

图 2.11 1980—2004 年间台风造成我国大陆的直接经济损失占当年国内生产总值的比率
(粗直线为线性变化趋势线)

2.2 风灾

引发风灾的天气系统较多,除了台风,还有寒潮、强对流雷雨、飚线、沙尘暴和龙卷风等多种尺度的系统,它们各有特征,其中寒潮大风影响范围最大,强对流雷雨大风的突发性和孤立性明显,两站以上同时发生雷雨大风的概率不足 10%,龙卷风的水平尺度则更小,直径仅数米至数百米,而台风风灾是台风引发的主要灾害之一,其影响范围较大,危害性和破坏性强。

一般而言,因受陆地地形的阻挡和摩擦作用,导致风灾的台风风力的大小及危害程度呈现出沿海岛屿大于沿海海岸带和沿海地带大于内陆地区等气候特征,例如,浙江东部沿海地区台风最大风力在 12 级以上,浙北平原可达 10~12 级,而浙江中部因受山脉阻挡台风风力为 8~10 级,浙西山区的台风风力一般降至 8 级以下;台风登陆福建省时,其内陆地区风力也不大,仅少数可达 8 级左右。

2.2.1 台风风灾的定义

台风大风导致的灾害统称台风风灾,其主要表现为:(1)海上航行或港口锚泊的各种船舶受不同程度的损坏,严重者倾覆甚至沉没;(2)农作物大面积倒伏或抽穗扬花期严重影响作物生长,导致减产或绝收;(3)果树、甘蔗、林木等经济作物受强风损毁而减产;(4)海上石油勘探和平台生产设施受损;(5)沿海渔业和海洋养殖业设施受损,导致水产业减产;(6)海港码头装卸运输设施受损;(7)城市建筑工程设施、高层建筑和道路旁的广告牌被摧毁;(8)城市交通运输受阻、事故频发。

在绝大多数情况下,台风大风的分布是非均匀的,在整个台风环流区内同时出现强风的可能性极小,主要集中于最大风速区,在较多情况下最大风速区只有一个,通常位于台风移行方向的右侧离中心近百至200余km处,即在发展最强烈的台风云墙附近地区,最大风速值所在地与台风中心的间距称为最大风速半径,其大小与台风强度密切相关。

1805年英国人蒲福(Francis Beaufort)按照风力对物体的不同影响程度确定的风力等级已为各国气象界广为沿用,被称为“蒲福风力等级”(表2.1)。由表可见,热带气旋的近中心最大风速在17.2~24.4m/s范围内时,风力等级为8~9级,此时其强度等级为热带风暴,抗风能力在8级以下的船舶均须进港锚泊。海面上8级大风对船舶的破坏力不可轻视,在陆地上也可将树木的微枝折断,迎风步行感觉阻力甚大,而9级风可使汽船航行困难;12级风的水平风速大于32.7m/s,其风力垂直作用于物体时,产生的风压极具破坏力,若建筑物结构的风荷载不胜此强风的风压时,就会被风力彻底摧毁。除了最大风速区相对持续的强风外,在台风云墙外围螺旋云雨带中常见伴随中小尺度强对流系统的阵性强风,以及在台风前沿有时形成飚线处伴生的强烈阵风。

风灾往往又与其他台风灾害同时出现,如狂风伴随巨浪对船舶的损害、狂风激起风暴潮冲毁海塘、堤坝或导致海水漫滩、狂风夹带暴雨引发的洪水灾害、暴雨倾盆情况下强风拔树可触发山体滑坡和泥石流等次生地质灾害,可谓“你中有我,我中有你”,较难分清何种致灾因子为罪魁祸首,这可能是至今未见台风风灾的确切定义的原因所在。由于风灾是由风的破坏力作用于人或物所致,这就引发了这样的问题,即台风风力对不同承载体破坏力与风力大小的关系,对此目前尚缺乏较全面的研究,亟待对台风风灾的致灾因子(台风区域内各类强风)结合其承载体状况开展研究,在此基础上,才能提出台风风灾的较全面的科学定义。

2.2.2 台风风灾的标准

由于台风灾害形成因素的复杂性,根据灾害情况有时较难区分其致灾气象因子是单一的强风、暴雨、巨浪抑或是风暴潮。此外,台风的狂风暴雨还可以引发山体滑坡和泥石流等次生地质灾害,因此长期以来也尚未拟定出台风风灾的严格标准。

