. In: Preprints, 18th Conf. on Severe Local Storms. Amer Meteor Soc, 1996. 689~ 692
- 24 李耀东, 刘健文等. 埃玛图的微机制作和对流有效位能计算. 气象, 1998, 24(1): 21~ 25
- 25 Emanuel K A. Atmospheric Convection. New York: Oxford University Press, 1994. 168~ 175
- 26 Gilmore M S, Wicker L J. The influence of midtropospheric dryness on supercell morphology and evolution. Mon Wea Rev, 1998, 126: 943~ 958
- 27 McCann D W. WINDEX— A new index for forecasting microburst potential. Wea Forecasting, 1994, 9: 532~ 541
- 28 Moffat H K. On the knottedness of tangled vortex lines. J Fluid Mech, 1969, 35: 117~ 128
- 29 Davies— Jones R. Streamwise velocity: The origin of updraft rotation in supercell storms. J Atmos Sci, 1984, 41: 2991~ 3006
- 30 Lilly D K. The structure, energetics and propagation of rotating convective storms. Part I: Energy exchange with the mean flow. J Atmos Sci, 1986, 43: 113~ 125
- 31 Lilly D K. The structure, energetics and propagation of rotating convective storms. Part II: Helicity and storm stabilization. J Atmos Sci, 1986, 43: 126~ 140
- 32 Eiling D. Some aspects of helicity in atmosphere flows. Contrib Atmos Phys, 1985, 58: 88~ 100
- 33 伍荣生, 谈哲敏. 广义涡度与位势涡度守恒定律及应用. 气象学报, 1989, 47(4): 436~ 442
- 34 Tan Zhemin, Wu Rongsheng. Helicity dynamics of atmospheric flow. Adv Atmos Sci, 1994, 11, 175~ 188
- 35 刘式达, 辛国君等. 大气中尺度涡旋的三维螺旋结构理论. 气象学报, 2000, 58(2): 151~ 158
- 36 陆慧娟, 高守亭. 螺旋度和螺旋度方程的讨论. 气象学报, 2003, 61(6): 684~ 691
- 37 Fei Shiqiang, Tan Zhemin. On the Helicity Dynamics of severe Convective Storms. Adv Atmos Sci, 2001, 18(1): 67~ 86
- 38 Xue M. ARPS version 4.0 User's Guide. Center for Analysis and Prediction of Storms, Univ of Oklahoma, 1995
- 39 杨越奎, 刘玉玲等. “91.7”梅雨锋暴雨的螺旋度分析. 气象学报, 1994, 52(3): 379~ 384
- 40 吴宝俊, 许晨海等. 螺旋度在分析一次三峡大暴雨中的应用. 应用气象学报, 1996, 7(1): 108~ 112
- 41 吴宝俊, 许晨海等. 一次三峡大暴雨的地转螺旋度分析. 应用气象学报, 1996, 7(2): 144~ 150
- 42 李耀辉, 寿绍文. 旋转风螺旋度及其在暴雨演变过程中的作用. 南京气象学院学报, 1999, 22(1): 95~ 102
- 43 Woodal G R. Qualitative forecasting of tornadic activity using storm relative environmental helicity. 16th Conf on Severe Local Storms. Amer

