龙卷风：强大的毁灭性漩涡

作者：**鲁克斯·弗兰克**（ROUX Frank），图卢兹保罗·萨巴蒂尔大学航空实验室教授。

龙卷风系统可产生地球上最强的风，造成的破坏是任何其他现象所无法比拟的。在美国中部以及其他中纬度地区，引起龙卷风雷暴极具特点。大多数这些强大大气漩涡的物理强化机制已被探知，这使得龙卷风带来的风险能够被相当准确地预测。但是，由风暴所产生的龙卷风的确切位置和实际强度事先并不能准确预测。虽然这些极端事件很罕见，但了解在遇到这样的天气怪物时如何保护自己还是非常有用的。

1. 一种短暂却剧烈的现象

龙卷风系统可产生地球上最强的风，风速高达甚至超过 400 公里/小时。人们印象中的龙卷是残暴的，伴随着扭曲、抽吸、撕裂、提升、辐合且螺旋上升，其造成破坏令人心惊，有时甚至可造成人员伤亡。龙卷风的探测十分困难，所以很难及时发出有效的警报，但是当大气垂直风切变很大，大气结构非常不稳定时，我们可以发现潜在的风险。

图 1 2007 年 6 月 22 日，在加拿大曼尼托巴省伊利村附近的一场高强度龙卷风。［资料来源：贾斯汀·霍布森所摄］

龙卷风是一种具备强风、近乎垂直的旋转轴和气旋性（北半球逆时针方向，南半球顺时针方向）旋转的特点的**大气旋风**，其可见部分像垂直圆柱或圆锥一样延伸，呈**喇叭状。**龙卷常发生于发达的对流云、积雨云或更少见的浓积云（图 1）的底部，发生在风暴的中心区，且经常伴随着暴雨、冰雹和强雷电。

这个喇叭状系统的直径从几十米到几百米不等，垂直可见部分的范围从几百米到 2-3 公里不等，但其隐藏在云层中的部分可上延至 8-10 公里的高度。虽然龙卷风的生命周期相当短，最多只有几分钟，但引起龙卷风的猛烈风暴可迅速移动，所以龙卷对地面的影响可达几公里之远。此外，风暴往往会经历几轮崩溃和再生，在此过程中可以先后产生多个或强或弱龙卷风。

你知道龙卷如何诞生的吗？龙卷发展初期，会发出一个警告信号——云底和地面几乎同时出现强烈的漩涡。随后，这两个漩涡逐渐连通。涡旋使气压降低，大气中的水汽凝结成液态水滴，使龙卷变得可见。在波动初期，这个喇叭状系统稳定在一个垂直的位置，并随着涡旋的加强而扩大。强龙卷的外观有强烈的湍流活动，大量各种各样的碎片被强风卷起，形成一个黑色的云团。**海龙卷**是发生在液体表面（海洋或湖泊）上的龙卷，它们的演变过程与低强度龙卷大致相同，其足部被一个大约 10 米高的泡沫环包围，类似于地面龙卷底部的灰尘和碎片团。

2. 或多或少的重大损害

1981 年，美国气象学家西奥多·T·藤田根据龙卷风造成的灾害，提出了一种**强度等级表**。

表：根据 T·T·藤田（1981）[1]的龙卷风强度分级

等级	风速	外观	影响
F0	$60-110km/h$	呈不规则喇叭状，外表光滑，通常不接触地面	小树枝折断，瓦片被卷飞
F1	$110-170km/h$		窗玻璃被吹走，车辆被吹动
F2	$170-240km/h$	从喇叭状发展为一个大型湍流柱，接触地面	树木被连根拔起，风卷起碎片的质量 $<1kg$
F3	$240-320km/h$		一些墙被摧毁，货车被翻倒，风卷起碎片的质量 $<10kg$
F4	$320-410km/h$	产生多个剧烈旋转的强涡旋，彼此相互接触	车辆及船只被卷起，风卷起碎片的质量 $<100kg$
F5	$>410km/h$		建筑物及火车被吹动，所有建筑都被连根拔起