台风的风力强度和大风持续时间只是致灾主要气象因子之一,导致灾害的发生和灾情的严重程度还取决于台风预警、预报的时间和空间的准确率以及受灾体状况(人口密度、作物状况、建筑物结构等),包括与之密切相关的

社会环境和经济发展水平，以及防台抗灾措施的及时性和有效性等。

表 2.1 蒲福风力等级表 (大于 7 级风的部分)

风力等级	海面浪高 (m) 一般/最高	海面和海船征象	陆上地面物征象	距地 10 m 高处 风速 (m/s)
8	5.5/7.5	近港渔船皆停留不出	微枝折断, 人步行感受阻力甚大	17.2~20.7
9	7.0/10.0	汽船航行困难	建筑物有小损, 烟囱顶部及平屋摇动	20.8~24.4
10	9.0/12.5	汽船航行颇危险	树木拔起或建筑物损坏较严重	24.5~28.4
11	11.5/16.0	汽船遇之极危险	必有广泛损坏	28.5~32.6
12	14.0	海浪滔天	摧毁力极大	32.7~36.9
13	—	—	—	37.0~41.4
14	—	—	—	41.5~46.1
15	—	—	—	46.2~50.9
16	—	—	—	51.0~56.0
17	—	—	—	56.1~61.2

至于台风风力大小则主要与台风强度密切相关, 气象界用台风中心附近最大风速或台风中心最低气压来表征台风强度, 研究工作者还有用台风水平尺度 (7 级、10 级风圈半径) 等作为衡量台风强度的辅助参数。然而, 人们对于台风强度主要还是凭借能直接感受的台风风力强弱来体验的, 人对台风中心气压是无法直接感受的。鉴于台风强弱与台风风力的大小密切关联, 因此气象业务部门常用台风近中心最大风速来表征台风强度。世界气象组织正是依据热带气旋内核区的最大风速将热带气旋划分为 4 个强度等级, 就是: 热带低压 (Tropical Depression, 最大平均风速在 10.8~17.1 m/s)、热带风暴 (Tropical Storm, 最大平均风速在 17.2~24.4 m/s)、强热带风暴 (Sever Tropical Storm, 最大平均风速在 24.5~32.6 m/s) 和台风 (Typhoon, 最大平均风速大于 32.6 m/s), 各国又根据具体情况制定热带气旋的强度级别。日、朝、韩和东南亚各国采用“台风”作为最强的级别, 北美和中美洲各国则采用“飓风”作为最强级别, 而印度和澳大利亚却统称其为气旋 (Cyclone)。

长期以来, 我国将强于热带低压的热带气旋统称为台风, 1989 年 1 月开始采用国际通用的 4 个强度等级标准和名称, 并以通用的蒲福风级确定为 4 级, 即: 热带低压 (近中心最大平均风力 6~7 级)、热带风暴 (近中心最大平均风力 8~9 级)、强热带风暴 (近中心最大平均风力 10~11 级) 和台风

(近中心最大平均风力等于或大于 12 级)。由于风力等级划分与灾害程度的关联不明确、不清晰,特别是台风的风力标准没有上限,这与防台减灾的需求显然不相适应,为此中国气象局于 2006 年将原定的 4 个等级改为 6 个等级,即维持前 3 级,将原第 4 级(风力等于或大于 12 级的台风)按风力细分为:台风(近中心最大平均风力 12~13 级)、强台风(近中心最大平均风力 14~15 级)和超强台风(近中心最大平均风力大于等于 16 级)。这类似于美国国家海洋大气局根据风力和潜在破坏力划分的 5 个飓风级别(NOAA, 2009),即:

(1) 1 级飓风:其平均最大风速为 74~95 mile/h* (32.7~42.5 m/s),风暴潮增水 4~5 ft**,对建筑结构没有实际的破坏力,主要对未加固定的活动房屋、灌木和树木有影响。如 2004 和 2007 年的飓风 Gaston 和 Humberto。