- Meteor Soc, 1990: 311~ 315
- 44 Maddox R A. An evaluation of tornado proximity wind and stability data. *Mon Wea Rev*, 1976, 104: 133~ 142
- 45 Davies-Jones R, Burgess D, Foster M. Test of helicity as a tornado forecast parameter. In: Preprints, 16th Conf on Severe Local Storms. Amer Meteor Soc, 1992. 588~ 592
- 46 Brooks H E, Doswell C A, Davies Jones R. Environmental helicity and the maintenance and evolution of low-level mesocyclones. *The Tornado: Its Structure, Dynamics, Prediction, and Hazards*, Geophysical Monograph. AGU, 1993, 79: 97~ 104
- 47 章东华, 舒慈勋. 螺旋度概念及其在强对流风暴中的应用试验. *空军气象学院学报*, 1994, 5(1): 20~ 26
- 48 李英. 春季滇南冰雹大风天气的螺旋度分析. *南京气象学院学报*, 1999, 22(2): 164~ 169
- 49 李向红, 廖铭燕, 桂林“97.8.1”强对流大风的综合分析. *广西气象*, 1998, 19: 19~ 20
- 50 郑传新. 旋转风螺旋度在广西春季一次冰雹大风天气分析中的应用. *广西气象*, 2002, 23: 17~ 18
- 51 Weisman M L, Klemp J B. The dependence of numerically simulated convective storms on vertical wind shear and buoyancy. *Mon Wea Rev*, 1982, 110: 504~ 520
- 52 Weisman M L, Klemp J B. The structure and classification of numerically simulated convective storms in directionally varying wind shears. *Mon Wea Rev*, 1984, 112: 2479~ 2489
- 53 Davies J M. On BRN shear and CAPE associated with tornadic environment. In: Preprints, 19th Conf on Severe Local Storms. 1998. 599~ 602
- 54 Hart J A, Korotky W D. The SHARP workstation 1.50. A skew T/hodograph analysis and research program for the IBM and compatible PC. User's manual. NOAA/NWS Forecast Office, Charleston, W V, 1991, 62
- 55 Ostby F P. Improved accuracy in severe local storms unit during the last 25 years: then versus now. *Wea Forecasting*, 1999, 14: 525~ 543
- 56 Davies J M. Hourly helicity, instability, and EHI in forecasting supercell tornadoes. Preprints, 17th Conf on Severe Local Storms, St Louis, MO, Amer Meteor Soc, 1993: 107~ 111
- 57 Turcotte V, Vigneux D. Severe thunderstorms and hail forecasting using derived parameters from standard RAOBS data. Preprints, Second Workshop on Operational Meteorology Halifax, NS, Canada. Atmospheric Environment Service/Canadian Meteor and Oceanogr Soc, 1987: 142~ 153
- 58 Miller R C, Maddox R A. Use of the SWEAT and SPOT indexes in operational severe storm forecasting. 9th Conference on Severe Local Storms, Amer Meteor Soc, 1975, 1~ 6
- 59 蔡则怡. 我国强对流发生前的能量贮存机制. *大气科学*, 1985, 9(4): 337~ 385
- 60 王沛霖, 许丽章等. 北京地区局地强风暴发生的环境条件. *中山大学学报(自然科学版)*, 1996, 35(2): 113~ 117
- 61 Mills G A, Colquhoun J R. Objective prediction of severe thunderstorm environments: Preliminary results linking a decision tree with an operational regional NWP model. *Wea Forecasting*, 1998, 13: 1078~ 1092
- 62 Stensrud D J, Cortinas J V, Brooks H E. Discriminating between tornadic and nontornadic thunderstorms using mesoscale model output. *Wea Forecasting*, 1997, 12: 613~ 632
- 63 Hart R E, Forbes R S, Grumm R H. The use of hourly model-generated soundings to forecast mesoscale phenomena. Part I: Initial assessment in forecasting warm-season phenomena. *Wea Forecasting*, 1998, 13: 1165~ 1185
- 64 Lee B D, Wilhelmson R B. The numerical simulation of nonsupercell tornadogenesis. Part III: Parameter tests investigating the role of CAPE, vortex sheet strength, and boundary layer vertical shear. *J Atmos Sci*, 2000, 57: 2246~ 2261



## ON THE PROGRESS OF APPLICATION FOR DYNAMIC AND ENERGETIC CONVECTIVE PARAMETERS ASSOCIATED WITH SEVERE CONVECTIVE WEATHER FORECASTING

Li Yaodong

*(Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029;  
Beijing Aviation Meteorological Institute, Beijing 100085)*

Liu Jianwen

*(Beijing Aviation Meteorological Institute, Beijing 100085)*

Gao Shouting

*(Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)*

### Abstract

The severe storm is caused by deep convection, and its development needs thermodynamic instability and a proper dynamic environment. Deep convective index and convective available potential energy present the potential of upward convection, while convective available potential energy reflects the whole thermodynamic structure in troposphere impliedly. Downdraft convective available potential energy and wind index present the downward convection and micro downburst respectively. Downward convection is closely related with the altitude of the dry intrusive, the dryness of the air, the instability and the humidity of the low-level atmosphere. A proper vertical wind shear is favorable to severe storm. Severe storms, especially supercells, are always associated with high helicity which maintains a longer life cycle. The storm relative helicity is a predictive factor for severe storms. Bulk Richardson number reflects the balance between convective energy and dynamic effect. Energetic helicity index reflects the combination of the buoyancy energy and the dynamic effect. Both severe storm index and Swiss thunderstorm index are good examples for the use and the development of convective parameters. The combination of dynamic and energetic parameters is recommended in operational weather forecasting, and it is also recommended that multiple parameters should be used concurrently in order to reflect varied kinds of severe storms. Outlooks are made for the use of convective parameters in severe weather forecasting deduced by numerical model output.

**Key words:** Severe storms, Convective dynamic parameters, Convective energetic parameters.