

或称外部条件。那个事先存在的胚胎或扰动 (precursor) 是一个内部实体或内部条件。海面温度是海洋条件。这三个方面, 任何一方面的条件不好, 便不能形成热带气旋。尤其是海洋极为重要。海洋是产生热带气旋的温床, 如西北太平洋盛夏, 台风一个接一个地产生; 但海洋也是消灭热带气旋的杀手, 如东南太平洋, 难有飓风生成, 海洋对台风的突然加强和突然衰亡同样有重要作用。一个台风的突然衰亡往往先从大气中找原因, 因为大气有丰富资料。但可能在大气中找不到原因, 真正的原因可能在海洋里, 可惜我们对茫茫大洋所知甚少。热带气旋的形成问题必需从上述三个方面进行研究。

大尺度环境条件重要的方面是热带波与大尺度基本环流的相互作用, 相互作用的结果有可能会产生有利于热带气旋形成的动力和热力条件, 东风波对北大西洋和东北太平洋飓风形成有重要作用。另外, 在甚低纬度印度洋到西北太平洋由西向东传播的大气低频振荡 MJO (Madden Julian Oscillation) 和南亚、东亚和西北太平洋热带深对流的活动有关, 从卫星遥感 OLR (Outgoing Longwave Radiation) 资料分析可以证实这一点, 这种热带深对流的活动及其加强和扩展, 正是热带气旋形成的重要条件。

MJO 具有 40~50 天的振荡周期, 人们通常用它来分析和预测季风的活动, 但 MJO 与西北太平洋或南海台风形成也有一定的关联。

热带气旋形成的内部条件注重事先存在的那个或几个扰动是否具有较强的低层涡度和高层暖核以及湿而不稳定的层结。环境条件中大的风速垂直切变将会破坏暖核。不管胚胎发展方向如何, 由下而上还是由上而下, 不管由几个胚胎合并, 对内部条件的要求都是一致的。

对热带气旋形成业务预报的研究, 着重在三个方面, 首先是改进业务数值预报在低纬度的预报能力, 采用合理的积云对流参数化方案和卫星遥感资料同化。其次是研究概念模式 (conceptual model), 对外部条件和内部条件做出诊断, 判别胚胎是否会发展成台风。最后, 研究对胚胎 (热带扰动) 的监测 (surveillance) 方法, 对外部条件和内部条件做出综合判断得出结果。这种判断还包括通过空间 (网格) 时间 (季节) 和环流特征 (circulation mode) 所做出的统计结果。

(3) 结构和结构变化 (Structure and Structure Change)

结构和结构变化是台风研究中的前沿。本章 1.2 节中已介绍过台风的详细结构, 但总体上可以分为内核和外围两部分。内核主要是台风眼, 包括眼壁云端、热塔 (hot towers)、眼壁小涡、同心双眼 (Concentric eyewalls)、并列双眼等。当台风出现同心双眼、眼的替换时, 台风强度会发生显著变化。台风外围主要结构包括螺旋雨带 (spiral rain band)、涡旋罗斯贝波 (Vortex

Rossby Wave)、台风前方的飑线 (squall line) (并非每次都有)、某一方位存在的中尺度切变线、中尺度强对流系统或小涡 (MCS/MCV) 以及台风中的龙卷 (tornadoes) 等。

台风结构是如此复杂, 它是一个多个部位紧密联系、互相影响的整体, 尤如人体的内脏和四肢感官一般, 互相牵连影响着。任何一部分的变化都会影响人的健康盛衰。台风内核和外围各部分变化也都影响着台风整体的加强和衰亡。结构和结构变化的研究, 实质上就是研究台风的强度变化, 即其强盛衰亡。

台风的强盛衰亡除了本身结构对此有影响外, 还有两个更为重要的方面影响着, 即环境大气和海洋。环境大气对台风结构和强度变化有重要影响的是风速垂直切变, 一些数值试验的结果表明, 台风上空暖中心的驱散与垂直切变增强有关, 这往往由对流层上层风速加强引起, 其结果会使台风衰亡。另一个影响台风结构变化的环境因素是中纬度西风槽, 这种槽和台风环流的相互作用会显著地改变台风的结构。有的西风槽靠近台风会加强暖核的通风 (ventilation) 效应, 并把台风结构变得不对称, 从而对台风发展起到抑制作用; 有的西风槽靠近台风会带来正涡动 (eddy) 动量通量, 对台风加强有利。环境大气中的急流对台风结构和结构变化也有重要影响, 急流分高空急流和低空急流, 高空急流对趋近它的台风流出气流会产生影响, 就会影响到台风的强度变化。急流轴以南广阔的散度场与台风上空辐散场重叠, 会加强台风上空质量抽吸, 有利其加强。当到达一定的相对位置, 高空急流会加强台风的环境风速垂直切变, 而使台风减弱。低空急流同样有重要影响, 低空急流在台风的东南方切入, 它输入台风的水汽通量是台风能量的重要来源 (source) 对台风中的强对流活动起着重要的支撑或增强作用。台风周围不同尺度环流系统与台风的相互作用也是环境大气对台风结构变化的另一种影响。中尺度小涡或涡块 (vorticity lump) 并入台风会使台风加强。当两个台风近距离相互作用, 产生相互回旋 (rotational movement) 而合并为一个环流系统, 这时会出现并列双眼现象, 在一个台风环流内部出现了两个眼的互旋运动, 这是一种十分罕见的结构特征, 合并后的台风有了显著的增强。台风环流发生了合并, 内部两个靠得很近的眼还在互旋, 却未能合并。

海洋对台风结构和强度变化有主要影响, 它也是台风能量的根本来源。海洋向涡旋大气输入的水汽和热量驱动着台风环流的运动, 海洋上大气边界层向上输送的水汽和热量对台风强度变化起着重要作用。台风数值模拟中, 积云对流参数化方案 (Convective parameterization scheme) 对模拟结果十分敏感, 与此类似, 台风边界层的参数化方案对结果更为显得敏感。而这一点

又与海气界面 (air-ocean interface) 的过程尤其是海洋上层或海洋混合层 (ocean mixed layer) 的过程密切相关, 这一层的海洋热容量 (Ocean Heat Capacity - OHC) 与热带气旋强度变化有很密切的关系。如今卫星探测遥感资料能显示出海洋热量分布状况, 当预报台风要进入某一海区, 按热量分布可以判断出该海域对台风加强或减弱的影响趋势。

海洋对台风的另一个影响是在台风强风背景下所产生的海洋飞沫 (Sea Spray), 这种飞沫在台风边界层内大量存在, 飞沫的蒸发对台风强度变化将产生影响。有的数值模拟结果表明, 飞沫蒸发会对台风增强有利。但对飞沫蒸发的研究较复杂, 飞沫分布和海面风力、浪高有关, 水滴大小也极不均匀, 飞沫分布在强风和高浪条件下也很难得出确切观测数据。总体来说, 度量和确定飞沫在海气之间对热量、水汽和动量的交换系数以及对台风强度的影响也是本章 1.5.2 节所提代号为 CBLAST 的外场科学试验的目标之一。台风强度的分析, 目前较普遍采用的是 Dvorak 方法, 按照台风内核和外围特征来确定台风强度等级。我国在 70 年代就引进了这一思路并发展了适合我国的强度分析方法。Dvorak 方法以后又有了进一步发展, 称为客观德沃夏克方法 (Objective Dvorak Techniques)。这对用卫星云图确定台风强度做出了重大贡献。但台风结构和强度变化的预报进展很慢, 这方面的技术显著地落后于台风路径预报, 也不如台风降雨预报。热带气旋强度预报通常用统计方法, 多元回归或逐步回归。预报因子输入卫星遥感资料来改进预报结果。统计和动力相结合的预报方案一直是强度预报的主要方法。以上方法目前不少预报中心仍在采用。神经网络方法 (neural net approach) 也像逐步回归一样用于强度预报。近年来发展了高分辨率数值模式结合先进的资料同化技术, 使热带气旋的强度预报有了新的发展。

(4) 热带气旋的运动

热带气旋运动受环境引导气流 (environmental steering) 影响, 这是一个经典的研究课题。后来的研究也表明, 在弱引导环境中, 台风内部非对称结构也影响其运动, 暖海区和位涡倾向 (potential vorticity tendency) 对台风运动有一定的指示作用。人们对热带气旋运动机理的了解要比形成 (formation) 和结构变化更深刻一些, 台风路径数值预报的能力有了明显提高, 这可能是近年来对运动机理研究趋于减少的一个原因。

与此同时, 对热带气旋路径预报方法研究十分热门。十多年前的逐步回归、神经网络、统计动力方案逐步淡化, 而今兴起的是高分辨的数值预报模式与先进的三维或四维资料同化技术结合, 尤其是遥感资料同化, 从而提高了业务数值模式的技术水平。在这一基础上, 发展了多模式的预报方案, 如

consensus 和 ensemble 等, 美国联合台风警报中心 (JTWC) 的试验报告表明, consensus 多模式预报方案显著地优于单模式方案, 提高了台风路径预报能力, 并有效地延长了预报时效 (从 72 小时延长到了 120 小时)。多模式数值预报方案实际上也是一种动力和统计结合的方案, 它开拓了动力预报方法的前景。台风路径预报很有效的方案是集合预报 (Ensemble forecast), 该方案用初值扰动、模式扰动等方法最终做出台风路径预报。分析结果表明, 台风路径集合预报的结果比单一模式预报结果好。在此基础上, 世界气象组织 WWRP 又发展了全球超级集合预报方法, 即 TIGGE (THORPEX Interactive Grand Global Ensemble)。尽管如此, 集合预报中的一些基本问题如扰动技术方法 (Perturbation techniques) 以及模式的误差源包括初值场误差等, 还有待进一步研究。集合预报的结果实际上也是动力和统计结合的产物。

热带气旋路径研究的另一个重要方面是对运动突变和异常路径的研究。西北太平洋台风运动异常路径比其他海域频繁, 西北太平洋西部和南海异常路径发生频率更高。异常运动中的路径突然转折、摆动、打转等运动形成的机理, 目前还所知不多。东海台风的突然西折和南海台风的突然北翘是两类对我国影响很大的突变路径, 数值预报对这种突变现象往往报不出来。数值试验和诊断分析目前是突变现象机理研究的主要手段。另外, 岛屿地形对热带气旋运动也会产生影响, 我国台湾岛屿地形对台风运动有显著影响, 例如台风向西偏北趋近台湾时有右偏现象, 台风在台湾东海岸近海常出现逆时针打转现象, 台风靠近台湾东岸时常在岛上或海峡生成诱生低压 (induced low), 有些台风在台湾岛上或邻近海域出现方向突变或突然减速, 另有一些台风在趋近和穿越台湾岛屿和海峡时交替出现右偏西折和右偏的摆动 (meandering) 现象。和岛屿地形有关的这类台风异常运动现象一直受到人们的关注。另外, 岛屿山脉地形对台风降雨的增幅作用和结构变化有更重要的影响。

参考文献

- 沈树勤. 1990. 台风前部的龙卷, 热带气旋科学讨论会文集. 北京: 气象出版社.
- 余志豪. 2002. 台风螺旋雨带—涡旋 Rossby 波, 气象学报, **60** (4): 119-124.
- 朱洪岩, 陈联寿. 2000. 台风与中纬度槽相互作用形成槽前大暴雨的数值研究. 大气科学, **24** (5): 669-675.
- 王喜年. 2001. 风暴潮预报知识讲座—第二讲风暴潮灾害及其地理分布. 海洋预报, **18** (2): 70-77.
- Cheng Minghu, *et al.*, 2006. The studies of landfalling tropical cyclone using TRMM and HK data. Report to topic 0.3 of IWTC-VI.
- Elsberry R L, *et al.*, 1985. A global view of tropical cyclones. Published by Office of Naval

Research.