(2) 2 级飓风:其平均最大风速为 96~110 mile/h (42.6~50.9 m/s),风暴潮增水 6~8 ft,对灌木和树木可有明显损坏,有些树木可被折断;对活动房屋、码头和未加固的招牌也有相当大的损坏;在飓风中心抵达前 2~4 小时沿岸和低洼地带的撤离道路会被海水淹没;在无保护的碇泊处小船的缆绳会被松脱。如 2008 和 2010 年的飓风 Dolly 和 Alex。

(3) 3 级飓风:其平均最大风速为 111~130 mile/h (51.0~58.1 m/s),风暴潮增水 9~12 ft,小型居屋和公共用房的一些结构和少量幕墙被损坏,对矮灌木和树木有较大影响,树叶被刮走,大树被吹倒,活动房屋和装置不牢固的招牌和广告牌会被毁坏。在飓风中心抵达前 3~5 小时,低洼地的撤离道路会被上涨的河水阻断。近岸的漫滩海水会冲毁较小的建筑,而大的建筑物会因漂浮物的撞击而损坏。在拔海高度低于 5 ft 的地带可能会被水淹没至离岸 8 mile (13 km) 或更远的内陆地区。近海岸线低洼地的若干街区居民可能需要疏散。如 2004 和 2010 年的飓风 Jeanne 和 Karl。

(4) 4 级飓风:其平均最大风速为 131~155 mile/h (58.2~69.2 m/s),风暴潮增水 13~18 ft;有些小型住房的屋顶结构与较大面积幕墙一起被完全毁坏,灌木、树木和所有招牌被吹倒,活动房屋完全被毁坏,大量门窗被吹坏;在飓风中心到达前 3~5 小时,低洼地的撤离道路可能被河水上涨而阻断;沿岸建筑物低层将遭受严重损坏;拔海高度低于 10 ft 的地方可能被水淹没,居民区需要大规模撤离到离海岸 10 km 的内陆地区。2004 年登陆飓风 Charley 就是 4 级飓风,它在美国佛罗里达的 Cayo Costa 附近沿海登陆,Charlotte 观测到的最大瞬

* mile/h 为英里/小时, 1 mile/h \approx 0.447 m/s

** 1 ft (英尺) = 0.3048 m

时风速达 150 kt (77.1 m/s); 2005 年侵袭古巴岛的飓风 Dennis 也是 4 级飓风。

(5) 5 级飓风: 其平均最大风速 ≥ 156 mile/h (≥ 69.3 m/s), 风暴潮增水大于 18 ft; 大多数住房和厂房的屋顶会被完全摧毁; 一些小型公用建筑被完全摧毁, 或被大风刮倒或被吹走; 灌木、树木和招牌全部被吹倒, 活动房屋完全被破坏, 大量门窗被严重损坏; 低洼地的撤离道路会被上涨的河水切断; 位于拔海高度低于 15 ft 和离海岸 500 码以内的所有建筑物的低层会遭受较大的毁坏; 在离海岸 5~10 mile (8~16 km) 内的低地居住区需要大规模撤离。自有记录以来, 仅有 3 个 5 级飓风登陆美国: 1935 年的“劳动节”飓风 (“Labor Day” Hurricane)、1969 年飓风 Camille 和 1992 年 8 月的飓风 Andrew。1935 年劳动节侵袭佛罗里达州外岛暗礁的飓风中心最低气压为 892 hPa—美国观测到的最低气压; 飓风 Camille 侵袭密西西比湾沿岸形成 25 ft 高的风暴潮, 使帕斯克里斯琴 (Pass Christian) 被淹没; 墨西哥湾的 5 级飓风 Katrina 在侵袭美国沿岸时其强度虽已减弱为 3~4 级飓风, 但造成经济损失达 1338 亿美元, 为侵袭美国经济损失最大的飓风。此外, 2005 年飓风 Wilma 在最强时达到 5 级飓风强度, 也是有记录以来大西洋最强的热带气旋, 其中心最低气压为 882 hPa。