3. 龙卷风的全球分布

横跨北美大陆中部，位于墨西哥湾、阿巴拉契亚山脉和落基山脉之间的大平原，是世界上龙卷风最频繁的地区，因为该地在春季和初夏风暴活动非常频繁。平均每年造成 100 人死亡以及数亿美元的财产损失。德克萨斯州北部、俄克拉荷马州、堪萨斯州和内布拉斯加州，这一带危险地区被称为**龙卷风巷**，每年每 10,000 平方公里的地区可能发生 5 起龙卷事件。

在全球范围内，受龙卷风影响的地区主要在中纬度。在北半球，欧洲、俄罗斯、印度、孟加拉国东部、中国沿海和日本都有观察到龙卷事件。在南半球，龙卷发生在南澳大利亚、东澳大利亚、南非以及阿根廷北部和巴西南部之间。热带和赤道地区比较幸运，但有时会观察到海龙卷。

在法国，让·德森斯和约翰·T·斯诺[2]于 1989 年发表的气候学研究揭示了三个高暴露性地区：西北部从普瓦图到皮卡迪和香槟的狭长地带，东部的里昂和朱拉之间，以及地中海沿岸。大多数龙卷风发生在 5 月到 9 月之间——雷暴活动频繁的时间段。但是，也有一些龙卷出现在冬天，一般与活跃的冷锋有关。平均而言，上述三个地区，每个地区每年都有一到两次弱龙卷风（F0 或 F1 强度）。强龙

卷风(F3、F4 或 F5)的风险似乎只出现于最活跃的地区，平均频率约为每 5 年一次。

2008 年 8 月 3 日晚上袭击法国北部萨姆布雷山谷地区的龙卷被列为 F3 或 F4 等级。移动距离长达 20 公里，袭击了沿线多个城市，最大强度发生在萨姆布雷河畔和豪蒙特。此次龙卷灾害造成了三人死亡，十八人受伤，许多房屋被毁，造成的经济损失约为 200 万欧元。到目前为止，这是**30 多年来袭击法国最猛烈的龙卷风**。

4. 漩涡中心

涡旋的机理是什么？这种空气情况下（详见焦点），**涡度**是最根本的机制。涡度是一种矢量，是局地流体旋转速度的量度，它记录每秒的转数。**涡旋**就是流体具有较大涡度的区域，涡旋轴是指向涡旋矢量点的方向。风速或风向的横向变化也会产生环境涡度。

导致涡度在方向或强度上的变化，有以下几个原因。首先，涡度可以通过空气运动水平或垂直地输送，这是流体的一个特征，即**平流**。速度变化在涡旋的演变中起着双重作用：一方面，就像滑冰者通过收紧(或延长)手臂来加速(或减缓)他们的旋转一样，当风有辐合(或辐散)时，涡度会增强(或减小），这是**辐合**效应。另一方面，水平或垂直切变，即风分量的横向变化，导致涡度方向的变化，但不改变其强度，我们称之为**倾侧**。因此，假定有一个由水平气流输送的水平轴涡旋，当气流向垂直方向倾斜时，其轴也逐渐垂直。假定空气的流动速度和温度在不同方向上发生同样的变化，由于**斜压**效应，也会造成涡旋强度的变化。此外，还要考虑由于湍流过程和地面摩擦而产生的**耗散**效应，这往往会减少涡度的空间变化。

研究龙卷风的形成和演变需要先探究大气中涡度的来源，然后描述在水平尺寸小于一公里涡旋中涡度的大小。以下几种现象相互伴随。第一个来源是地球的自转，地球自转产生了垂直方向的涡度，其强度随纬度而变化，最大值在两极点，每 24 小时旋转一圈，最小值在赤道，每 24 小时旋转零圈。仅仅环境涡度的大小远不足以解释龙卷，因为龙卷风涡度的典型值为每几秒钟便可旋转 1 次，是上述涡度的 10,000 倍，要想由这一来源通过上述过程产生龙卷，需要的时间比风暴的平均寿命（最多几个小时）长得多。

