

一种预报龙卷发生的新方法

藤 田

1. 龙卷发生的基本因素

大家已经知道,强烈的龙卷是在与中尺度气旋有关的雷暴涡旋中形成的。因此,龙卷发生的基本因素就是形成雷暴涡旋的那些因素,即:

A. 高层辐散——在 200 mb—300 mb 的急流层呈明显的辐散;

B. 低层辐合——和低层急流相关联的侧向辐合;

C. 抬升指数——测量上升质点的静力不稳定性;

D. 低层水汽——离地 2000—3000 英尺层内有高的混合比或高值露点温度。

E. 旋转场——流入层内有大的绝对涡度。

在这些因素的共同作用下,超级单体将把低层水汽抽入急流层,由此而产生的巨大的雷暴涡旋将孕育龙卷的发生。图 1 是涡度和不稳定性相结合形成雷暴涡旋的示意图。

目前,在大多数预报中心应用的等压面图上,常可以看到,在龙卷发生之前,500 mb 图上存在一个显著的正涡度平流(PVA),与此同时,湿空气平流(MAA)在正涡度平流前面得到加强。

实际上,在水汽流入的同时,中层冷却,低层增暖,使不稳定性增加(如图 1 所示)。由于正涡度平

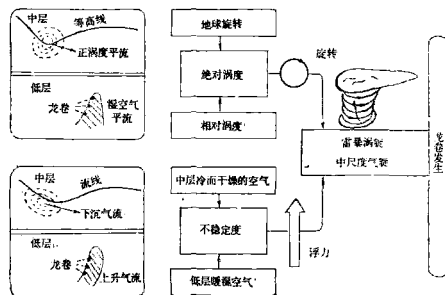


图 1 不稳定度和涡度的共同作用产生雷暴涡旋的示意图

流前面地面低压的发展,使低层绝对涡度增加。

绝对涡度和不稳定性增加的过程也可以通过在位温面上的空气流来描述。这样一个位温面穿越许多等压面,下沉气流和上升气流可以在这个倾斜度很大的面上清楚地描述出来。

通过对许多形势图的分析发现,一下沉气流区位于较显著的正涡度平流区附近,而上升气流区位于湿空气平流区附近。

已经发现,下沉气流(DSW)在龙卷发生前 24—36 小时就形成了,而上升气流(USW)是在下沉气流形成 12—24 小时后出现的,因而可以得到这样一个结论:在同一位温面上绘制下沉和上升气流可用于预报未来 24—36 小时龙卷的发生。

2. 等熵和非绝热过程

等熵面分析是由 Rossby 等人(1937)、Montgomery(1937)、Byers (1938)以及 Namias (1938)创始的,后由 Oliver(1951), Bjerknes(1951), Saucier (1955)等人继续应用。但是,在五十年代末期,人们对于等熵面分析的兴趣逐渐淡薄,原因是分析太费时间,且对大多数预报员来说得益较少。

二十年之后,到七十年代中一后期,等熵面分析又逐渐被人们重视起来。Bleck (1975)、Marks 和 Jones(1977)以及 Petersen(1979)先后证明,等熵面的客观分析可以很快地得出,而且比较经济。

在为东、西两个静止卫星探索快速扫描的日子里,作者面对这样一个问题:要提前 24—36 小时对 1980 年春季龙卷的发生作出预报。为此目的,作者于 1980 年 3 月和 4 月在芝加哥大学进行了一系列逐日等熵面分析,并由这些等熵面分析得到了如下的发现:

A. 初始的下沉运动发生在 500 mb 或 500 mb 以上的高度;

B. 经过 24—36 小时,冷的下沉气流接近地面;

C. 在冷气流缓慢下降的一天多时间里,等熵面位温略微下降。

下沉气流多半不象等熵过程所规定的增暖那样多。相反,下沉气流通过辐射、混合以及其它交换过程损耗了内能。

图 2 所表示的是下沉气流从 500 mb 到地面的一个非绝热下沉过程。如果这个过程是严格地保持绝热的话,那么在 500 mb 温度为 -25°C 的空气团,下沉到 700 mb 应当增暖到 0°C , 到 850 mb 应增暖到 15°C , 到 1000 mb 增暖到 29°C 。在非绝热下沉空气前沿的上升气流也应当是非绝热的,或者,由于云中潜热的释放,其非绝热的程度可能更高。