- Gray W M. 1968. Global view of the origin of tropical disturbance and storm. *Mon. Wea. Rev.*, **96**: 669-700.
- Gray W M. 1975. Tropical Cyclone genesis. Dept of Atmos. Sci. Paper, No. 232, CSU, 121.
- Hawkins H F, Rubsam D T. 1968. Hurricane Hilda, 1964 II. The structure and budges of the hurricane on October 1, 1964. *Mon. Wea. Rev.*, **6**: 617-636.
- Hill E J, W Malkin, Schulz Jr W A. 1966. Tornadoes associated cyclones of the tropical origin practical features. *J. Appl. Meteor.*, **5**: 745-763.
- Li Ying, Wang Jizhi, Chen Lianshou, *et al.*, 2007. A study on wave distribution of rainfall associated with typhoon Matsa (2005). *Chinese Science Bulletin*, **7**: 967-971.
- Luo Zhexian, Chen Lianshou. 1995. Effect of the orography of Taiwan island on typhoon tracks. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, **19** (4): 390-396.
- Sadler J C. 1976. A role of the tropical upper tropospheric trough in early season typhoon development. *Mon. Wea. Rev.*, **104**: 1266-1278.
- Sinclair M R. 2002. Extratropical transition of south west Pacific tropical cyclones, Part I Climatology and mean structure changes. *Mon. Wea. Rev.*, **130**: 590-609.
- Tabito Hara. 2006. The Operational non-hydrostatic mesoscale model for quantitative precipitation forecasts at JMA. 2nd International conference on quantitative precipitation forecasting and hydrology, Boulder CO USA

第2章

台风灾害及其特征

2.1 台风灾害特征

台风的破坏力极大，是夏秋季节严重威胁我国沿海，特别是华南和华东沿海及内陆省份的灾害性天气系统之一。人们直接能感受到的是台风的狂风骤雨，由其造成的灾害可分为直接和间接两类。直接灾害主要是由台风的狂风引发的风灾和暴雨造成的城市积水内涝和乡村农田的暴雨洪涝灾害，而间接灾害主要为台风暴雨引发的衍生地质灾害（如泥石流、山体滑坡等），以及台风大风作用于海表面而引发的沿海地带风暴潮灾害，即因迎岸大风使近海海域的水位急剧升高而导致海水漫溢或冲毁堤坝使海岸地带被淹没，在天文高潮期风暴潮灾害更为严重。我国遭受台风灾害有次数多、季节性强、受灾程度（灾情）重、影响范围广等特征。台风季节内约半个月就有台风登陆我国，严重的台风灾害多发生在盛夏至初秋，主要集中在7—9月，受灾地区主要在台湾、粤、闽、浙和海南诸省沿海地带，少数近海北上、登陆浙闽后北上或转向移入黄渤海的台风对上海、江苏、河北、辽宁等省市也会造成灾害。

灾情严重程度（灾害的实际损失）首先取决于台风的风雨强度及其预警和预报的准确率，其次还与防台减灾决策的正确性及受灾地区的社会经济发展水平密切相关，因此台风灾情可以在一定程度上反映灾害的严重性。

我国台风灾情（受灾程度）资料的收集和上报工作受多种因素的制约，因此台风灾情资料的规范性和完整性较差，不同来源的数据相差悬殊。20世纪90年代初，中国气象局曾组织力量对台风灾情资料进行较系统的收集和整理，并由中国气象局上海台风研究所主持对1980—1992年间我国台风灾情资料进行了整编。2005年，受中国气象局气象新技术推广项目资助，上海台风研究所会同国家气象中心依据历年《全国气候影响评价》、《全国农业年鉴》、《气象》和近两年出版的《中国气象灾害年鉴》以及国家气候中心的有关历史

灾情数据等,对1993—2004年我国台风灾情资料进行了整编。台风灾情资料包括:死亡人数、失踪人数、受伤人数、倒塌房屋数、受损房屋数、受淹农田面积、船舶沉没及损坏数和直接经济损失等项(雷小途等,2009)。

2.1.1 台风灾害的气候特征

(1) 登陆和影响我国台风频数

1951—2006年间,西北太平洋生成的台风(包括热带低压,下同)年平均为33.4个,其中1998年最少,为21个,1967年最多,有53个。在这些台风中,每年有近半数的台风影响我国,影响我国的台风年频数平均为15.4个,最少8个,最多达24个(图2.1),占年台风频数的23.7%~67.9%。从年平均情况来看,约三成的西北太平洋台风登陆我国(平均9.1个),1982年最少,也有4个,1952年和1961年最多,达到了15个。从各频数近五十几年的线性变化趋势来看,西北太平洋生成台风数有减少的趋势,尤其是最近10年,除2004年外均低于平均水平。年影响和登陆我国的台风数有3~5年的年际振荡外,有很不明显的线性减少趋势。可见,影响和登陆我国的台风年频数并没有明显的变化,但其占西北太平洋生成台风频数的比例有明显的增加趋势。

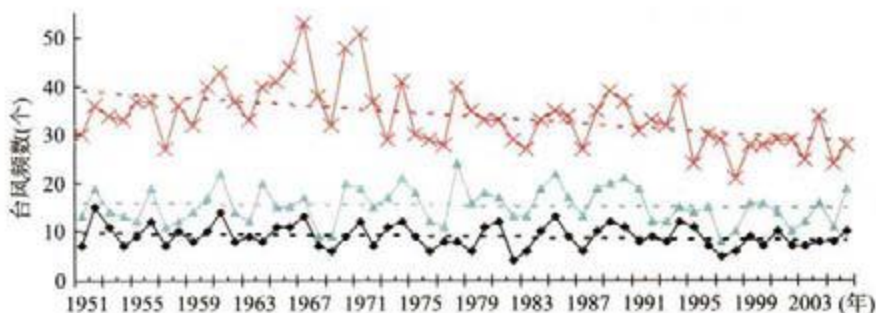


图2.1 1951—2006年西北太平洋生成、影响和登陆我国的台风年频数的年际变化

(注:×为台风生成年频数,▲为影响中国台风年频数,◆为登陆我国台风年频数,虚线代表相应的3种台风年频数的线性变化趋势。)

(2) 致灾台风频数

台风灾害导致不同程度灾情的原因极其复杂,台风造成的灾情不但与台风大风和暴雨的强度及持续时间等气象致灾因子有关,还与台风预警预报的及时性和准确性、影响区域的前期气象状况和地理状况、社会经济发展水平和城乡基础设施建设状况、群众防灾意识强弱、当地政府防台减灾措施适度和及时性等关系密切。从1980—2004年的不完全资料来看,约26%~73%(平均为51%)的影响台风或60%以上(平均为90%)的登陆台风给我国带来不同

程度的灾害。从我国有灾情记录台风（致灾台风）与登陆我国台风的年频数对比来看（图 2.2），致灾台风与登陆台风的年频数相近，大多数年份致灾台风数小于或等于登陆台风数，但也有部分年份致灾台风频数大于登陆台风频数，如 1982 年和 1983 年，这主要是未登陆近海台风引起的。1980—2004 年间，在我国发生明显灾情且有记录的台风共 181 个，平均每年约 7.2 个，且年际差异较大，最多的年份（1985 年）达 11 个之多，是最少年份（1998 年）4 个的近 3 倍。由图 2.2 可见，除 3~5 年的年际振荡外，我国致灾台风频数总体呈现缓慢减少趋势。此外，年代际变化特征也较明显，20 世纪 90 年代及以后相对少发，除 2001 年外，1996 年以来的致灾台风年频数几乎都在平均数以下。

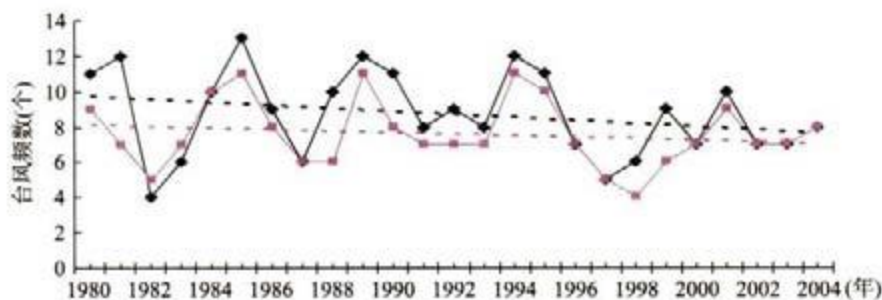


图 2.2 1980—2004 年间登陆我国台风和致灾台风年频数的年际变化
(注：◆为登陆台风，■为致灾台风；虚线为同色实线的线性变化趋势)

台风影响我国的地域较广，从地理分布看，1980—2004 年间，我国共有 24 个省份受台风的明显影响并有灾情记录，但以东南沿海各省为多，其中，广东省的致灾台风数最多，共有 92 个，年均约 3.7 个影响台风造成有记录的灾情；福建和浙江省次之，年均约 2.6 个；海南、广西、江苏等省年均 1.9~1.2 个；江西、安徽、上海、山东、湖南、湖北、河北、辽宁、吉林、天津、北京、河南、黑龙江、山西、陕西、内蒙古、云南、贵州等省市有记录灾情的致灾台风年均尚不足 1 个。

(3) 台风风灾地理分布的气候特征

影响我国大陆的台风中，约 85% 的台风平均风力在 6 级以上或有 8 级以上阵风。根据 1951—2000 年的台风历史资料统计得到台风影响下我国大陆各地出现 6~7 级（或阵风 8~9 级）、8~9 级（或阵风 10~11 级）大风的频次分布（图 2.3 和图 2.4）（中国热带气旋气候图集，2006），由图可见，台风引起的大风出现在我国大陆东部及东南部地区，尤其是山东半岛以南的东部及东南部沿海区域。从频次上看，6~7 级大风以广东上川岛的出现频次最多，有 171 次。由 2 min 平均风速判定的 8~9 级风（或阵风 10~11 级）主要出现

在浙江、福建、广东和海南的沿海地区，其频次以福建台山居最，达 101 次。台风引起的大风风速与大风频次有类似的分布，也是沿海大、内陆小的特征。1951—2000 年间，7908 号台风影响下，在广东省遮浪站曾出现过 2 min 平均风速半个世纪的最大值，达到 61 m/s（风力 17 级）。