涡度的第二个来源，也是更重要的蓄能池，是水平风的风速和风向的垂直切变。水平风速在垂直 10,000 米的距离内变化 20m/s，即可产生 $2\times10^{-3}s^{-1}$ 的涡度。这个涡度值相当于大约一个小时便可完成一次旋转，是地球在极点旋转速度的 25 倍。这种水平环境涡度如发生垂直倾斜，可激发与龙卷相关的强大涡旋运动，然后通过辐合运动进一步加强涡旋运动，并通过上升和下沉气流将涡旋上下输送。

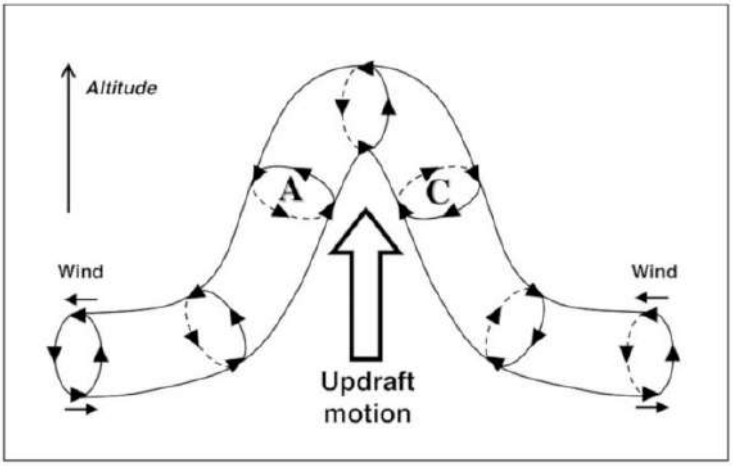

图 2 在水平风垂直切变的环境中，上升气流的发展导致了成对的气旋和反气旋涡的形成。（图二 altitude 海拔高度，wind 风，updraft motion 上升运动）

在涡度方面，在水平风垂直切变的环境中，上升气流的发展（例如雷暴过程）通过倾侧效应造成环境涡旋轴的变形（图 2），随后产生一对气旋性和反气旋性漩涡。但这两个方向相反的旋风命运各不相同。事实上，风切变一般不是恒定的，往往随着高度的变化而发生风向的转变。因此在北半球，对流层低层的东南风、到中层可发展为西南风，到高空可发展为风速更大的西北风。气旋移动造成的气压扰动，会产生一种垂直驱动力，这个驱动力在低压侧增加上升气流，同时在高压侧减弱上升气流，并使高压很快消失。很快，上升气流的涡度与其速度平行，形成稳定的**贝尔特拉米流动**，其不仅稳定，且抗湍流耗散。

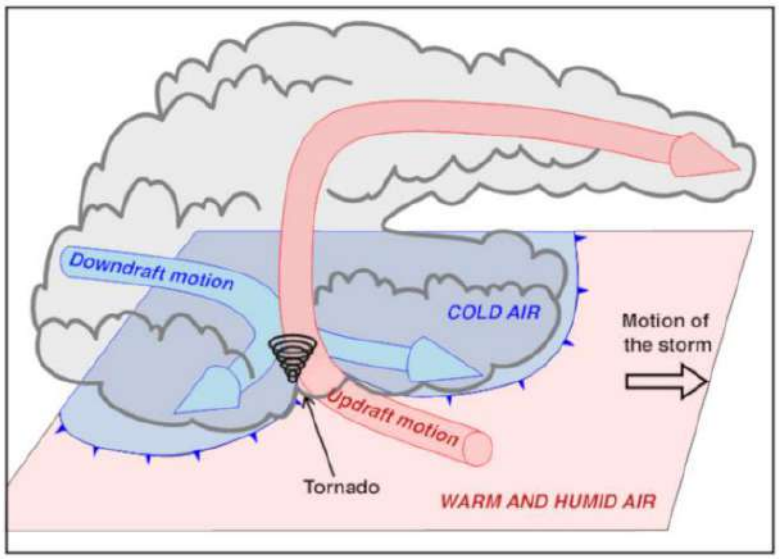

图 3 龙卷风出现在上升气流和下沉气流的交界处，在风和温度的梯度最大的位置。（图三 downdraft motion 下沉运动，updraft motion 上升运动，tornado 龙卷，motion of the storm 风暴运动，warm and humid air 暖湿空气，cold air 冷空气）