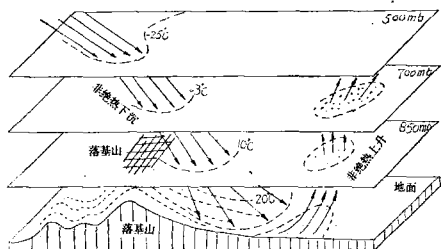


图 2 非绝热下沉诱发的非绝热上升气流概图。
在非绝热过程中,部分下沉空气质点失去热量,而部分上升空气质点得到热能

为了把 1—2 天的非绝热运动用公式表示,进行了如下假定:

$$dQ = dU + dW \quad (1)$$

$$dQ = -\alpha dU \text{ (非绝热)} \quad (2)$$

这里, α 是一个正常数,叫做非绝热常数,当过程是绝热的时候, $\alpha = 0$ 。

$dQ = dU + dW$	
等 熵	非 绝 热
$0 = dU + dW$	$- \alpha dU = dU + dW$
$PT^{-\frac{C_p}{R}} = \text{常数}$	$PT^{-\frac{C_p + \alpha C_v}{R}} = \text{常数}$
等 熵 位 温	非 绝 热 位 温
$\theta = T \left(\frac{P}{1000} \right)^{-\frac{R}{C_p}}$	$\phi = T \left(\frac{P}{1000} \right)^{-\frac{R}{C_p + \alpha C_v}}$
等熵流函数	非绝热流函数
$fV_\epsilon = \left(\frac{\partial \psi}{\partial n} \right)_\epsilon$	$fV_\epsilon = \left(\frac{\partial \xi}{\partial n} \right)_\epsilon$
$\psi = C_p T + gH$	$\xi = (C_p + \alpha C_v) T + gH$
$\Psi = \frac{\psi}{g} = H + \frac{C_p}{g} T$	$Z = \frac{\xi}{g} = H + \frac{C_p + \alpha C_v}{g} T$

图 3 作者在 1980 年初得到的非绝热参数基本方程

图 3 中的方程表明,这个简化了的非绝热过程可以通过定义一个“非绝热位温”来公式化。这个“非绝热位温”相当于“等熵位温”。

蒙哥马利(Montgomery)流函数是“非绝热流函数”的特殊情况。“非绝热流函数”可由函数 Z (以米为单位)表达。一张非绝热图将包括:

* 在一个特定的非绝热位温面上的风矢量 $ddff$;

* 流函数 Z 画成等值线,犹如在等压面上的等高线。等值线间的间距为 30 米或 60 米;

* 非绝热气压 P ,以断线表示,犹如在等压面图上的等温线,间隔为 50 或 100 mb。

用以计算图 3 中的非绝热方程的常数是:

$$R = 2.87 \times 10^8 \text{ 尔格/g} \cdot \text{K}$$

$$C_v = 5/2 R = 7.175 \times 10^8 \text{ 尔格/g} \cdot \text{K}$$

$$C_p = 7/2 R = 10.045 \times 10^8 \text{ 尔格/g} \cdot \text{K}$$

$$\frac{C_p + \alpha C_v}{R} = \frac{7 + 5\alpha}{2}$$

$$\frac{C_p + \alpha C_v}{g} = 102.6 + 73.2 \alpha \text{ 米/K}$$

表 1 和表 2 是非绝热位温面的数值,在 500 mb

表 1 等熵和非绝热面的温度 (°C和K)

	标 准 气 压 (mb)					
	300	400	500	700	850	1000
$\alpha = 0.0$	-58.7 214.5	-40.3 232.8	-25.0 248.1	0.0 273.2	+15.6 288.8	+29.3°C 302.5 K
$\alpha = 0.1$	-56.6 216.5	-39.4 233.8	-25.0 248.1	-1.7 271.4	+12.7 285.8	+25.3°C 298.5 K
$\alpha = 0.2$	-54.8 218.4	-38.5 234.7	-25.0 248.1	-3.2 269.9	+10.2 283.4	+21.9°C 295.1 K

表 2 标准气压高度的 Ψ -H和Z-H值。
等熵和非绝热流函数可由等熵面高度加上
表中的数值得到

	标 准 气 压 (mb)					
	300	400	500	700	850	1000
$\alpha = 0.0$	2201	2389	2546	2803	2963	$3104 \times 10\text{m}$
$\alpha = 0.1$	2380	2570	2727	2983	3141	$3281 \times 10\text{m}$
$\alpha = 0.2$	2560	2752	2909	3164	3322	$3460 \times 10\text{m}$