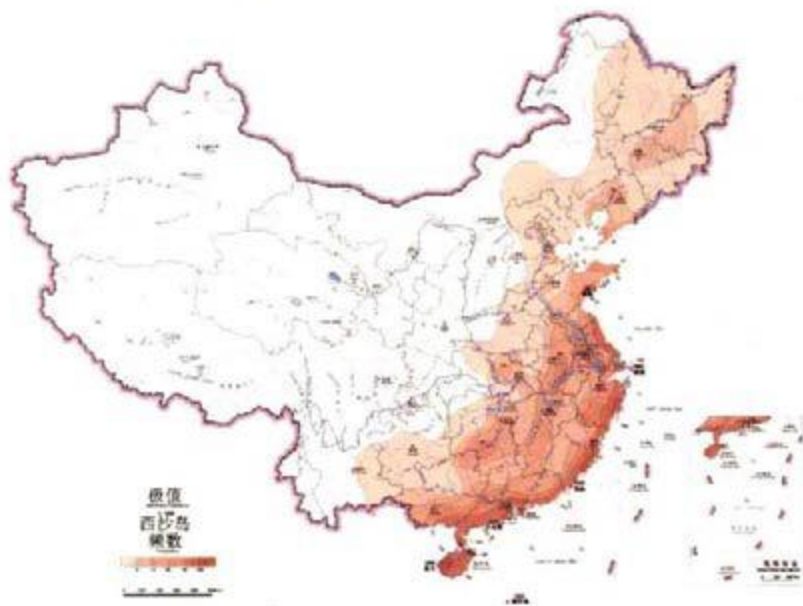


图 2.3 1951—2000 年间中国大陆出现 6~7 级（或阵风 8~9 级）台风大风的频次分布

(4) 台风暴雨洪涝灾害地理分布气候特征

影响我国大陆的台风中，约 78%、61% 和 15% 的台风会带来暴雨、大暴雨和特大暴雨。台风导致中国大陆出现大暴雨的频次分布（图 2.5）（中国热带气旋气候图集，2006），也是从东南沿海向内陆递减，浙江、福建、广东、广西沿海和海南、台湾岛大部是大暴雨和特大暴雨的影响区域，其中 1951—2000 年间大暴雨频次最多的是海南岛的琼中，达 74 次，特大暴雨频次最多的则是台湾的阿里山，达 45 次。影响中国台风的日降水量极值基本上也是从东南向西北递减，但由于暴雨受地形影响较大，日雨量极值在 200 mm 以上区域除东部沿海和南部沿海外，也包括了内陆部分特殊地形区域，如衡山山脉、河南驻马店附近区域。1951—2000 年期间，列首位的是 9608 号台风降水在台湾阿里山测得的 1748.5 mm，而列第二位的是 6718 号台风降水在台湾新寮测得的 1672.6 mm（图 2.6）（中国热带气旋气候图集，2006）。

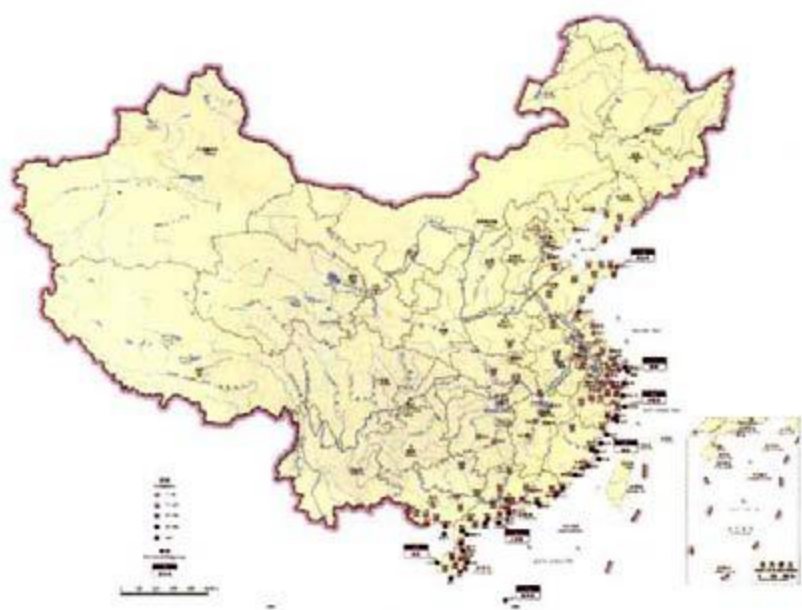


图 2.4 1951—2000 年间中国大陆出现 8~9 级（或阵风 10~11 级）台风大风的频次分布



图 2.5 台风导致中国出现大暴雨的频次分布



图 2.6 影响中国的台风日降水量极值分布

2.1.2 我国台风灾情概况

1980—2004 年的 25 年间，181 个致灾台风共造成我国大陆 23.53 万人伤亡、3088.95 万间房屋倒损、5.88 亿亩农田受淹和 4223.57 亿元人民币的直接经济损失，并有 7 万余艘各式船舶翻沉或损坏。

(1) 人员伤亡

1980—2004 年间的台风灾情资料显示：我国大陆因台风伤亡（含失踪，下同）平均每年 9412.8 人，其中死亡（含失踪，下同）577.3 人、伤 8835.5 人；平均每个台风，造成我国大陆人员伤亡数为 1300.1 人，其中死亡 79.7 人，伤 1220.4 人。

台风造成的伤亡人数的年际间差异极大，1996 年因台风而伤亡人数高达 12.27 万人，是最少年 1998 年 12 人的 1 万多倍；1994 年死亡人数最多（2115 人）和 1998 年死亡人数最少（仅 6 人），相差达 352 倍。如图 2.7 所示，在我国大陆，台风灾害造成的伤亡人数有以逐年约 405.9 人的速度增加的趋势，但死亡人数则以 24.9 人/年的速度递减。

不同致灾台风造成的人员伤亡情况也相差悬殊，如 9608 和 9417 号台风分别以伤亡 11.3 万人和死亡 1426 人而居首位，而 8009、8311、8613、8704、8819、8823、9206、9207、9806、0119 号台风仅有 1 人死或伤甚至未造成人员伤亡。此外，造成 5000 以上人员伤亡的台风还有：8607 号（伤亡 1.22 万

人)、9615号(伤亡8116人)、0104号(伤亡7907人)、9417号(伤亡5946人)、9711号(伤亡5660人)及9107号(伤亡5340人);造成500人以上死亡的台风还有:8108号(死亡1283人)、9608号(死亡779人)。从变化趋势看,随着时间的推移,单个台风造成的人员伤亡数略有增加,死亡人数则略有减少。

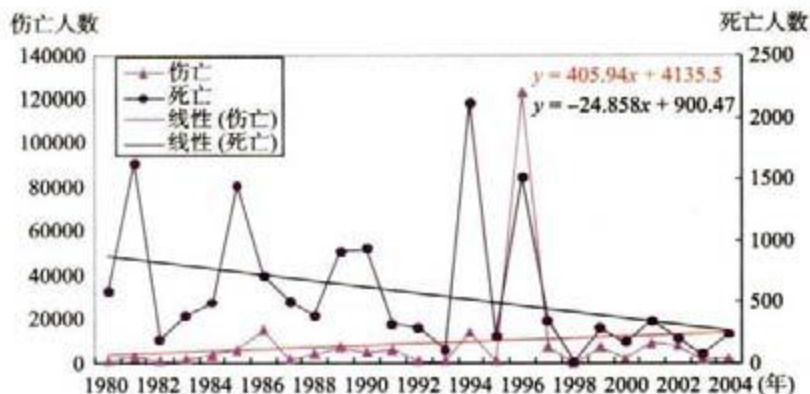


图 2.7 1980—2004 年间我国台风灾害造成的人员伤亡数
(红色(黑色)粗直线为伤亡(死亡)人数线性变化趋势线)

(2) 房屋倒损

1980—2004 年间,我国大陆因台风而倒损的房屋平均每年 123.56 万间,并以 1.33 万间/年的速度递增(图 2.8);单个台风平均约造成 17.07 万间房屋倒损,其中倒塌 4.10 万间,损坏 12.97 万间。

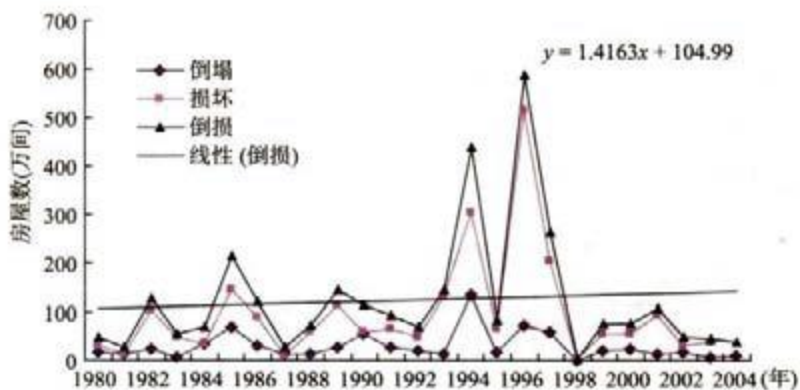


图 2.8 1980—2004 年间我国大陆台风灾害造成的房屋倒损数
(直线是倒损房屋数的线性变化趋势)

与人员伤亡的情况类似,因台风而倒损的房屋数也存在显著差异:1994 年倒塌的房屋最多(达 134.67 万间)、1996 年损坏及倒损的房屋最多(分别

为 512.97 万间和 585.08 万间), 而 1998 年无论是倒塌、损坏或是倒损的房屋数都是最少的一年(分别是 6145 间、18357 间和 24502 间)。

同样, 不同的台风造成的房屋倒损数也相差甚大, 9406 号台风以 61.31 万间位居房屋倒塌数的首位(9711 号和 9615 号台风以 47.62 万间和 34.07 万间分列第 2、3 位), 9608 号台风则以 273 万间、302.22 万间列房屋损坏和倒损总数之首(9615 号和 9711 号分列第 2、3 位, 其损坏房屋数分别是 21.51 万间和 13.70 万间、倒损房屋数分别是 24.91 万间和 18.46 万间), 而 8708 号台风仅造成了 6 间房屋倒塌、8409 号台风造成的房屋损坏和倒塌数仅 1 间和 15 间。

(3) 农田受淹

1980—2004 年间台风造成我国大陆农田受淹年平均 2355 万亩*。1997 年因台风受淹的农田面积最大(达 1.245 亿亩)、1991 年最小(仅 5.505 万亩), 两者相差 2000 多倍。自 1980 年以来, 我国大陆因台风而受淹的农田面积呈现出逐年增大的趋势(图 2.9), 递增率 41.7 万亩/年。值得注意的是, 2000 年以来受淹的农田面积均接近或小于多年(1980—2004 年)平均, 其成因有待进一步分析。

就单个台风而言, 平均每个台风造成的受淹农田面积 325.5 万亩, 并有一定增长趋势。其中, 造成农田受淹面积最大的是 9711 号台风, 为 1.0695 亿亩; 9406、9608 号台风以 6945 万亩和 5490 万亩分列第 2 和第 3; 其余台风均不足 4005 万亩, 其中 8409 号台风最小, 仅造成 330 亩农田受淹。

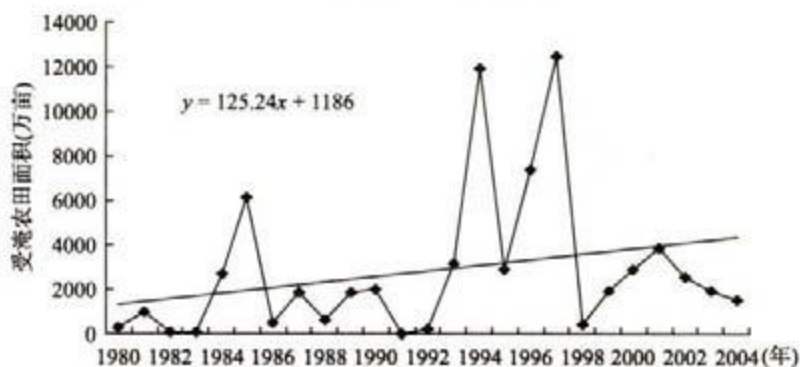


图 2.9 1980—2004 年间我国因台风受淹的农田面积
(粗直线为受淹农田面积的线性变化趋势线)