过去我国没有根据风灾程度拟定的热带气旋强度等级标准, 虽然美国的飓风等级标准有一定参考价值, 但大西洋飓风与太平洋台风的风力特征、两国的经济发展水平、社会生活和台风风灾状况均有差别, 飓风强度等级与风灾关系并不能完全适用于台风, 需要加强探测研究登陆台风近地层风的特性、风速谱、湍流能量等和强台风风场的时空分布特征, 以及强风对建筑结构、农作物和经济作物生长、沿海海洋工程设施、海洋养殖业和渔业等风灾效应的影响, 并在充分调查台风灾情的基础上研究提出适合我国国情的台风灾害影响等级标准。2002 年中国气象局气象科学研究所曾组织气象业务部门在广东沿海对 0214 号登陆台风“黄蜂”开展了现场探测, 获得了“黄蜂”大气边界层风结构的第一手资料; 2007 年, 中国气象局上海台风研究所在有关省市气象部门密切配合下, 开展了台风现场探测试验, 应用装备有低层风廓线仪、GPS 探空仪、超声风温仪、微波辐射计、地面自动气象观测等先进的车载探测仪器设备, 对两个登陆台风成功实施了现场跟踪探测, 获取了台风影响和登陆时的大风风速、脉动风、湍流结构、风的梯度变化等实测资料, 并会同有关部门对“罗莎”台风灾情开展了专项典型调查。上述探测资料的分析, 为拟订台风风灾标准提供了科学依据。2007 年 6 月中国气象局中央气象台已在广泛实地调研以及参考、借鉴国外发达国家台风灾害影响等级分类标准的基础上制定了《热带气旋灾害影响等级参考对照表》(详见本书第 4 章 4.1 节)。

2.2.3 台风大风的形成原因

台风移近海岸带时,常见到巨浪随强风起,拍岸潮涌高,风暴潮水翻越或冲毁海堤、海塘,使海水漫滩成灾,此时大风也起了推波助澜的作用,而台风登陆侵入海岸带陆地时,伴随而来的是狂风大作和倾盆暴雨,人们直接感受的往往是风雨交加,风助雨势。因此台风引发的大风、暴雨、洪涝和风暴潮这四种主要台风灾害经常是互为影响,然而它们毕竟并非共生,而是各有起因。事实上,台风侵袭时也有风小雨大或风大雨小或风大潮小等现象的出现,其原因在于其形成的机理各不相同。导致台风风灾的气象因子是伴随台风的强风,由于台风环流影响范围内的水平风速具有非均匀分布和多尺度的时空特征,而且还具有急剧变化和阵发的性状。根据澳大利亚4个气象观测站分别对移经或移近的4个热带气旋(南半球夏季1957年2月6日、1975年2月6日、1958年3月4日和1956年3月6日)用瞬时风速自记仪得到的风速随时间的变化记录,热带气旋逼近时的水平风速都不是渐进地增大,而是在平稳增大过程中忽大忽小地振荡变化,在中心眼区逼近时,沿海岛屿和平地比多山地区和高山的阵风性要小得多。

台风眼外围强对流云墙中垂直湍流十分强烈,上下层空气质块交替频繁,这是导致近地面风速阵发性振荡变化的原因之一,这种普遍存在于台风中的阵风比惯用的2 min或10 min平均风速要大。对于台风大风的形成机理需要从下列几方面来阐述。

(1) 台风环流区风场的形成

与液态流体(如水流)的运动原理相同,空气质点的水平移动速度(即水平风速)是由大气压力的水平非均匀分布所驱动,即气压非均匀分布形成的气压梯度(气压水平差异的程度)促使空气从气压高处流向气压低处,这与水从水位高处流向水位低处的流动相似。在大尺度背景流场较弱的情况下,台风不仅仅是个气流逆时针(在南半球为顺时针)旋转的涡旋,同时也是一个强烈的低气压系统,其中心气压很低,曾观测到最强的西北太平洋台风中心气压为888 hPa,最强的北大西洋飓风中心气压为882 hPa(2005年5级飓风Wilma)。一般情况下,台风环流外围的环境气压大于1000 hPa,而台风的平均半径为数百千米,在此情况下,空气质点在近似同心圆形的台风低气压场中所受的主要作用力之一是指向台风低压中心的气压梯度力,它的大小与单位距离的气压差值成正比,如假设台风中心气压为900 hPa,平均半径为800 km,那么台风环流区内平均气压梯度为0.125 hPa/km,比中高纬度西风带或温带的低气压天气系统的气压梯度大数倍之多,由于驱动台风风速的气