上温度是-25°C。

3. 能量传递

龙卷发生形势的非绝热分析揭示了一个从一般的环流尺度到龙卷尺度的能量传递过程。显然，下沉气流在提供能量传递过程中起了关键的作用(如图4)。

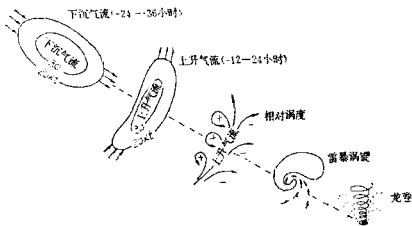


图 4 从下沉气流到雷暴涡旋最后到龙卷的能量传递

下沉气流最初形成在落基山以西或西北的300—500 mb高度上，比上升气流的出现提前12—24小时。在这一点上，上升气流和下沉气流之间的因果关系是明显的。首先有下沉气流形成，然后诱发上升气流。

显而易见，下沉气流在它长距离的下沉过程中，

在其左侧(东北方向)产生正的涡度。当下沉气流达到低层时，一个显著的涡度场出现在所有的层次上。因此，正涡度平流发生在下沉气流直接影响到的区。

导致上升气流产生的能量转换是由下沉气流完成的；下沉气流带着巨大的动量从它的初始高度上下降。实际上，下沉气流促使气旋在整个对流层内发生。

显著的上升气流使低层产生暖平流，同时，上升气流左侧的强涡度场为雷暴形成提供了气旋性环流，这些气旋性环流是使雷暴发展成雷暴涡旋，超级单体、中尺度气旋或钩状回波所必须的。众所周知，雷暴涡旋是产生强烈龙卷的母体。

图5(地面图)和图6(非绝热图)指出了导致龙卷发生的过程。地面图表示，当从加拿大来的冷空气向东猛烈推进的时候，龙卷发生在冷空气前沿。而非绝热图描述了，在龙卷形成前大约24—36小时，下沉气流向落基山移动的情况。当下沉气流通过落基山时，在落基山的东侧产生气旋。

应当注意，在龙卷发生前12小时，上升气流位于下沉气流的前沿，而这种下沉气流是干燥的，且常比在地面附近的暖湿空气暖。从加拿大来的冷锋远远落后于干锋，这种干锋是下沉气流前沿的标志。

在龙卷发生之前，冷锋可能赶上干锋，但不一定。如果冷锋赶上干锋，一系列龙卷将沿着冷锋发生；如果没有赶上干锋，龙卷发生在冷锋的前方。

4. 青藏高原对龙卷的影响

作者通过分析一系列非绝图，得到这样一个印象：在龙卷发生地附近的冷锋对龙卷形成的影响是次要的。换句话说，对于龙卷的发生，可以不需要活跃的冷锋，而一支显著的下沉气流及与其相联系的上升气流对龙卷发生起着重要的作用。

