

热带气旋形成的预报至今仍是一个难题，在预报技术上主要依靠卫星遥感资料的应用和全球业务数值预报模式的改进。目前全球业务数值预报模式对热带气旋发生的预报能力是在逐渐提高的，但对于异常的情况，还是不易报出来的。例如有的热带气旋发生的很突然或此热带气旋发生在风的垂直切变高值区或少有热带气旋发生的海域，这些情况都会对模式的发生预报产生负面影响。另外，预报员的经验或概念模式（conceptual model）在热带气旋发生预报上仍很有用。卫星遥感资料能较早地显示出热带扰动或胚胎的存在，按其所在洋面的海温、垂直切变、湿层厚度和稳定度、附近强对流系统（MCSs）是否与其合并以及低空涡度场的强度和发展趋势等大致可以判断这个热带扰动是否会加强成台风。

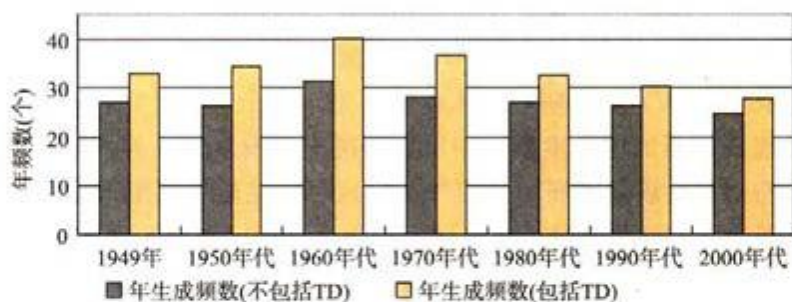


图 1.4 1949—2010 年西北太平洋和南海热带气旋频数的年代分布

不同海域对热带气旋发生预报的紧迫性不同。西北太平洋的台风和北大西洋、东北太平洋的飓风生成后会在洋面上漂移多时才会登陆，沿岸国家有较多的准备时间。而西南太平洋、南印度洋、孟加拉湾等海域热带气旋发生点与陆地之间距离短，澳大利亚东西和北部海岸在西南太平洋、南印度洋热带气旋生成后就很快遇袭；印度东海岸和孟加拉国在孟加拉湾风暴形成后也会很快登陆。可见，热带气旋的发生预报对这些海域是十分重要而又紧迫的。

1.2 台风结构和强度

1.2.1 结构框架

自然界有很多现象呈圆形、椭圆形或涡旋状的运动形态，大至宇宙星云（cosmic nebula）、银河系（the galaxy）、太阳系，小至台风（typhoon）、龙卷（tornado/spout），甚至直径数米的尘卷风（dust swirl）皆如此。台风就是一种大气涡旋（vortex）。台风的大小各异，大台风的直径上千千米，可谓超级

台风，小台风二三百千米，可谓微型台风 (midget typhoon)。虽然大小不同，但却五脏俱全，结构特征大同小异。

台风作为大气涡旋，气流旋转方向南北半球是相反的，北半球台风中的气流是向逆时针方向旋转的，南半球为顺时针方向旋转。

台风结构最为显著的特点是台风眼，它位于涡旋之中，若涡旋是圆对称的，眼就位于圆心附近。台风眼中为下沉气流，为静风，“万”里无云。台风的宏观结构可分成6区 (图 1.5)，A 为眼区，即晴空区，B 为眼外的深厚云墙，由强烈上升运动造成深厚积云对流，形成壮观的眼壁。台风中最强的风速出现于此，最暴烈的狂风暴雨也出现在 B 区。A 区和 B 区合起来称为内核 (inner core) 区，内核的直径二三十千米到上百千米不等。有的台风有两个眼，称同心双眼 (homocentric eyes)，也有两眼并列 (coexisted eyes) 的台风，但却极为罕见。

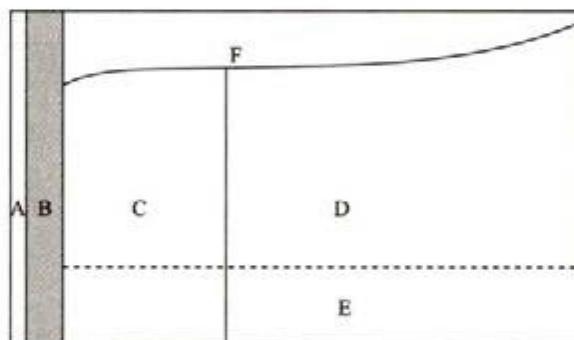


图 1.5 半个台风的垂直剖面 (另一半为对称分布)