压梯度力远大于其他低压系统的气压梯度力，因此台风风力之大超乎寻常也就不足为奇了。

台风低气压场可近似视为轴对称分布，这时作用于台风空气质点的力，除气压梯度力外，尚有离心力和地球自转偏向力，它们都与风速有关，离心力是空气质点流动速度（即水平风速）的平方与该质点离台风中心距离的比值，而地球自转偏向力则是水平风速与地转参数的乘积，地转参数是地球自转角速度 Ω 与地理纬度 φ 的正弦函数乘积的倍数，即 $2\Omega \cdot \sin\varphi$ 。这样，台风风场与气压场的关系可近似地由这三种力平衡来表达，称作梯度风平衡，如果已知轴对称分布的台风低气压场，就可以求解梯度风平衡式得到不随时间变化的（定常的）轴对称台风风场。即台风的气压场与风场是重合的。但实际上，风速与气压间只存在短暂的平衡状态，风压场间的适应过程是处于水平运动方程制约的非定常状态，即空气质点加速度决定了台风风压场间的动态变化。

（2）大范围流场中的台风风场

台风是一个气旋性（在北半球逆时针，在南半球顺时针）转动的涡旋，它随大尺度环境气流，即所谓的引导气流移动，这与湍急江水流经桥墩后出现的水涡旋随水流而下十分形似。在台风环流外围还存在其他大尺度的气压系统，例如，西北太平洋副热带高压、高压中心位于我国内陆的大陆副热带高压、位于南海和菲律宾海域的季风槽或热带辐合带等。在西北太平洋台风形成、发展成熟阶段，其北方或东北方常存在庞大的副热带高压，此时引导气流通常是偏东风或偏东南风，而且北方或东北方的副热带高压使轴对称分布的台风低气压场变成非对称分布，最大风速区往往位于台风前进方向的右侧或右前侧，同时，由于地表和地形的摩擦作用，最大风速常出现在离地面大约 700~1200 m 的大气边界层内。图 2.12 是根据美国国家环境卫星数据和信息局（NOAA/NESDIS）QuikSCAT 极轨卫星的散射遥感仪得到的海平面矢量风场和网格点风场资料（水平分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 经纬距）绘制的 2004 年台风“云娜”的海平面风场，图中显示台风涡旋环流中心位置与最大风速区（其近中心最大风速大于 27 m/s）也不是重合的。

（3）台风外围与中尺度系统间伴生的大风

在台风北侧外围有冷空气移近时，当有冷气流强烈下沉降至近地面与台风环流区外缘的暖空气相遇时，即有飑线形成，在雷达探测回波图上常呈现为台风云带外围的弧线状回波，飑线所过之处气压猛升、风向急转、风速猛增，瞬时风速可由 8 m/s 以下急增至 11 m/s 以上，但其持续时间不长，伴随飑线的强风在 50~80 m 高度处风速最大，破坏力也最强，因此对大城市的超

高层建筑或旷野的高压输电网威胁很大，甚至可瞬间拉倒庞大的高压输电塔架。与伴随强降水的雷雨大风比较而言，飊线大风呈现出范围较广，破坏力较大的特征。

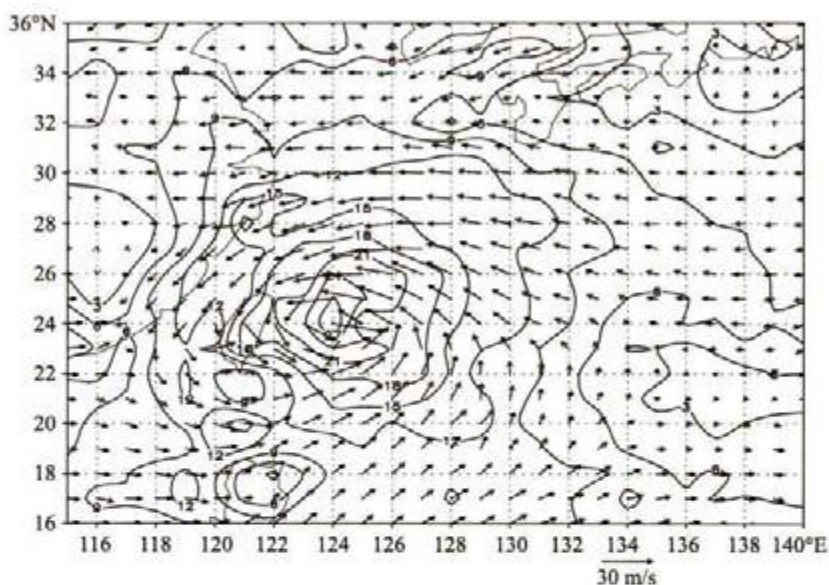


图 2.12 2004 年“云娜”台风的海平面风场分布
(实线为等风速线, 标注值单位为 m/s)