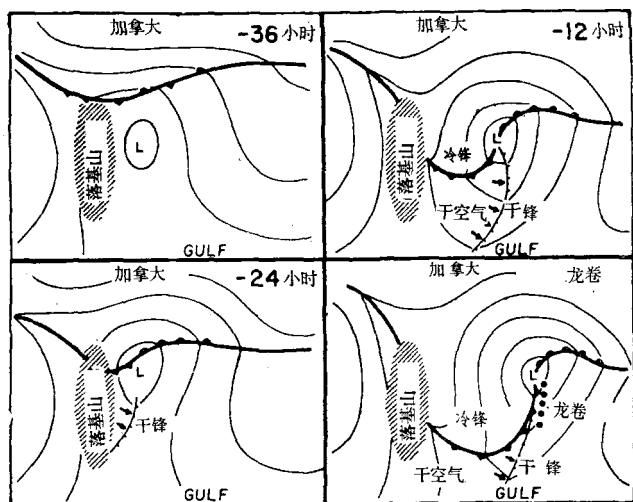


图 5 龙卷发生前四个时次(间隔为 12 小时)的地面天气图

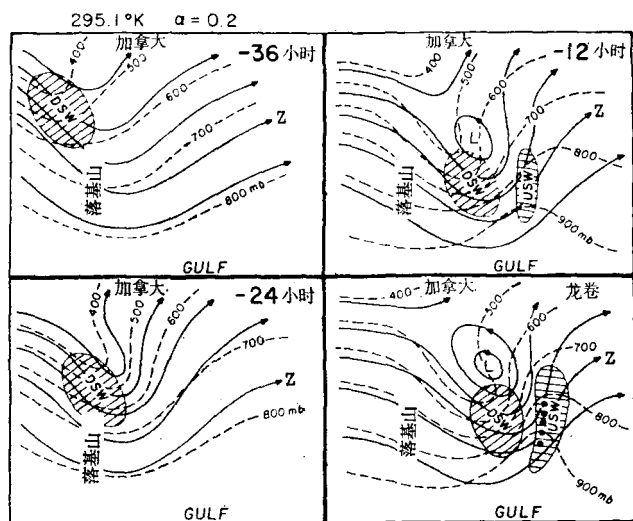


图 6 龙卷发生前四个时次的非绝热图(与图 5 中的地面图时间相同, DSW 为下沉气流, USW 为上升气流)

为了检验这个假设, 分析了中国附近的地面和高空图。大家都知道, 在中国, 龙卷相对来说是比较少的, 而冷锋却很多且很强。

中国的中部和东部的地理环境与美国的中西部相似, 西面是高的山脉, 南面是温暖的热带水域。

1979 年 3 月 28 日 12 GMT 的地面图表明(图略), 有一条发展很完善的冷锋从黄海一直伸展到青藏高原的东麓。如果类似于这一张图的锋面形势在美国春季盛行的话, 那么可以预想会有一系列破坏性很大的龙卷发生。但在中国, 这种形势下龙卷发生的可能性就比较小。在天气形势上有什么主要的

差别呢? 相应的 500 mb 高空图, 可以清楚地看到, 青藏高原把西风分成南北两支急流, 南支急流从印度北部向东伸展到冲绳岛, 风速达 60 海里/时, 而北支从戈壁沙漠向东到日本海。

在青藏高原的下游, 南北两支急流之间有一弱的滞缓的气流, 在 500 mb 上的风速只有 20 英里/时。正如预想的那样, 在 700 mb 上, 气流的滞缓和分支更为明显。青藏高原的地形和热力影响相结合, 完全改变了中国东部的高空流场。

很显然, 青藏高原比落基山高得多、大得多。适当尺度的山脉, 如落基山, 有助于增加龙卷的活动, 而青藏高原把西风分成两支, 消除了显著的下沉气流从西面或西北方进入中国东部平原的可能性。如果山脉太高, 范围太大, 那么, 它的存在将抑制龙卷的活动。因此, 研究一下青藏高原对中国东部和日本西部天气和气候的影响将是有价值的。

青藏高原的唯一特征, 是它那连接于相对平坦的帕米尔高原的庞大山体, 象一条尾巴一样向西伸展。帕米尔以“世界屋脊”著称, 与一些褶皱的山脉相接, 而这些褶皱的山脉具有大量的崎岖鳍状的向西伸展的支脉, 这些支脉有可能使分离的北支气流流速减小。

如果喜马拉雅山南麓是光滑的, 那么南支气流由于无摩擦的伯努利(Bernoulli)效应将加速, 由此而产生的气旋性环流在青藏高原的东麓诱发出一个大的气旋。

5. 1979 年强风暴和中尺度试验资料的非绝热分析

详细地分析了 1979 年 4 月 10 日, 也就是维契托佛尔斯(Wichita Falls)发生龙卷那一天的探测资料。这里介绍的是一些用 295 K 位温面非绝热分析的例子。

图中绘制的下沉气流, 以大于 30 英里/时的速度下传, 越过加利福尼亚向新墨西哥移动。在维契托佛尔斯发生龙卷前 12 小时左右, 即 1979 年 4 月 10 日早晨 6 点钟, 一股上升气流开始在东南得克萨斯上空加强。