* 1 亩 = $\frac{1}{10}$ 公顷 = 666.7 m²

(4) 直接经济损失

不计物价及货币升值率等因素, 1980—2004年间, 我国大陆平均每年因台风造成的直接经济损失为 168.94 亿元人民币, 平均占当年国民生产总值 (GDP) 的 0.36%; 平均每个台风造成 23.33 亿元人民币的直接经济损失。统计数据表明, 台风造成的直接经济损失的年际差异也很大, 且以 1996 年的 961.65 亿元人民币为最大 (约占当年 GDP 的 1.42%)、以 1980 年的 5683.95 万元为最小 (约占当年 GDP 的 0.01%)。从年际变化的趋势看, 台风造成我国大陆的直接经济损失有逐年明显增加的趋势 (图 2.10)。

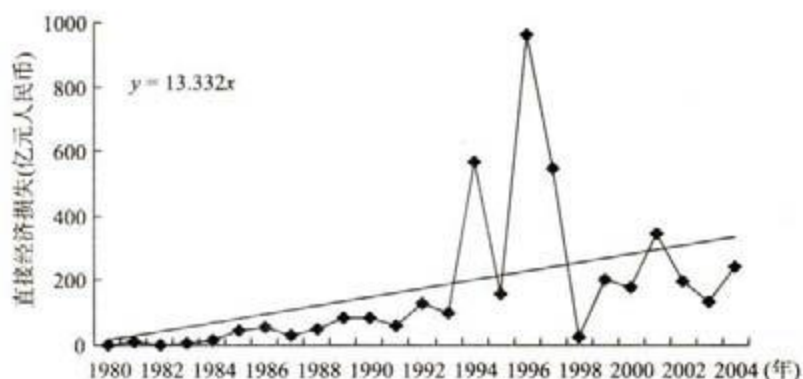


图 2.10 1980—2004 年间台风造成我国大陆的直接经济损失
(粗直线为直接经济损失的线性变化趋势线)

由于台风灾害带来的损失不但与台风本身有很大关系, 还与社会经济状况有密切的关系, 尤其是直接经济损失一项, 与物价、货币升值和当时经济发展状况密切相关。用直接经济损失占当年 GDP 的比率来简单的考虑直接经济损失的可比性问题。1980—2004 年, 台风直接经济损失占当年 GDP 比率有微弱的线性增长趋势, 比率最大是 20 世纪 90 年代中后期, 其次为 20 世纪 80 年代中期到 90 年代初期 (图 2.11)。

就单个台风而言, 其平均直接经济损失为 23.33 亿元。其中, 9608 号台风造成的直接经济损失最大 (达 652.7 亿元人民币), 造成巨灾 (100 亿元以上损失) 的还有 9711 号台风 (436.3 亿元)、9615 号 (218.6 亿元)、0414 号 (203.3 亿元)、9417 号 (178.5 亿元)、0104 号 (169.7 亿元) 和 9406 号 (133.2 亿元), 而 8006、8108、8209、8704、8824、9607 号等台风的损失则较小, 均不足 100 万元。此外, 1980—2004 年间, 单个台风所造成的直接经济损失有较明显的增长趋势。

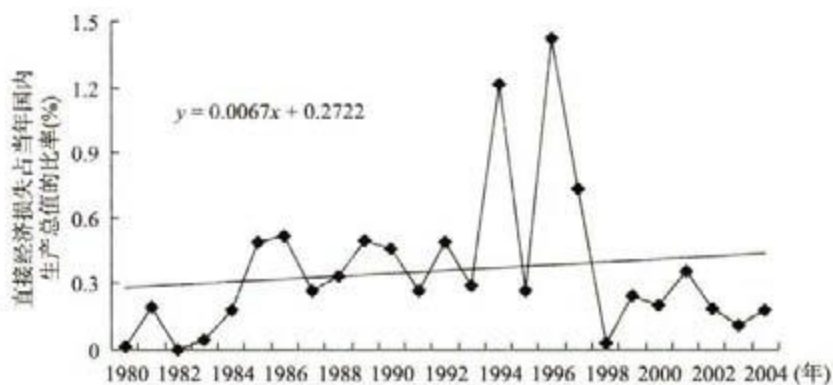


图 2.11 1980—2004 年间台风造成我国大陆的直接经济损失占当年国内生产总值的比率
(粗直线为线性变化趋势线)

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、飑线、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, 人步行感觉阻力甚大	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院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, 应用装备有低空风廓线仪、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。

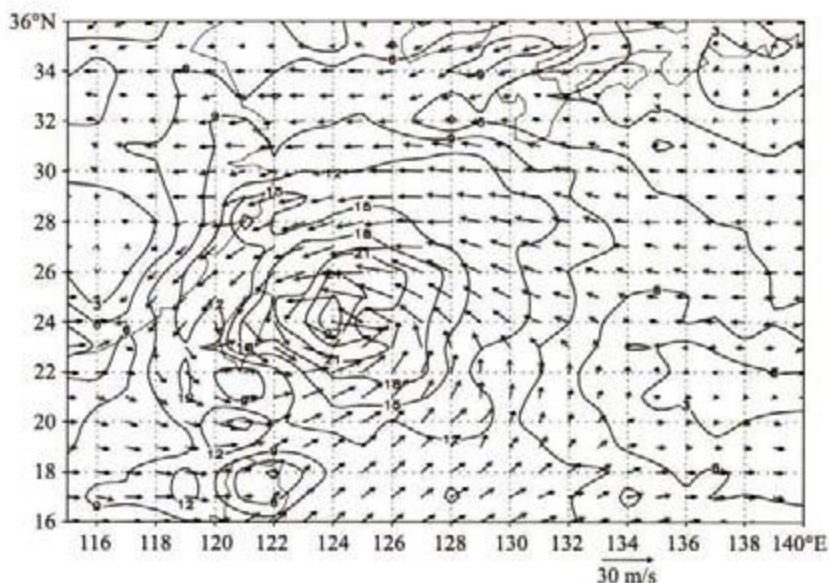


图 2.12 2004 年“云娜”台风的海平面风场分布
(实线为等风速线，标注值单位为 m/s)

(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

冷空气等天气系统共同作用形成降雨强度极大情况下引起的自然灾害。其主要表现为城市的严重积水，导致居民住房和工厂企业仓库进水，使居民财物和仓储物资受损，同时阻碍交通运输，影响城市经济活动和居民生活。

(2) 台风洪涝灾害

台风洪涝灾害主要是指台风登陆前后移动过程中在沿海和内陆丘陵地区累积雨量很大情况下引发的大范围自然灾害。台风引发的洪涝灾害主要发生在乡村和农田，尤其在台风登陆的沿海丘陵地带常会引起山洪暴发，受灾范围更广，主要表现为：大面积农田被淹没，导致植被破坏和农作物减产，甚至绝收；冲毁堤岸，甚至引起水库垮坝，从而淹没村镇和农田；冲毁路基、桥梁，导致火车出轨，车辆翻车，铁路交通中断；冲毁通信和输电网设施，导致通信中断和停电、停工停产；浸坏或冲毁村庄房屋等建筑物基础，导致大量农舍、禽畜棚屋倒塌，致使人畜伤亡，灾后容易引发流行疾病和瘟疫；淹没或冲毁树木等植物，破坏生态环境。

2.3.2 标准

导致台风暴雨灾害的主要气象因子是台风的降雨强度，而导致台风洪涝灾害的主要气象因子除台风降雨强度外，还与台风影响过程的持续时间长短和影响地区前期的雨量多寡有关，二者均与台风降雨强度等级密切相关，它们的划分标准和其他降水等级标准是一样的，有小雨、中雨、大雨、暴雨、大暴雨和特大暴雨，它们的划分标准列于表 2.2。

表 2.2 降雨量等级划分表

雨量 (mm)	小雨	中雨	大雨	暴雨	大暴雨	特大暴雨
12 小时雨量	0.1~4.9	5.0~14.9	15.0~29.9	30.0~69.9	70.0~139.9	≥140.0
24 小时雨量	0.1~9.9	10.0~24.9	25.0~49.9	50.0~99.9	100.0~249.9	≥250.0

2.3.3 成因

台风强降雨形成的原因在于：台风环流内含有大量的水汽，除台风中心眼区外有很强烈的上升气流。水汽随着上升气流快速抬升，温度下降，到一定高度冷却形成小水滴。小水滴随气流上下左右运动，相互碰撞、合并，形成大水滴，随着大水滴的长大，其重量超过上升气流的浮力时，即降落到地面。由于台风环流内水汽多、上升气流强，雨会很大。若冷空气侵入到台风外围环流或倒槽内，移动的冷空气会起到抬升作用，促使并加剧暖湿空气上升，降雨量就会增加。

影响台风强降雨强度的因素很多，主要有以下 5 个：

(1) 台风强度是影响台风雨量强度的主要因素之一。表 2.3 为 1952—2000 年在长江口到珠江口沿海登陆的台风和热带风暴影响下沿海与近海地区的最大雨量中心的雨量情况：106 个登陆前 12 小时或登陆台湾时近中心最大风速大于 32.7 m/s 的台风造成的最大雨量中心雨量平均为 378.8 mm；53 个登陆前 12 小时或登陆台湾时近中心最大风速小于 32.7 m/s 的热带风暴造成的最大雨量中心雨量平均为 272.2 mm，为前者的 71%，两者相差 106.6 mm；最小的为登陆浙江省温岭的 7410 号热带风暴仅有 25 mm 的雨量。

表 2.3 登陆前 12 小时两类不同强度热带气旋造成最大雨量比较表

	登陆前 12 小时为台风	登陆前 12 小时为热带风暴
统计登陆热带气旋个数	106 个	53 个
平均最大雨量中心雨量	378.8 mm	272.2 mm
最大雨量中心雨量	891 mm	587 mm
最小雨量中心雨量	112 mm	25 mm

(2) 东南沿海地区地形对台风强降雨及分布有很大影响。迎风地形的强迫抬升和强迫辐合可使台风降雨量明显增加，是沿海平原地区雨量的 1.5 倍左右，甚至更多；而背风地形一般比沿海平原地区的台风降雨量明显减少，一般不到东部沿海地区雨量的 1/2。

(3) 冷空气侵入台风环流或倒槽可以增加台风降雨量。适量冷空气侵入台风倒槽和外围，可以加剧台风环流区大气层动力和热力不稳定，使冷空气影响到的附近地区降水量明显增加，一般可增加 1 倍左右。这是造成台风强降雨异常的重要机制。但是强冷空气入侵台风中心将破坏台风的结构，造成台风强度减弱，因此不能起到增强台风中心附近降水的作用，而对台风倒槽降水仍可以起到很大的增幅作用。

(4) 湿度场对台风强降雨有影响。大陆长期干旱的土壤状态，空气中水汽量少会影响台风雨量。特别是某一些地方盛夏长期干旱、空气中水汽很少，台风影响时，降水会明显减少，甚至出现所谓“干台风”。例如：在梅汛期后的伏旱期间登陆浙江省温岭的 7410 号热带风暴仅引起 25 mm 的最大降水，这是一个罕见的干台风。1987 年 7 月 27 日，登陆浙江温州，而后北上穿过浙江中部、江苏中部再入海的 8707 号台风，雨量大于 100 mm 的测站只有温州、台州、宁波三地区的沿海，温州 (232 mm) 和大陈两地超过 200 mm。而与其路径大致类似的 6126 号台风，其路径两侧有大片 100 mm 以上降水，宁波大部与台州部分地区雨量在 300 mm 以上，雨量中心为 573 mm；6214、6513 和 6615 号台风引起大片 200 mm 以上的降水，最大雨量中心分别为

634 mm、832 mm 和 539 mm。8707 号台风大暴雨区域的雨量中心值都不到这些台风降雨量的 1/2。大旱之年的 1967 年 7 月 12 日登陆福建连江的 6704 号台风的降雨量只有一站超过 100 mm (136 mm)，3 站超过 50 mm，其路径两侧、闽中北和浙江全省在 50 mm 以下，也是少有的干台风。登陆闽浙的 6708、6714、6721 号台风引起的最大降水中心均在 200 mm 以下，超过 100 mm 的站很少，都为干台风。