台风眼的特征与台风强度有一定联系，但又并非简单线性关系。眼区收缩，眼墙紧密，这是很强台风的特征。台风眼放大，眼壁组织疏松，云墙松散，这是台风减弱、行将衰亡的特征。眼扩大松散往往是眼区中尺度强对流运动衰败的结果、有很多原因都可以引起这样的结果，干冷空气卷入内核便是其中的一种。同心眼墙往往出现在较强台风中，弱台风少见这种现象。外眼墙的形成往往会使原来的眼墙萎缩，而使台风减弱。并列双眼往往是两个台风合并后的遗迹，合并之后，台风会迅猛加强，但并列双眼仍保持逆时针方向的互旋运动。这是台风中的奇观，可能数十年一遇。台风眼壁特征与强度的关系及其物理联系是一个很有兴趣的题目，有待深入研究。

C 为外包区 (envelope region)。该区紧挨着内核区，风速虽比内核区减弱，但仍较为强劲，台风结构中最为耀眼的螺旋雨带 (spiral rain belt) 的主体就出现在此。该区与内核区有较多的相互作用，环境与内核区的相互作用也要通过这一区才行。

D 为外围区 (outer region)。该区紧挨着外包区，其水平尺度是外包区的

数倍，逆时针方向旋转的风速在该区有明显减弱，但仍有很强破坏力。该区与外包区有明显相互作用和能量交换，但与环境有更多的相互作用和相互影响。水平环境对台风的影响要通过这一层才能起作用，例如干空气的侵入等。

E 为流入层 (inflow layer)。台风在低气压阶段，四周的空气是向中心流入的，边界层内这种流入是由边界层内涡旋摩擦作用所致，边界层上部这种流入现象减弱。随着热带气旋的增强，切向风增大，这种流入现象也会减弱。台风登陆以后，其大量积聚的能量因陆地摩擦在该层耗损。

F 为流出层 (outflow level)。该层位于台风之顶，对流层顶之上。该层气流呈反气旋式 (南半球为气旋式) 向外流出，流出层具有将台风气柱中的空气质量向外抽吸的作用，从而使台风中心和气柱内气压急剧下降，使台风加强。抽吸作用也会使低空流入气流向上的垂直运动加强，使台风内核区得到更多的潜热能量，加强上空的反气旋和流出气流，这是台风的一个重要加强机制。

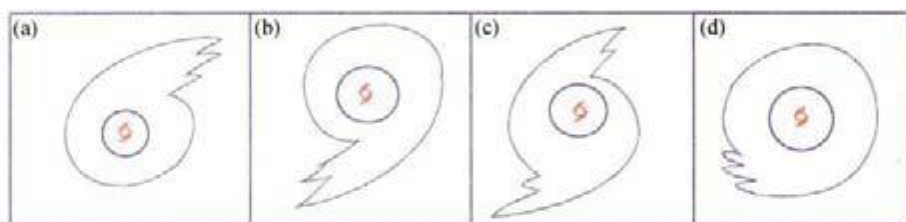


图 1.6 F 区流出层不对称结构形态示意图

(a) NE 单通道, (b) SW 单通道, (c) 双通道, (d) 无通道

流出层对台风的加强发展很重要，但在对流层上层平流层下层强风速环境流场的影响下，往往呈现较强的不对称分布。其总体形态可分为四种：流出气流指向东北 (NE) 方向，这种通道往往是西风槽前西南气流或西风急流造成，这种非对称流出气流往往出现在转向或较高纬度的台风中 (图 1.6 (a))，当台风位于高层反气旋 (副热带高压) 的西脊点时也会出现此类流出通道；指向西南 (SW) 方向流出通道的台风 (图 1.6 (b)) 一般位于较低纬度转向之前，通常位于高空反气旋的东侧或东风波的西侧；具有双流出通道 (图 1.6 (c)) 的台风在高空急流和东风波共同作用下形成两个流出通道；无通道 (图 1.6 (d)) 台风往往位于高层反气旋之中。流出通道的建立对台风急速加强十分有利。