初始阶段，是上升气流改变涡旋的初始涡度和对其进行垂直输送的阶段，在此之后，下沉气流的发展表明涡旋的发展开始了一个新的阶段。在这一阶段，一方面涡度中心停止上升，下降到较低的高度。另一方面，暖空气和冷空气之间水平方向上的风和温度的梯度变大，加强了冷暖交界处的涡旋（图 3）。

这时，**云墙**出现，从云底开始发育，向着地面旋转生长，并逐渐肉眼可见其旋转状态。这种宽为几百米结构的出现，是强旋风将要发展为龙卷的标志。云墙旋转周期为几分钟，涡度为10^{-2} ~$10^{-1}s^{-1}$（是风切变阶段的 10 到 100 倍，且旋转风速达到 50 到 100 公里/小时）。涡旋被集中于上升气流和下沉气流之间的强降水、强阵风和持续的雷电活动区域，龙卷在云壁和地面之间形成。

风暴演化过程中，下沉气流不断向下输送较冷的空气团，使得低层冷空气的增加，从而进一步抑制了上升气流向上输送的温暖潮湿的空气。后者逐渐消失，涡旋强度在风暴内逐渐减小。涡旋失去了放大机制，同时因为冷空气的发展而变形，使得龙卷风在被拉伸和波动后逐渐崩溃。但是，短暂的间隔后，雷暴活动便可重新发展，并由于风切变再次产生环境涡度的倾斜、辐合和输送。因此，在同一个雷暴活动的传播过程中，经常观察到连续发生的龙卷风，这也使得龙卷造成的灾害更为可怖。

5. 龙卷的剖面

风暴产生涡旋的强度，决定了龙卷风的出现和破坏力。然而，由于涡旋尺度过小（最多几十到几百米），再加上其附近强劲的风，很难对其进行准确的观测。因此，目前与其有关资料的获取手段主要是光学手段（摄影测量），或是勇敢的实验人员在这些危险现象附近部署的移动气象雷达进行的远程观测。近年来，高分辨率的数值模拟也为研究人员提供了有用的信息。