(5) 台风及其倒槽影响时间长短影响总降水量。一般而言，影响时间长则总降水量也会多些，影响时间短则总降水量会少些。

2.3.4 台风强降雨的特征

台风强降雨有以下明显的特点：

(1) 台风强降雨的地理分布很不均匀，这除了与台风环流内存在分布不均匀的中小尺度天气系统、螺旋云雨带及不均匀结构有关之外，还与台风途经地区的地形地貌等其他因素有关，在这些因素的综合影响下，台风的强降雨分布很不均匀。图 2.13 是一个台风过程雨量非均匀分布的实例。

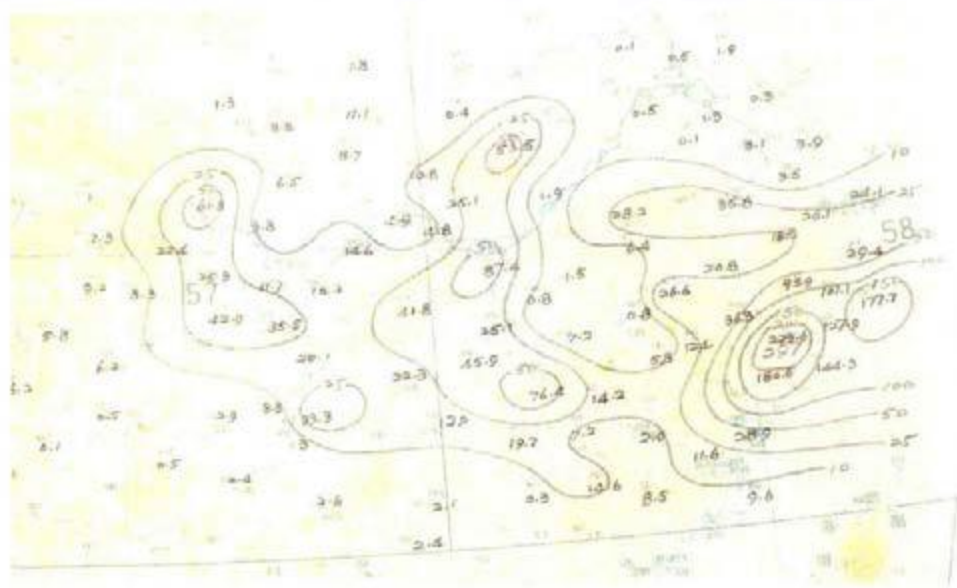


图 2.13 0216 号强台风“森拉克”的过程雨量分布图 (单位: mm)

(2) 同样强度等级的台风造成的降水强度不一样，有的差异很大。例如 9608 号台风侵袭台湾，其 24 小时最大雨量达到 1748.5 mm (过程雨量达 1987 mm)、6718 号台风给台湾新寮带来 2749 mm 的过程雨量、6312 号台风在台湾阿里山的过程雨量达 1774 mm、登陆香港的 6001 号台风在广东的

过程降雨量为 891 mm，而登陆福建省漳浦的 8015 号台风的过程最大雨量仅为 112 mm。

(3) 台风除给沿海地区带来大量降水外，还可深入内陆引起暴雨，或与冷空气等中纬度天气系统共同作用造成远离台风环流地区的大量降水。例如 1975 年 8 月 7503 号台风深入河南、安徽交界附近停滞少动，并受冷空气影响，造成几个地区特大暴雨，河南林庄最大总雨量 1631 mm，日最大雨量 1062 mm。

(4) 由于台风移动速度不同等原因，台风降雨时间长短不一，一般 1~2 天，有的 3 天以上。有的台风从南向北移动，其倒槽和本身环流可以影响北侧一些地方较长时间。例如登陆福建连江的 6007 号台风向北移动，影响浙江、江苏 3~4 天，引起江苏潮桥 945 mm 的过程降水。

2.3.5 灾例

台风暴雨和洪涝灾害造成巨大经济损失和人员伤亡的灾情实例不胜枚举。例如：

(1) 1912 年 7—8 月台风登陆福建，死十数万人。

(2) 1922 年 8 月强台风登陆汕头，造成当地 7 万多人死亡，并有瘟疫。

(3) 1956 年 12 号台风登陆浙江象山，登陆时最大风速达 60~65 m/s，海水深入内陆 10 km 左右，冲毁江堤海塘 869 km。浙江 75 个县市受到严重灾害，损毁房屋 71.5 万间，4925 人丧生。

(4) 1975 年 8 月 7503 号台风深入河南、安徽交界附近停滞少动，并受冷空气影响，造成几个地区特大暴雨，河南林庄最大总雨量 1631 mm，林庄日最大雨量 1062 mm，导致洪水暴发，两座大水库崩溃，洪灾之后又发生瘟疫，使几个地区数十万人受到历史上罕见的大灾难。

(5) 受 9216 号台风影响，山东淹没村庄 41 个，损坏房屋 124 万间，其中倒塌 9149 间，冲毁公路 127.45 km，桥涵 85 座，水闸 1 处，中断通信、输电线路 11 条，毁坏线路 200 km，倒折线杆 405 根，在灾害过程中，因建筑物倒塌、触电及沉船等原因死亡 19 人，重伤 34 人，伤亡共 161 人，直接经济损失 47 亿元。

(6) 9417 号台风登陆瑞安，浙江 48 个县市共有 1392.82 万人受灾，217 万人被洪水围困，1126 人死亡，倒塌房屋 20 多万间，损坏民房 93 万多间，受灾农作物 753 万亩，直接经济损失 177.6 亿元。

(7) 9711 号台风登陆温岭，影响了从福建到黑龙江省的大片土地、2500 多万人受严重灾害，直接经济损失 436.3 亿元。其中浙江 75 个县市、2167 万

人受灾，死亡147人，倒塌房屋17.7万间，农作物受灾面积1097万亩，直接经济损失186亿元。

(8) 0102号台风“飞燕”使福建22个县市246个乡镇520.7万人受灾，122人死亡，103人失踪，房屋倒塌6100间，农作物受灾面积181.5万亩，成灾面积88.5万亩，直接经济损失达45.2亿元。

(9) 2004年“云娜”台风登陆浙江温岭石塘后西行，穿过温州北部、丽水和衢州进入江西。引起浙中南大范围洪涝，乐清礁头雨量916mm，创浙江1949年后台风降水之最高记录。12级以上大风（最大58.7m/s）、风暴潮、暴雨及泥石流造成浙江75个县市、1299万人受灾，死亡164人，失踪24人。毁坏公路路基1163km，损坏堤防4059处563km，堤防决口1222处88km，损坏水闸206座，损坏灌溉设施3148处，损坏输电线路3342km，损坏通信线路1522km，直接经济损失181.28亿元。

(10) 0418号台风“艾利”3次登陆福建，造成洪水。全省6个地区市、48个县、421个乡、347.99万人受灾，死亡2人，受淹城市3个，倒塌房屋1.01万间，农作物受灾7.49万 hm^2 、成灾3.79万 hm^2 ，损坏水库7座，损坏堤防236处45.1km，堤防决口50处1.8km，损坏灌溉设施1579处，直接经济损失24.85亿元。

(11) 2005年台风“龙王”在台湾花莲登陆后，在厦门市再次登陆，受台风“龙王”和弱冷空气的共同影响，出现台前飚线和短时强降水，1小时降水量大于100mm的站数，为历年登陆和影响福建省台风的短历时降水之最，造成了特大洪涝，福建省402.8万人受灾，死亡159人。全省农作物受灾13.079万 hm^2 、成灾面积6.532万 hm^2 、绝收面积1.591万 hm^2 ；车辆受淹损毁7400多辆，铁路中断1条次，公路中断241条次，毁坏公路路基416.68km；损坏输电线路427.56km、通讯线路132.52km；损坏堤防400处103.4km，堤防决口37处3.4km，损坏护岸661处、灌溉设施2906处，损坏水闸、水文测站、机电井、机电泵站、水电站354座，冲毁塘坝201座；房屋倒塌0.944万间，全省直接经济损失约74.7亿元。

(12) 受2006年强热带风暴“碧利斯”影响，暴雨、洪水以及滑坡、泥石流灾害袭击福建，造成福建57个县（市）、402.8万人受灾，5个县级城区受淹，倒塌房屋6.4万间，死亡92人，农作物受灾17.597万 hm^2 ，直接经济损失46.85亿元。“碧利斯”引起湖南湘东南特大暴雨，引发洪涝和地质滑坡、泥石流，有930.04多万人受灾，死亡526人，倒塌房屋15.7万间。农田受灾面积48.16万公顷，直接经济损失129.2亿元。

(13) 2006年超强台风“桑美”在浙江省苍南县登陆，温州、丽水大部、

台州南部出现暴雨到大暴雨，局部有特大暴雨，苍南昌禅 606 mm，浙江省 345.6 万人受灾，死亡 204 人，倒塌房屋 5.32 万间，因灾直接经济损失 127.3 亿元；福建省受灾人口 145.5 万人，死亡 276 人，倒塌房屋 8.21 万间，大量船只损毁沉没，农作物受灾 11.133 万公顷，直接经济总损失 63.55 亿元。

2.4 风暴潮

2.4.1 风暴潮的定义

风暴潮是指在强烈天气系统（热带气旋、温带气旋、强冷空气等）作用下所引起的海面异常升高现象。当正好遇上天文潮的高潮阶段，可导致潮位暴涨，严重危及沿海地区生命和财产安全。风暴潮有时也被称为“风暴增水”或“气象海啸”等。国内外常采用实测潮位与正常潮位的代数差来计算风暴潮的增水值（图 2.14）。但有时由于离岸大风长时间吹刮，致使岸边水位剧降，有人称这种海面异常下降现象为“负风暴潮”或“风暴减水”。



图 2.14 风暴潮示意图 (NHC/NOAA)

形成严重风暴潮的条件有三个：一是强烈而持久的向岸大风，二是有利的岸带地形，如喇叭口状港湾和平缓的海滩，三是天文大潮配合。根据不同的条件，风暴潮的空间范围一般由几十千米至上千千米不等。

根据造成风暴潮的不同类型天气系统，常把风暴潮分成台风（飓风）风暴潮和温带风暴潮两大类。不同类型的大气扰动所引起的风暴潮特点不一样。由于台风（热带气旋之惯称）强度大，移动迅速，所产生的风暴潮增水大，其危害也大，相对而言温带气旋、强冷空气等天气系统的大气扰动强度较弱、影响时间较长，所引起的风暴潮增水过程较缓慢，增水相对不急剧。

每年夏秋是台风多发季节，登陆我国大陆东南沿海地区的台风频繁，平

均每年有7个左右。常见的台风直径有600~1000 km,当台风来临之时,依据距离台风中心的远近,沿海验潮站记录的水位变化表现出不同的特征。全过程可划分为三个阶段:初振阶段、激振阶段和余振阶段。图2.15是2005年0518号强台风“达维”登陆海南省期间,清澜验潮站纪录到的风暴潮增水过程曲线。