1.2.2 气压、风、温度结构

台风是一个低气压逆时针旋转的涡旋系统，气压、风和气温在这个系统中发生着急剧的变化。观测结果可用一个示意图 (图 1.7) 表示。在穿过台风中心的垂直剖面示意图上，从外围区、外包区到台风眼中心，气压发生急剧的降低，到台风眼达到最低点。与此相反，台风的切向风速向中心急剧增强，

到眼壁云端处风速达到极值，该处即为台风最大风速之所在。然后，再经过很短距离，它从最大风速降为台风眼中心的无风区。这样一种风速突变现象在每一个台风或飓风中都得到了证实。下面举一个例子来说明这种结构特征。

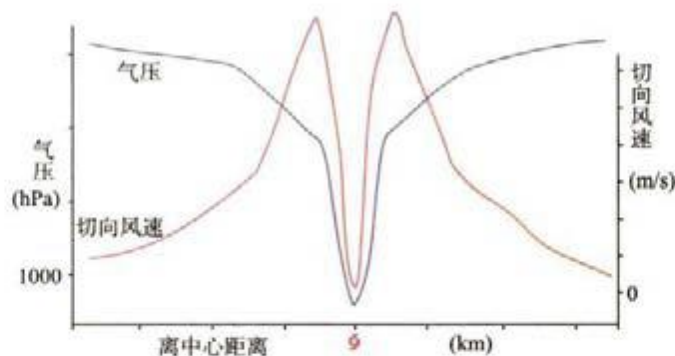
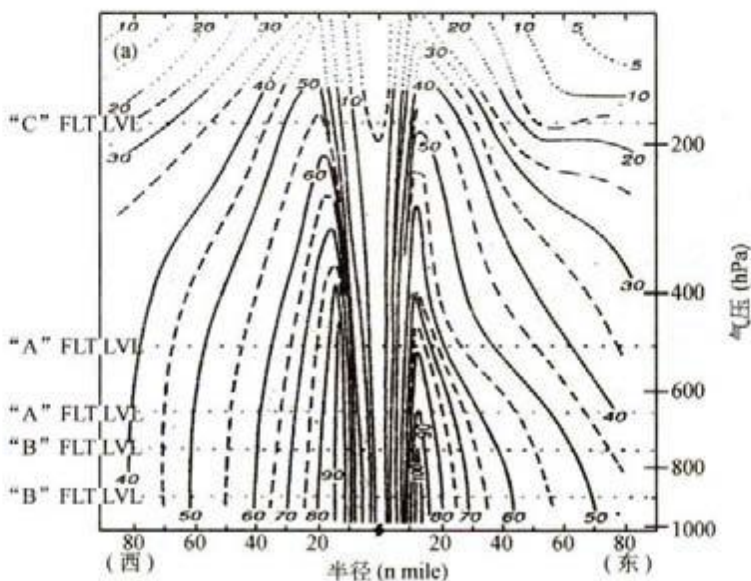


图 1.7 穿过台风中心点气压和切向风速的垂直剖面示意图
(注：横坐标为距离，纵坐标分别为气压 (hPa) 和切向风速 (m/s))

对 1964 年 Hilda 飓风的探测结果显示 (图 1.8 (a)) (Hawkins, Rubsam, 1968)。在台风的 eye 区出现了非常强的切向风速梯度，这在其他相同尺度的天气系统中是见不到的。另外，在 250~300 hPa 的高度上台风内核区上空出现了一个非常强的正温度距平区 (图 1.8 (b))，这是台风结构中的另一个特色。内核区上空存在着的这块暖中心是眼壁强垂直运动将水汽输送到上空凝结潜热释放加热所致。这是一个台风的主要能量所在，它驱动着台风运转 (逆时针旋转、流入气流、上升运动、流出气流、眼区和外围下沉运动等)。