(4) 台风区域内伴随强对流系统的大风

①龙卷风。水平尺度很小的龙卷风是在强烈发展的积雨云下呈漏斗状下垂的猛烈旋风，其涡旋直径仅数米至数百米，中心气压极低，故风速极大，通常可达数十米/秒至百米/秒以上。根据流体力学原理，流体涡管必须是封闭的，两端开放的涡管是不存在的，强烈发展的积雨云底部前端在云内外气流夹卷时有可能形成水平轴向的滚动气流，即水平涡管，其两端在云移动方向左右侧下垂，并与地面或水面相接，其中呈气旋性旋转的一端水平气压梯度极强，此即龙卷风。接地的龙卷风破坏力极大，可摧毁房屋、树木等，人、牲畜、器物等常被卷入升空后抛掷至远处，龙卷风以数十千米/小时的速度移动，路径长者百余千米，短者仅数十米，生命史较短，持续数分钟到数小时即减弱消失。

②雷雨大风。在靠近台风眼壁的密集云墙和螺旋云带中发展强烈的对流云上空辐散流出引发的抽吸作用使低层空气辐合形成的急速气流和特大强降雨水滴的拖携形成的强烈下沉气流的近地流出，构成雷雨大风。

2.2.4 台风大风的影响

台风对沿海海域的各类舰船和海洋石油平台等的威胁主要来自狂风及其伴随的滔天巨浪，危害极大，常能倾覆船只和损毁海洋工程设施。为了防避台风的侵袭，在预报台风影响的海域，所有船舶都必须就近驶入避风港内锚泊，海洋石油勘探平台也需采取加固措施，甚至拖离危险海域，以免损毁或倾覆；在台风近海登陆前后，沿海海洋水产养殖业、港口码头的塔吊等装卸设施、沿海城市高层建筑玻璃幕墙和广告牌、建筑工程设施、江河湖泊的船只、农村的危房简屋、城市居民住房等都会受其强风的损害甚或毁坏，台风大风对于城市交通安全同样会构成很大威胁。

台风风灾的影响范围远比台风强降水引发的洪涝灾害的影响区域小。台风强风的破坏限于近海海域和沿海地区，一般而言，台风登陆后受地形摩擦作用，其风力大多较快减小，强度削弱为热带风暴等级。气象业务部门对台风风灾的评估工作尚处于起步阶段，缺乏科学分析研究和定量分析评估方法，主要根据灾情的程度，大致按照因风力破坏造成的人员伤亡、农作物和经济作物损失、渔业和养殖业的损失、建筑物和工程设施的损毁等情况加以分类估算。实践表明，因多种原因，上报的材料和数据存在不确定性，不能反映真实状况，据此难以作出客观科学的评估。为了适应防台减灾的需要，气象部门需与有关部门合作长期开展台风风灾后的实地考察和调查，为建立台风风灾数据库收集第一手资料。为开展台风风灾的科学评估，还需要对台风风灾多发地区进行台风风灾调查，收集各受灾地的地理环境和经济发展状况以及风灾灾情和气象资料等，作为分析台风风灾气候特征的基础，并研究完善适用于各沿海地区的台风风灾等级标准，以提高我国台风风灾科学评估的应用水平。

2.3 暴雨和洪涝

台风暴雨和洪涝是由台风强降雨引发的主要灾害。常见于台风登陆的沿海地区，也可发生在远离台风环流的内陆，其影响范围甚广，可导致人民生命财产的严重损失。

2.3.1 定义

(1) 台风暴雨灾害

台风暴雨灾害主要是指登陆台风近中心剧烈对流作用和外围台风环流与