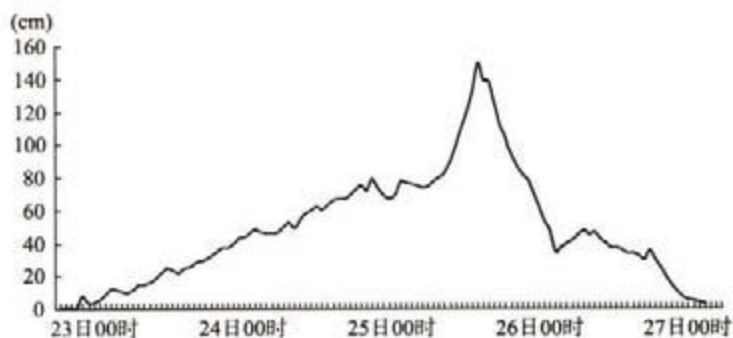


图 2.15 2005 年 0518 号强台风“达维”登陆海南省期间
清澜验潮站纪录到的风暴潮增水过程曲线
(注:增水单位为 cm)

2.4.2 风暴潮的等级

风暴潮的强度可以由风暴潮增水的多少来划分,一般把风暴潮分为7级,详见表2.4。

表 2.4 风暴潮强度等级

级别	名称	增水(单位: cm)
0	轻风暴潮	30~50
1	小风暴潮	51~100
2	一般风暴潮	101~150
3	较大风暴潮	151~200
4	大风风暴潮	201~300
5	特大风暴潮	301~450
6	罕见特大风暴潮	450 以上

2.4.3 全球风暴潮灾害概况

美国、日本、印度、孟加拉国、中国、菲律宾、英国等国是风暴潮灾害多发国家。中外历史上严重的风暴潮灾害事例不胜枚举。风暴潮往往伴随着

狂风巨浪，导致水位暴涨、堤岸决口、农田淹没、房舍倒塌、人畜伤亡，酿成巨大灾害。全球受热带气旋影响比较严重的地区是孟加拉湾沿岸、西北太平洋沿岸、美洲东海岸，因此那里的风暴潮灾害也比较严重。

1970年11月12—13日孟加拉湾特大风暴潮，曾使30~50万人丧命，100万人无家可归；1991年4月29日孟加拉湾再次遭受特大风暴潮侵袭，近百万栋房屋毁损，死亡人数约13.9万人；1900年9月8日，美国墨西哥湾沿岸加尔维斯顿遭受一次强风暴潮侵袭，6000~12000人被淹死。

2005年8月29日“卡特里娜”飓风及引发的风暴潮侵袭了世界上最富有、科技最发达的美国，海水淹没了地势低于海平面的新奥尔良等地，100多万户家庭断电；大批房屋建筑被淹，超过1833人遇难，导致墨西哥湾沿岸的石油工业陷入瘫痪，能源设施破坏严重，由此产生全国油价飙升，创历史新高，造成迄今为止世界上经济损失最大（约1338亿美元）的一次自然灾害，震惊全球。

2.4.4 我国台风风暴潮灾害概况

在全球8个热带气旋生成区中，西北太平洋生成区台风生成频率最高，占全球总数的33%。同时，西北太平洋的台风强度也是全球热带气旋中最强的。在西北太平洋沿岸国家中，我国近海大陆架水域较浅，岸带上众多的河湾、宽阔的滩涂有利于风暴潮的充分发展，夏、秋季节受台风登陆侵袭次数最多。我国风暴潮灾一年四季均有发生，受灾区域几乎遍及整个中国沿海，所受灾害居西太平洋沿岸国家之首。在我国历史文献中又多称为“海溢”、“海侵”、“海啸”及“大海潮”等，把风暴潮灾害称为“潮灾”。据清康熙《三忙续识略》中记载，1696年发生在上海地区的一次特大风暴潮灾，死亡人数达10万人之多；民国《潮州志》记载的1922年8月2日广东省汕头地区特大风暴潮，暴雨倾盆，平地水深丈余，乡村多被卷入海涛中，死者7万余人。

我国每年平均发生增水1 m以上的台风风暴潮约6次，其中形成灾害的平均为2.4次。每年平均发生增水1 m以上的温带风暴潮达11次，虽次数远大于台风风暴潮，但成灾的平均为1.4次，明显低于台风风暴潮灾。

每次风暴潮造成的经济损失少则几亿元，多则达几百亿元，因此风暴潮作为我国主要的海洋气象灾害，已成为国家防灾减灾的重点之一。例如，2005年我国大陆因风暴潮造成的经济损失达329.8亿元，死亡137人。

表2.5列出了1949—2010年期间我国大陆的台风特大风暴潮灾概况。

表 2.5 1949—2010 年期间我国大陆部分台风风暴潮灾统计表
(乐肯堂, 2002; 中国海洋灾害公报)

序号	台风名 (编号)	日期 年、月、日	测站	最高风暴 增水 (厘米)	受灾区域	人员死 (伤)	直接经济 损失 (亿元)
1	Wanda (5612)	1956. 8. 1	澈浦	502	杭州湾等	4626	几亿
2	Fred (6508)	1965. 7. 15	南渡	287	雷州半岛等	—	>1 亿
3	Viola (6903)	1969. 7. 18	汕头	302	粤东	1554	几亿
4	Elsie (6911)	1969. 9. 27	梅花	199	闽江口等	死伤合计 7770	>1 亿
5	Mary (7413)	1974. 8. 20	尖山	224	长江口、杭州湾	189	3
6	Joe (8007)	1980. 7. 22	南渡	594	雷州半岛、海南	414 (645)	5
7	Agnes (8114)	1981. 9. 1	吕泗	203	长江口等	53	几亿
8	无名字 (8609)	1986. 7. 21	石头埠	117	广西沿海	37 (700)	39
9	Wayne (8616)	1986. 9. 5	南渡	352	雷州半岛、海南	20 (363)	4.7
10	Gordon (8908)	1989. 7. 18	三灶	176	珠江三角洲	30 (145)	11.1
11	Vera (8923)	1989. 9. 15	海门	146	浙江台州等	175 (696)	13.2
12	Dot (9018)	1990. 9. 8	温州	241	闽、浙沿岸	110	12.2
13	Fred (9111)	1991. 8. 16	南渡	384	雷州半岛等	21 (208)	12.9
14	Polly (9216)	1992. 8. 30	瑞安	203	闽、浙、鲁等	276 (591)	92.6
15	Becky (9316)	1993. 9. 17	灯笼山	162	珠江三角洲	7	15.2
16	Fred (9417)	1994. 8. 21	温州	269	闽、浙沿岸	1216	177.6
17	Gloria (9608)	1996. 7. 31	梅花	225	闽、浙沿岸	122 (2298)	79.5
18	Winnie (9711)	1997. 8. 18	健跳	261	浙、苏、鲁沿岸	239	337
19	Dan (9914)	1999. 10. 9	厦门	122	厦门至泉州湾	72	40.0
20	“派比安” (0012)	2000. 8. 31	黄埔公园	187	长江口等	23	67
21	“森拉克” (0216)	2002. 9. 7	鳌江	321	闽、浙、沪沿岸	30	62.2
22	“伊布都” (0307)	2003. 7. 24	北津	319	粤、桂沿岸	3	21.54
23	“云娜” (0414)	2004. 8. 12	海门	350	闽、浙、沪沿岸	22 (10)	21.5
24	“海棠” (0505)	2005. 7. 19	梅花	237	闽、浙沿岸	3	32.4
25	“麦莎” (0509)	2005. 8. 6	澈浦	241	浙、沪、苏沿岸	7	35.19
26	“卡努” (0515)	2005. 9. 11	海门	320	浙、沪、苏沿岸	18	22.2
27	“达维” (0518)	2005. 9. 26	南渡	197	琼、粤沿岸	25	121.3
28	“桑美” (0608)	2006. 8. 10	鳌江	401	闽、浙沿岸	326	70.2
29	“韦帕” (0713)	2007. 9. 19	鳌江	228	浙沿岸	—	7.79
31	“黑格比” (0814)	2008. 9. 24	北津	270	粤、琼、桂沿岸	26	132.74
32	“莫拉克” (0908)	2009. 8. 9	瑄头	232	闽、浙、苏沿岸	—	32.65
33	“灿都” (1003)	2010. 7. 22	水东	196	粤、桂沿岸	5	32.15

* 1959 年前为序号

(1) 渤海区风暴潮灾害

渤海是一个半封闭的浅海，北、西、南面分别为辽东湾、渤海湾和莱州湾，东面的渤海海峡与黄海相通。渤海西岸和南岸的地势平缓，潮水每增高 1 m，就要侵入陆地 5~10 km。因此，当出现强烈而持久的东北风时，海水常常涌上海岸，在广大区域，特别是渤海湾和莱州湾形成风暴潮。据史料记载，清代 268 年中出现过 45 次潮灾，其中较大的 10 次，特大的 3 次，分别发生在 1668、1782 和 1845 年，1782 年的风暴潮曾使海水漫溢海岸带上百千米。

①渤海湾。渤海湾风暴潮出现次数较多，并以台风引发的风暴潮为主。据不完全统计，渤海湾平均每隔 5 年出现 1 次较大的风暴潮，其中 8 月份最多、7 月份次之。台风路径主要为从黄海北上及经由东海登陆再由渤海湾入海居多，例如 7203 号台风和 8509 号台风引发的风暴潮灾。

②莱州湾。莱州湾风暴潮发生次数仅次于渤海湾，且以冷锋配合气旋类占多数。据不完全统计，由强寒潮引起的风暴潮频率占 59%，温带气旋引起的占 32%，而台风引起的仅占 9%。

(2) 黄海区风暴潮灾害

黄海西岸包括山东岸带和江苏岸带，历史上山东半岛也曾出现风暴潮，但更严重的是在江苏岸带，这是因为江苏岸带为平原海岸，地势低洼，不仅夏季的台风可以造成严重的潮灾，冬季的冷空气大风也可以造成潮灾，当然冷空气大风造成的潮灾比台风风暴潮轻得多。据不完全统计，由台风引起的潮灾平均每年出现 1.3 次，时间多在 7—9 月。

造成较大灾害的台风路径有 4 条，一是从福建、浙江沿海登陆的台风继续北上，在上海至连云港之间重新入海，如受 7123 号台风影响，江苏响水站测得增水 2 m 以上；二是从黄海北上登陆山东半岛或辽东半岛的台风，如 1939 年 8 月 30—31 日登陆青岛的台风，由于台风中心气压较低，风力较大，强东北风持续达 20 多个小时，造成了严重的潮灾；三是在东海北部、黄海南部西行的台风，在长江口或江苏沿海登陆消失，这类路径数量很少，但是一旦出现，造成的潮灾往往很严重，例如 7708 号台风，9 月 1 日在长江口登陆，江苏省响水站出现最大增水 2.12 m；四是在上海以东海面或黄海南部转向东北的台风，当台风强度较大、移速较慢时，江苏沿海便出现风暴潮，例如 8114 号台风，使江苏沿海大部分地区出现了历史上有记录以来的最高潮位。

(3) 东海区风暴潮灾害

①上海岸带。上海地处我国海岸线中部，长江入海口，东濒东海，南邻杭州湾，地势低洼，地面高程一般在 3~3.5 m，其中 1/4 的面积低于 3 m，最低处仅 2.3 m，黄浦江大潮水位常高出地面 1 m 以上，积水内涝势必致灾。

上海的风暴潮主要由台风引发,根据统计,1949—1999年期间,上海达严重强风暴潮标准的过程有60次,占总影响次数的51.7%,平均每年1.2个;时间集中于7—9月,其中8月最多。若台风影响期间逢农历初三、初八前后大汛,就有可能出现严重的风暴潮灾害。造成上海地区高潮位的台风路径是近海转向型和浙沪登陆型,其中近海转向型占约1/2,最典型的是8114号台风,造成上海地区10多个站超过历史最高潮位,吴淞站潮位高达5.74 m。浙沪登陆型台风带来的潮灾亦比较严重,据统计,此类型占总数的23%,典型的如9711号台风,该台风1997年8月18日晚21时30分在浙江温岭登陆,登陆时中心气压955 hPa,近中心最大风速40 m/s,18日至19日上海地区普遍出现8~10级的东北偏东风。台风影响上海期间,又适逢农历七月十五的天文大潮,风潮相遇,使上海地区沿杭州湾、长江口、黄浦江干流出现的潮位为百年一遇。