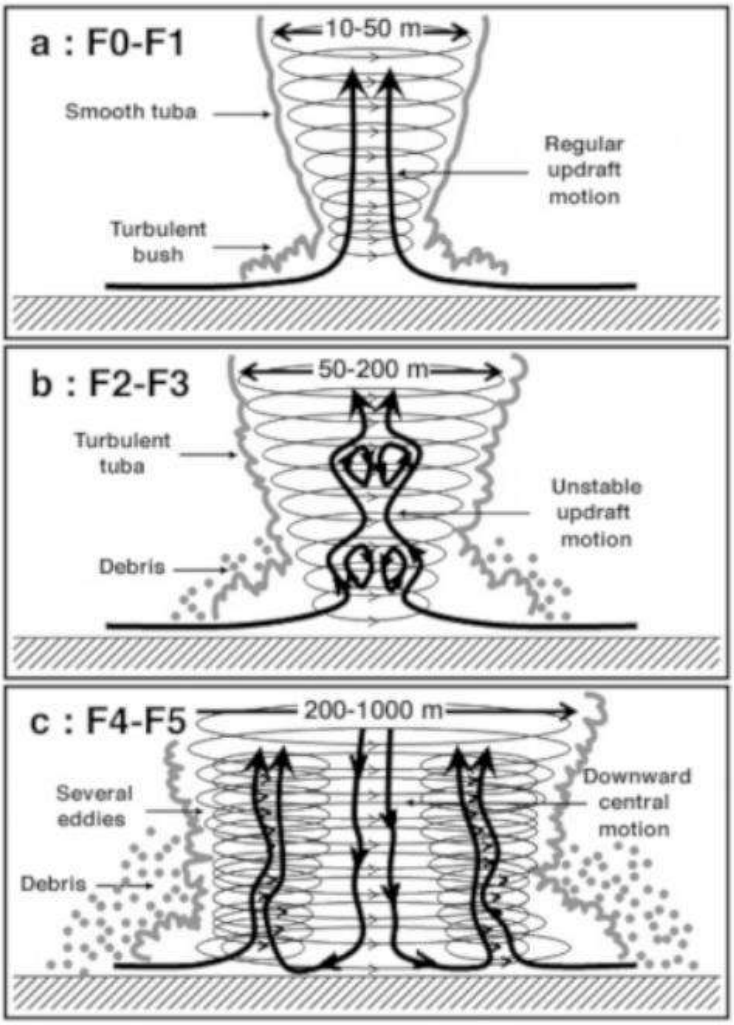

图 4 低(a)、中(b)和高强度龙卷风的特征。
（图四 smooth tuba 光滑喇叭状外表，regular updraft motion 规则上升运动，turbulent bush 湍流层，turbulent tuba 出现湍流的喇叭状外表，unstable updraft motion 不稳定上升运动，debris 碎片，several eddies 多个漩涡，downward central motion 中心下沉运动）

低强度龙卷(F0 到 F1 等级)，外表光滑，呈喇叭状，其中心有一个上升气流(图 4a)。气流流动非常规则，空气以恒定的角速度旋转，就像固体一样。这种情况称为**朗肯涡旋**。

中等强度龙卷(F2 到 F3 等级)，喇叭状的外表开始出现湍流(图 4b)。在高空形成与四周脱离的垂直速度沿中轴向下的区域。随着强度的增加，喇叭状外观扩张和涟漪，这些区域变得越来越广，并朝着地面方向发展。

高强度龙卷风(F4 或 F5 等级)，下沉气流向下运动到环流中心(图 4c)，气流的圆柱对称性逐渐消失，二次漩涡通常在离轴几十米或几百米处形成，绕中心轴旋转。龙卷强度越大，二级漩涡的数量越多，在最强大的龙卷中，同时出现的二级漩涡最多可达六个。然而，它们被裹挟于强风从地表卷起的各种碎片中，很难从视觉上分辨。龙卷风是由所有这些漩涡组合而成的，所以最强大的那个龙卷在破坏中担任主角。

6. 如何保护自己？

除非你住在美国中部的龙卷风巷，否则遇到龙卷风的概率很低，但即便如此，知道如何处理这些危险现象是非常有用的。虽然低强度龙卷风(F0 和 F1)的旋风较为不剧烈，但它们可能吹落的树枝或瓷砖，甚至推翻轻型建筑物，这依然可造成物质或物理事故。如在风暴中，看见一个圆锥形旋风从云底向地面发展，那便是龙卷形成的迹象，此时，最好的方法就是寻求一个坚实建筑的庇护。

中等(F2 和 F3)和高(F4 和 F5)强度的龙卷风具有更严重的实质性后果，甚至可能危及人的生命。它们的主要特征是旋转开始出现湍流和碎片涡旋的宽度加大。同时，这一强度的龙卷还伴随着类似于火车经过或飞机起飞时巨大的噪音。首先，这一强度龙卷风风暴蔓延非常迅速，速度高达 100 公里/小时。所以，当附近发生龙卷风时，最好是在现场保护自己，而不是试图逃跑，即使当时你拥有一辆车，因为龙卷风最终都会赶上。

建筑物或地窖的地基可提供最好的保护。退而求其次，可以躲藏在最中央的房间，用毯子或床垫保护自己。最重要的是，避免站在门窗附近，因为门窗很容易被强风刮掉或砸碎，然后会使你暴露在高速飞舞的碎片中。如实在没有坚硬的建筑，可以躺在水槽里，用你的手臂护住你的头，越紧越好。无论如何，切忌呆在一个很容易被龙卷风带走和摧毁的结构中，如汽车、卡车、大篷车、移动房屋等等。然而不幸的是，这是大多数受害者犯下的致命错误，他们错误地认为这些地方是安全的。

参考资料及说明

[1] T.T. Fujita, 1981: Tornadoes and Downbursts in the Context of Generalized Planetary Scales. J. Atmos. Sci. , 38, 1511-1534.
[2] J. Dessens and J.T. Snow, 1989: Tornadoes in France. Weather Forecasting, 4, 110-132

译者：许高洁　　审校：谭吉华教授　　责任编辑：王文雯