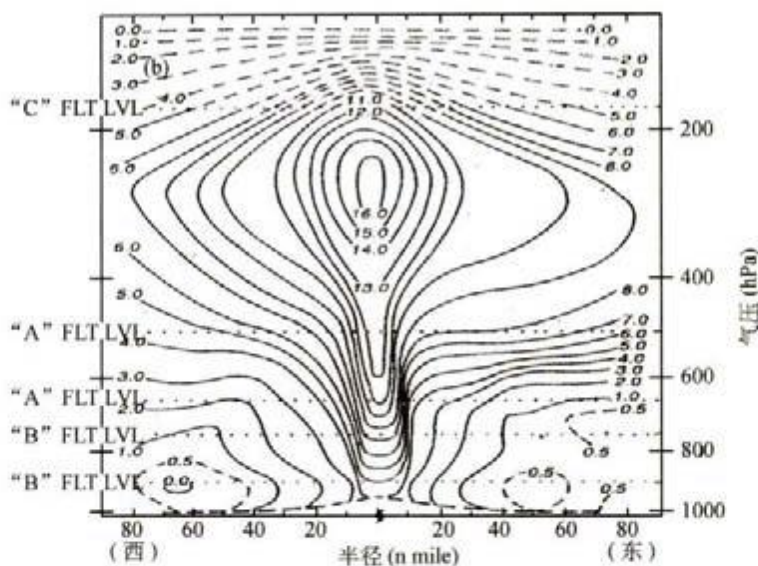


图 1.8 飓风 Hilda (1964) 的切向风速 (n mile/h \approx 0.514 m/s) (a) 和温度距平 (b) 沿纬向的垂直剖面图 (Hawkins 和 Rubsan, 1968)

1.2.3 螺旋雨带

在台风范围内存在螺旋状结构的云带或雨带 (图 1.9), 通称为螺旋雨带, 通常带宽为 20~100 km。在台风范围内通常有几条雨带并存, 并由外到里向台风眼卷入。带与带之间存在狭窄的无云带, 该带区域有下沉气流。螺旋雨带由对流单体组成, 单体不断新生, 并移到晴空带边缘消失。几条螺旋雨带向里卷入到眼壁云墙处汇合而成对流环, 对流环和螺旋雨带往往伴随着大暴雨。

螺旋雨带具有移动或传播特征, 通常认为大多数螺旋雨带是重力内波传播的结果。从另一个角度看螺旋雨带, 把台风中心看成北极, 这些螺旋雨带就非常类似于北半球中高纬度绕极运转西风带 (westerlies) 中的长波。1939 年, 罗斯贝发现了这类地球大气长波的传播规律, 这类长波被命名为罗斯贝波。后来的研究发现, 热带气旋中的螺旋雨带不仅在外观上与罗斯贝波相似, 而且能量转换和动量传输等本质方面也有惊人的相似 (余志豪, 2002)。因此这类螺旋雨带就被称为涡旋罗斯贝波 (Vortex Rossby Wave)。涡旋 Rossby 波的理论可以有效地用来研究台风螺旋雨带的移动、传播、结构特征和强度变化。

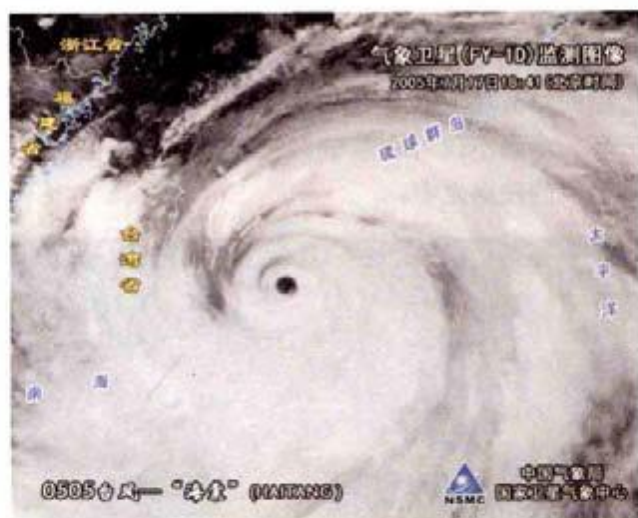


图 1.9 2005 年台风“海棠”中的螺旋雨带和台风眼

1.2.4 台风有关的中小尺度系统

在台风移行前方（前缘），有时会出现伴随台风的弧形中尺度辐合线，简称为“台前飏线”（squall line）。飏线和台风环流之间有一条狭长的无云带，这是台风外围边缘之外的下沉运动区。飏线区域的辐合和强上升运动和台风作为一个大气扰动激发出来的次级波动有关。有时台前飏线还孕育（spawn）着小尺度的龙卷（spout），登陆地点先遭飏线和龙卷袭击，之后又受台风之灾，雪上加霜，灾害更为严重。