此外,登陆福建北上的强台风或者从海上转向东北的特强台风也能造成上海岸带的潮灾。

②浙江岸段。浙江岸段的风暴潮由台风引发。该区海岸形状复杂,海湾众多,一旦台风暴潮与天文大潮叠加,水位上涨迅猛,潮灾相当严重。近30年以来,造成增水50 cm以上的平均每年有2.5次;增水100 cm以上的平均每年1.5次。

影响浙江的台风主要发生在6—10月,以7—9月最多。在浙江温州至海门之间登陆的强台风,一般都在浙江南部造成较大的增水,如5207号台风在浙江中部登陆,温州最大增水达3.88 m;8923号强热带风暴影响下,海门最高潮位达6.5~7.1 m。在海门至杭州湾附近登陆的强台风,一般使浙北、杭州湾出现较大的增水,如5612号台风使乍浦增水达4.34 m。浙江外海北上的台风如果强度大,移速缓慢,也能产生较大的增水,如8114号台风,舟山地区增水超过1.5 m,有的站出现历史最高潮位记录。1949年以来,浙江沿海最强的风暴潮发生于1956年8月2日,5612号台风在象山登陆,沿海风速达50 m/s,乍浦、镇海、宁波分别出现历史上最大增水,大潮冲倒房屋7000多间,伤亡2万余人。1997年9711号台风使整个浙江沿岸形成大的风暴潮,健跳站最大增水261 cm,致329人死亡,直接经济损失267亿。2005年0509号强台风“麦莎”于8月6日3时40分在浙江省玉环县干江镇登陆,“麦莎”影响期间正逢农历七月大潮,受风暴潮和天文大潮的共同影响,沿岸有10多个站的风暴潮增水超过100 cm,最大增水出现在浙江澈浦,达241 cm,沿岸10多个站的潮位超过当地警戒潮位,浙江海门站超过值最大,达71 cm。浙江省台州、宁波、温州、舟山、嘉兴等市受灾,直接经济损失15.69亿元,损毁

海堤 11.02 km, 沉没、损毁船只 1790 艘。2005 年 0515 号强台风“卡努”于 9 月 11 日 14 时 50 分在浙江省台州市金清镇登陆, 浙江省最大增水出现在海门, 达 3.2 m, 超过警戒潮位 1.16 m。近年造成特大风暴潮的还有 2006 年 0608 号超强台风“桑美”, 它于 8 月 10 日 17 时 25 分在浙江省苍南县登陆, 登陆时最大风力达 17 级, 沿海增水超过 1 m 的验潮站有 6 个, 最大增水发生在浙江鳌江, 达 4.01 m, 6 个验潮站的最高潮位均超过当地警戒潮位, 浙江省瑞安潮位超过当地警戒潮位 62 cm; 浙江台州、温州、丽水等地受灾人口 345.6 万人, 农田受淹 10.32 万 hm^2 , 堤防决口 674 处共 81.1 km, 损坏堤防 5180 处共 396.4 km, 冲毁塘坝 678 座, 渔船沉没 1003 艘。

③福建岸段。福建沿海的风暴潮也由台风造成, 据资料统计, 侵袭和影响福建的台风平均每年 5~6 次, 其中过程最大增水大于 50 cm 的平均每年 2 次; 潮灾最多的年份是 1961 年, 年内出现 6 次; 潮灾最多的月份是 1956 年 9 月, 在闽江至九龙山地段连续受 5622、5626、5627 号三个台风风暴潮侵袭。本岸段台风风暴潮的发生时间均在 6—10 月, 以 7—9 月最多, 风暴潮超过警戒水位的台风以 9 月最多。台湾海峡北端的长乐至连江沿岸为福建省台风风暴潮的多发区, 尤其是福州马尾港最严重; 6008 号台风造成百日潭(马尾)最大增水值达到 2.52 m。

造成福建沿海风暴潮灾的台风可分为 3 种类型: 一是穿越台湾岛进入海峡登陆福建中部的路径, 当台风强度较强时, 影响范围广、潮灾重, 如 6911 号台风, 台风登陆时中心气压 965h 百帕, 风力 11 级, 崇武至福州一带均超过历史最高潮位, 白岩潭(马尾)增水 2.38 m, 福建省受灾人数达百万以上, 受淹农田超过 46 万亩, 风浪中船只损失 1000 多条, 伤亡 706 多人。又如 2005 年 0505 号台风“海棠”于 7 月 19 日 17 时 10 分在福建省连江县黄岐镇登陆, 受“海棠”风暴潮影响, 福建省宁德、福州、莆田、泉州市的 36 个县(市、区)受灾, 直接经济损失 26.33 亿元, 受灾人口 213.41 万。农作物受灾面积 10.72 万 hm^2 , 海洋水产养殖损失 6.44 万吨, 受损面积 8360 hm^2 , 倒塌房屋 6300 间, 损毁海塘堤防 305 处共 44.85 km, 损毁海洋工程 348 座; 二是从台湾岛以南洋面进入台湾海峡后在闽南沿海登陆的台风, 在闽南、闽中引发风暴潮, 如 5903 号台风, 厦门最大增水 1.65 m, 海水涌进市区, 低洼处水深 1 m 以上; 三是从台湾以北海面登陆闽北的路径, 主要影响闽东北岸带, 如 6614 号台风。

④台湾岸段。台湾岛每年都受到台风侵袭, 影响时间是 4—11 月, 以 7—9 月较为集中, 由于台湾海岸地形差异, 台风风暴潮的危害程度各地区之间迥然不同。较大的潮灾主要发生在西海岸和东北海岸, 西海岸尤其是西南部海岸

多浅滩，距岸5~6海里即为深海，有利于涌浪的发展，使得近岸处海水积聚而涌上陆地。东北部平原地区也有利于形成潮灾。台湾东部海岸因地势较高，很少造成潮灾。

造成台湾岛潮灾的台风路径有3类，一是穿越台湾北部和中部进入台湾海峡的台风，容易在台湾北部和中部形成潮灾；二是从巴士海峡进入台湾海峡的台风，容易在台湾西南部形成潮灾；三是南海台风向东北行，进入台湾海峡或登陆台湾西南岸的台风，容易在登陆点及台湾南部形成潮灾。

(4) 南海区风暴潮灾害

①广东岸段。广东沿海是全国海岸中台风风暴潮最严重的区域，平均每年受到5~6次台风侵袭，发生较严重的潮灾1~2次。广东岸段风暴潮主要集中在三个地区，一是汕头地区，由登陆汕头地区的台风造成，如6903、7908号台风；二是珠江口地区，几乎每年都有风暴潮发生，主要由登陆珠江口附近的台风造成，如2006年0606号台风“派比安”8月3日19时20分在广东省阳西县和电白县交界处沿海登陆，沿岸增水超过1米的验潮站有6个，最大增水发生在广东北津，达2.2m，广东省61个县市的473.49万人受灾，紧急转移28.18万人，农田受淹33.9万 hm^2 ，沉没损毁船只508艘，损毁房屋2.49万间，直接经济损失70.02亿元；三是雷州半岛及湛江地区，由于口袋状的海岸地形，容易引起海水大量堆积，在沿岸形成潮灾，8007号台风7月22日登陆广东徐闻县，造成的潮位百年罕见，南渡站潮位高达5.94m，超过警戒水位2.97m。这一地区的潮灾一般由沿南海西行的台风造成。

②广西岸段。北部湾是一个半封闭的海区，当台风进入北部湾后，整个湾区均可受到较大的影响，台风进湾之前，岸边一般吹北风，造成岸边减水，当中心到达湾区中部或者登陆前后，岸边西南风加大，整个北岸几乎同时发生增水现象。引起本岸段增水的台风活动时间为5—11月，以7—9月居多，每年约有两次较严重的风暴潮。其路径多是来自西北太平洋的台风在南海北部西行，穿越雷州半岛或琼州海峡西行登陆广西或越南北部，如6508、8007、8609号台风，6508号台风使石头埠增水达2.33m。自西北太平洋移来穿越海南岛后登陆广西的台风引起的增水略小，如7109号台风。

③海南岛岸段。海南岛也是台风影响频繁的地区之一，平均每年影响台风个数为6~7个，其中在海南岛登陆的热带风暴以上强度的平均每年约2个，台风影响的时间集中在7—10月，故风暴潮发生时间也在这个时段。虽然风暴潮在该岸段每年均有发生，但由于海南岛周围海水较深，海岸坡度大，不利于海水堆积，故风暴增水多在1m以下，增水较大的地区在岛的东面和北面，尤其是海口附近，多出现增水大值。海口历史上较强的风暴潮由8007

号台风造成，海口最大增水达 2.48 m。2005 年 0518 号强台风“达维”于 9 月 26 日在海南省万宁市山根镇沿海登陆，海南省最大增水出现在清澜，达 1.21 m。“达维”风暴潮灾害为海南省近 30 多年来最严重的一次，造成直接经济损失 116.47 亿元，受灾人口 630.54 万，死亡 25 人，农作物受灾面积 77.01 万 hm^2 ，损毁房屋 3.22 万间，沉没、损毁渔船 734 艘，损毁堤防 23 处。

2.4.5 减轻暴潮之灾

中国沿海地区因特定的地理位置和丰富的资源而发展成为我国经济的黄金地带，其人口占全国的 41%，国民生产总值占全国的 56%。近年来，沿海地区的海洋事业正方兴未艾，各省（市）都提出了以海兴省（市）的宏伟目标。但出于海洋产业大都布局于滨海区，而且随着养殖业、石油产业及沿海滩涂的开发，海洋经济的迅速发展已与沿海地区台风风暴潮灾日趋加重的事实形成了尖锐的矛盾。我国沿海几个工业基地如：珠江三角洲、长江三角洲、闽江三角洲及汕头、温州、台湾海峡地区都是风暴潮灾的重灾区，所以防止和减少风暴潮灾害已成为必须认真对待的问题。

防灾减灾的措施包括工程性措施和非工程性措施两个方面。

采取工程性措施防止风暴潮灾是最直接有效的手段。中国沿海的许多区域，尤其是大江大河的河口三角洲区域，对自然灾害如台风大风、暴雨和风暴潮等极其敏感和脆弱。在国际上，一般认为海拔 5 m 以下的海岸区域为气候变化、海平面上升和风暴潮灾害的危险区域。中国大陆沿海有这类低洼地区 14.39 万 km^2 ，常住人口 7000 多万，约为全世界处于危险区域人口总数的 27%。仅辽河平原、华北大平原、华东大平原和珠江三角洲平原，就计有面积达 9.28 万 km^2 的地区高程还不足 4 m（即极端脆弱区），这里目前生活着约 6500 万人，集中了 70 个市、县，这些区域历来受台风风暴潮影响严重。

自古以来，人们都用修造海堤的办法来抵御海潮的侵袭，而今它仍为防潮减灾的有效措施。我国大陆海岸线长 18000 余 km，共建有海堤 12000 余 km，但这些已修海堤大部分为未达标海堤，50 年一遇的标准海堤很少。临海城市现有海堤 5869 km，保护着 7300 万人、13300 多亿元产值。在临海城市海堤中，目前实际完成标准海堤 2055 km，仅占总长度海堤的 1/6，整体防御能力还很低。为此，未来以下几个方面的工作需要加强，其一，统一规划沿海防潮工程措施，将其纳入社会发展规划和计划中；多方筹措资金，使防潮工程的修建与维护有可靠的资金保障。其二，海堤的修建应根据其保护对象的重要程度，经权威职能部门的专家论证，依靠科学技术，确定合理