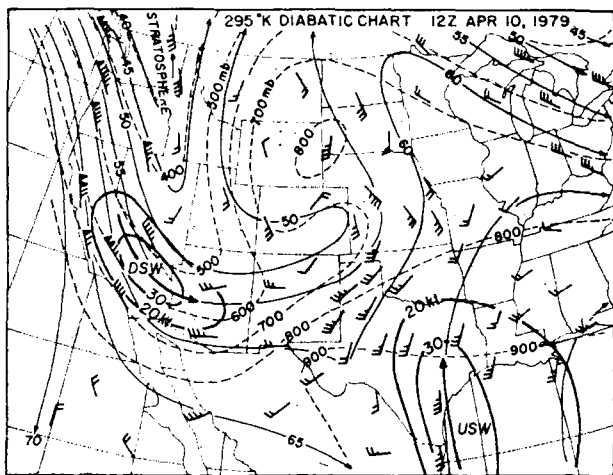


图 7 维契托佛尔斯发生龙卷前 12 小时的非绝热图

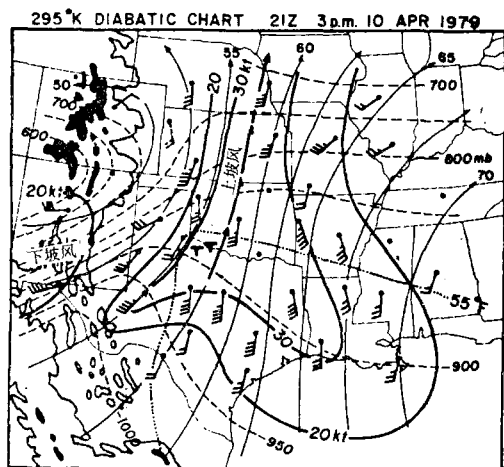


图 8 龙卷发生前 3 小时的局地非绝热图

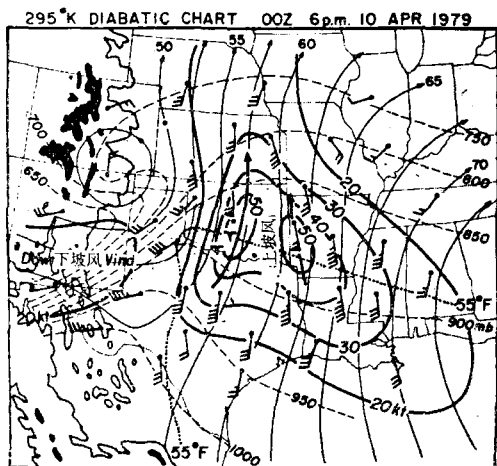


图 9 龙卷发生时的局地非绝热图

龙卷发生前 3 小时 (图 8), 下沉气流到达亚利桑那—新墨西哥的边境, 上升气流继续上升, 它的轴线沿红河流域伸展到内布拉斯加州的俄马哈 (Omaha) 附近, 2 个龙卷发生在上升气流轴的左侧 (气旋性一侧)。

当维契托佛尔斯在下午 6 时左右发生龙卷时 (图 9), 新墨西哥上空的下沉气流很强, 龙卷发生在上升气流轴的左侧 (气旋性一侧)。

维契托佛尔斯发生龙卷后 3 小时 (图 10), 新的

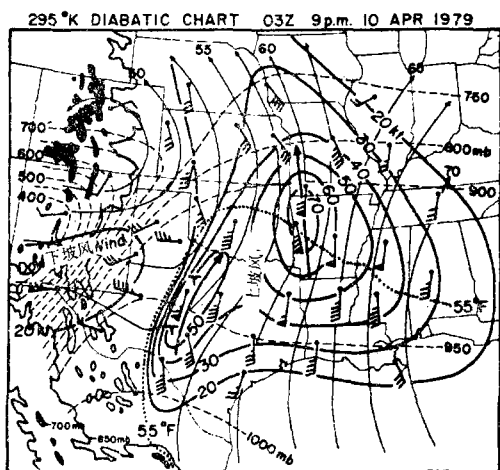


图 10 龙卷发生后 3 小时的局地非绝热图

上升气流在下沉气流的前沿发展, 夜间, 在中部得克萨斯出现弱的龙卷。

6. 结 论

本文提出的非绝热分析, 其过程与等熵面分析

相同。在过去的五十年中，气象学者对等熵面分析是很熟悉的。但是和等熵面相比较，非绝热面的坡度较陡，因而可使我们在非绝热面上更有效地描述上升气流和下沉气流。

为了提高龙卷发生的早期预报水平，建议进一步对非绝热分析进行试验，具体建议如下：

A．在美国西部进行强风暴和中尺度试验，调查龙卷发生的新的预报因子——下沉气流的特征。

B．发展强风暴和中尺度环境研究卫星(SME-ARS)，以提高在高云存在情况下的探测能力。这样

一颗卫星在发现和追踪从东太平洋到龙卷发生地的下沉气流是极其有用的。

C．在世界的其它地区进行非绝热分析，以确定巨大山脉的影响。青藏高原的地形对于研究是最理想的。

D．进行全球的非绝热图分析，用以描述全球大气的三维空间运动。

潘剑翔摘译自芝加哥大学地球物理系

“卫星和中尺度气象研究计划(SMRP)”研究

论文 183 1980年1月 陈文源 校