龙卷不仅会在台前飏线中生存发育，它还多寄生于台风本体环流之中。图 1.10 用 38 年资料显示了飓风中龙卷在其各个象限的分布，但集中出现在右前象限（第一象限）（Hill 等，1966）。龙卷不仅出现在飓风中，也同样出现在台风中。

据浙江省气象台报告，台风圣帕（Sepat, 0709）于 2007 年 8 月 19 日登陆浙江，携带了一个龙卷。台风中寄生着龙卷的现象相当普遍，福建、浙江、江苏、上海等地时有发生。同样，登陆日本的台风也时有龙卷寄生其中。另外，台风中的龙卷常出现在登陆台风残涡中，并以向北移动的台风出现龙卷的次数较多。

1.2.5 台风中的小涡和切变

台风中除了上述强烈天气系统外，还常见中尺度小涡和切变在台风环流中存在，台风暴雨在这些中尺度系统上急剧加强。令人惊叹的是，美国国防

气象卫星在 2003 年 9 月 12 日 13—15 时在一个登陆美国的五级飓风“伊莎贝尔”(Isabel) 可见光云图内核区竟发现了除台风眼以外, 其他 5 个中尺度小涡生长在眼墙云壁的对流环上(图 1.11), 这种罕见现象被称为海星状(starfish pattern)云环。小涡不仅可在眼壁对流环上形成, 也可在螺旋雨带上形成, 多见于登陆台风的残涡之中。

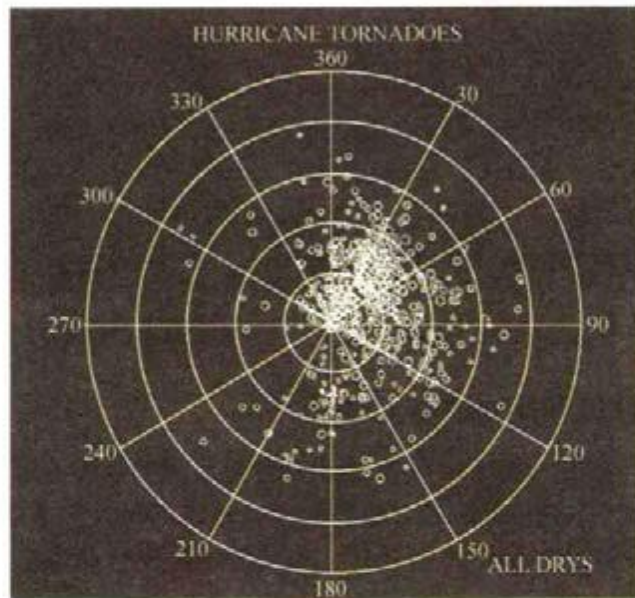


图 1.10 38 年飓风中龙卷分布 (McCaul, 1991)

(注: 极坐标原点为 38 年有龙卷飓风的中心位置, 散点为龙卷位置)



图 1.11 2003 年 9 月 12 日 15:00 UTC 美国国防气象卫星可见光云图, 5 个中尺度小涡分布在飓风 ISABEL 的眼区内 (CIMSS, 2003)

台风中的中尺度切变线常形成于登陆前后，是台风环流与地形和环境气流相互作用的产物。图 1.12 (a) 给出了这类切变线常见的部位。最常见的切变线 A 是东南风潮湿气流与东北风干流形成的切变，又称为台风倒槽 (inverted V-shape trough)。倒槽使得雨区向北扩展，形成南北不对称的降雨分布。在福建登陆的台风，有时在北面浙江下的雨远远超过台风中心所在的福建。台风在浙江登陆，有时江苏、上海、安徽、山东可下很大的暴雨，这种现象都和这个切变线的活动有关。切变线 B 和 C 虽然不如切变 A 多见和重要，但也常常形成局部性大暴雨。尤其是在切变线 B 中生成的中尺度强对流系统，会在华南登陆台风的西部或华东登陆台风的南部产生特大暴雨。登陆台风当有冷空气侵入时，偏北风和偏东风或东南风之间也会形成中尺度切变 (图 1.12 (b)) 或中尺度锋面。这种中尺度切变会制造涡度、抬升暖湿空气，提供不稳定能量，加强上升运动，形成新的暴雨中心。

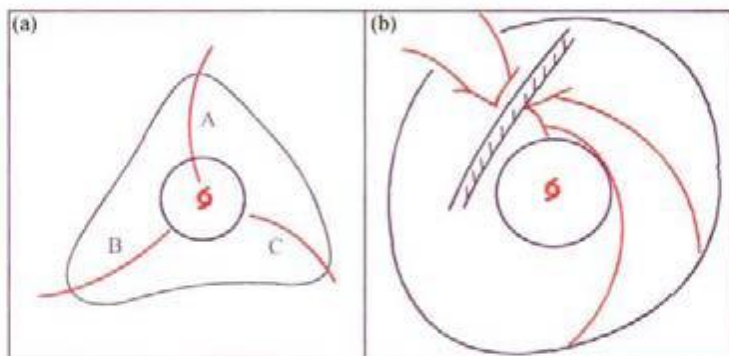


图 1.12 台风中的中尺度切变线示意图

陆面上的山脉地形和冷空气作用通常有利于登陆台风内部中尺度小涡和中尺度切变的形成。因此，台风残涡在变性 (extratropical transition) 过程中，在有利地形作用下，就会制造出这类残涡中的中尺度强对流系统或龙卷。

台风或其残涡中的中尺度系统产生后，会按台风环流和地形特征移动传播，一路下着暴雨。这类中尺度系统的寿命一般为 4~12 h，老的衰亡，新的还会再生。对于一个静止少动的残涡，新的中尺度对流系统还会在老地方再生，犹如系统生成的“源” (source)，生成后沿类似路径移出，并在另一个相近的地方消亡，那里犹如一个“汇” (sink)。重复几次，特大暴雨就在所难免。中尺度系统寄生于残涡之中，吸收其能量维持生命，并产生强降雨，残涡则在摩擦耗散和中尺度系统的损耗下最后衰亡。

1.2.6 台风的强度

台风的强度由三个要素来确定。(1) 台风内核的强度 (intensity)。它由两个参数来表示, 即台风对流环区底层的最大风速 (V_{\max}) 或台风中心海平面最低气压 (P_{\min})。这两个参数不是独立的, 而是相互依赖的。 P_{\min} 愈低, V_{\max} 就愈大。用其中一个参数就可以表示内核区强度。另外, 研究结果表明, 台风在加强期, 眼区的对流活动旺盛, 并伴随着眼的收缩。眼的放大和松散表明了台风的衰减。因此眼的大小在一定程度上表明了台风的强度。(2) 台风外包区或外围区平均风速的强度 (strength)。有的台风中心强度 (intensity) 不大, 而外包区和外围区的风力 (strength) 却很大。(3) 尺度和大小 (size)。这里是指台风气旋性环流范围的大小, 或最外一圈闭合等压线的平均直径, 有的上千千米, 有的二三百千米, 大小悬殊, 因此也是结构或强度大小的一个参数。

表示台风强度的三个参数尤以台风中心强度 (intensity) 作为台风强度的主要参数。按中心附近最大风速的大小, 我国对热带气旋有不同的名称 (表 1.2)。

表 1.2 中国对西北太平洋热带气旋强度的划分和相应名称

热带气旋等级名称	中心附近最大持续 风速 V_{\max} (m/s)	蒲福 (Beaufort) 风力等级
热带低压 (TD)	10.8~17.1	6~7
热带风暴 (TS)	17.2~24.4	8~9
强热带风暴 (STS)	24.5~32.6	10~11
台风 (TY)	32.7~41.4	12~13
强台风 (STY)	41.5~50.9	14~15
超强台风 (Super TY)	≥ 51.0	16级以上

台风是尽人皆知的通俗名称, 严格地说, 它只是热带气旋中的一个等级。比它弱的有风暴和低压, 比它强的有强台风和超强台风。对于大西洋和东北太平洋上飓风的强度划分和名称 (表 1.3) 也有不同的规定。

虽然两大洋区对热带气旋划分不一, 但台风和 1 级飓风的强度还是一致的, 均为蒲福风力等级的 12~13 级。西北太平洋的超强台风相当于北大西洋的 3 级飓风和 3 级以上的飓风。联合国世界气象组织 (WMO) 对全球热带气旋的强度作过统一划分。表 1.2 中热带低压到台风 4 个等级就是按 WMO 划分的强度等级确定的, 这和国际规定一致。12 级大风已经可以拔树倒屋, 测风仪器也可被摧毁, 故过去对 12 级以上就没再细分。随着近代大气探测能力