的海堤设计标高和选择适用的海堤断面形式。其三，在南方沿海省市达标海堤建设中，应该考虑在堤外适合的滩涂种植和恢复红树林。

在防灾减灾的非工程措施中应强调增加全民族防灾、减灾意识，加强全国海洋灾害预报系统建设。其一，由于风暴潮预报是一个难度很大，目前准确或比较准确的预报警报时效不可能太长，加强预报部门与防灾指挥部门的密切联系十分重要，以便使预报警报发挥更好的作用。由于有些干部和群众对抵御大风暴雨的思想准备明显不足，即使预报准确，依然有群众因留恋财产不肯转移，而造成人员伤亡。我们必须认识到风暴潮是人力不可抗拒的自然灾害，面对这种灾害，三十六计，走为上计。其二，防台减灾指挥部门要根据管辖区潮情、防潮设施及其他环境条件等具体情况，制定长远的防潮规划和应急性的救灾抢险方案，包括人员撤离路线和避难场所以及物资转移场所等。其三，合理开发利用沿海资源，科学规划沿海占地。必须充分考虑到风暴潮与天文潮以及向岸浪相结合而成大灾并加剧海岸侵蚀后退的不利因素，做到合理开发建设以获得更大的经济效益。其四，珊瑚礁、红树林、防护林带等都是保护海岸不受大潮巨浪侵蚀的天然屏障，对此必须停止采伐并加强保护。

2.5 山体滑坡和泥石流

对于地质状况脆弱的地区，台风的特大暴雨可以引发山体滑坡和泥石流等地质灾害，造成严重财产损失和人员伤亡。台风登陆时，受到地形抬升作用，往往会使暴雨强度加大，加剧了在迎风坡上产生泥石流的可能性。而且台风登陆后与冷空气结合也容易诱发大暴雨，这类暴雨具有持续时间短、雨强大的特点，如受9017号Cecil台风影响，浙江苍南的3h、6h、12h、24h雨量分别达298.3、412.4、514.8和573.1mm。台风降雨的特点决定了台风地质灾害具有历时短、发生相对集中的特点。统计结果表明，台风影响期间的地质灾害集中分布在台风影响最强的1~2天内，特别是泥石流灾害往往发生在降雨过程中。一旦离开台风降雨云团的影响范围，该地区发生地质灾害的危险性也急剧降低。

2.5.1 定义

(1) 山体滑坡灾害

滑坡是构成斜坡的岩土体在重力作用下失稳，沿着坡体内部的一个（或几个）松软脆弱面（带）发生剪切而产生整体性下滑的现象。滑坡是山区水

库、铁路、公路以及依山而建的民居等建筑设施遇到的一种地质灾害。大规模滑坡可导致河道堵塞、公路阻断、公车毁坏等，造成大量的人员伤亡和财产损失。

根据滑坡的不同特征，可以有多种滑坡分类的方法，按照滑坡的力学特征，可以分为牵引型滑坡和推动式滑坡；按照滑动面和地质构造特征可以分为均质滑坡、顺层滑坡和切层滑坡；按照滑坡体的主要组成物质分类可以分为堆积型滑坡、黄土滑坡、黏土滑坡和岩层滑坡。

(2) 泥石流灾害

泥石流是山区沟谷中，由暴雨、雪融水等水源激发的，含有大量泥沙和石块的特殊洪流。其特征往往是突然暴发，浑浊的泥流体沿着陡峭的山沟前推后拥，奔腾呼啸而下，地面为之震动、山谷犹如雷鸣。在很短时间内将大量泥沙、石块冲出沟外，在宽阔的堆积区横冲直撞、漫流堆积，常常给人民生命财产造成重大危害。泥石流按其物质成分可分为：泥石流、泥流和水石流。按其物质状态可分为黏性泥石流和稀性泥石流。

2.5.2 我国台风诱发地质灾害概况

(1) 台风影响区的确定

根据 1960—2003 年我国台风平均年降雨分布（图 2.16），我国登陆台风的主要降雨影响区域在东部。根据降雨分布特征并结合我国大的地貌是由第一阶梯向第二阶梯过渡的地带结构，将台风平均年降雨大于 10 mm 的区域作为台风影响区（图 2.17）。此地带平均海拔在 1000 m 以下，主要包括东北平

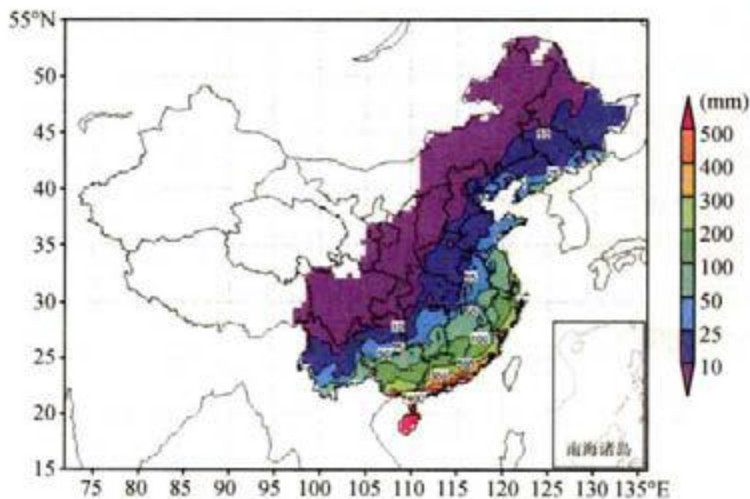


图 2.16 1970—2003 年我国台风年降雨分布

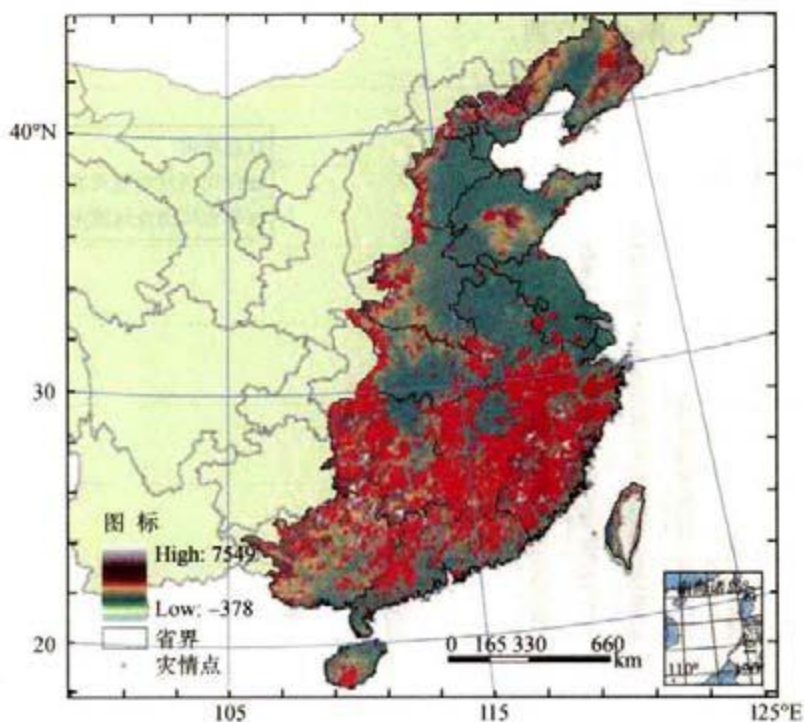


图 2.17 台风影响区及区内地质灾害分布

原、华北平原、长江中下游平原、江南丘陵、浙闽丘陵和两广丘陵，总面积达 182 万 km^2 。

2.5.3 台风影响区地质灾害空间分布特征

对照图 2.16 和 2.17 可见，我国台风降雨分布与台风诱发地质灾害在区域分布上有很好的对应关系，江西、浙江、福建和广东等省是台风降雨集中的地区，同样也是地质灾害高发区域。地质灾害密度相对高的中心主要集中在浙江南部的雁荡山和括苍山、福建南部和广东南部，以及江西、广东和湖南交界地区的南岭一带山区。随着台风降雨向内陆逐渐减少的趋势，由台风造成的地质灾害也向内陆逐渐减少。

根据诱发地质灾害条件的不同，可以将地质灾害划分为台风和非台风因素（如前汛期降雨、梅雨期降雨等）诱发的地质灾害事件。据 1990—2003 年登陆我国的台风降雨以及地质灾害事件资料，在台风影响区内，除上海外，其他省市都有地质灾害发生，且长江以南诸省明显多于北方地区（图 2.18）。总地质灾害发生频次百分比最高的是江西省，占地质灾害总数的 32%；湖南也是地质灾害高发省，占到灾害总数的 14%；然后由高到低依次是浙江、福

建、广东、安徽、湖北和广西。

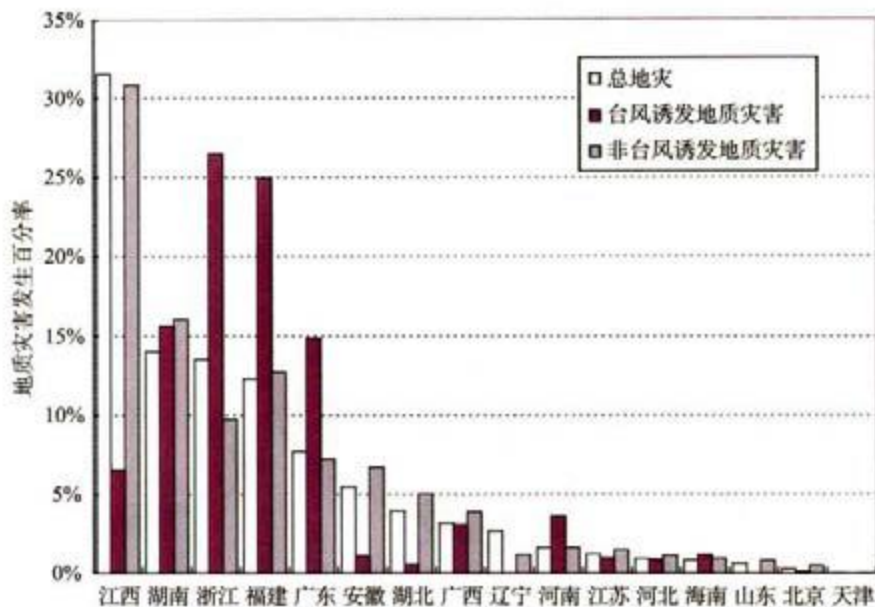


图 2.18 台风影响区内各省地质灾害频数分布

就诱发原因来看，非台风诱发地质灾害发生最多的前三省是江西、湖南和福建，分别占非台风诱发地质灾害总数的 31%、16% 和 13%。与非台风诱发地质灾害形成对比的是，一半以上的台风诱发地质灾害发生在浙江和福建，分别达到台风诱发地质灾害总数的 27% 和 25%。广东和湖南也是受台风影响严重的省份，各占台风诱发灾害总数的 16% 和 15%。在湖南，台风和非台风诱发的地质灾害比例相当，而在江西、广西、安徽和湖北，由于地处内地，主要受来自西部、北部和南部的降雨系统影响，由台风诱发的地质灾害相对较少。

2.5.4 台风影响区地质灾害时间分布特征

台风影响区内，地质灾害分布具有明显的季节性。台风诱发地质灾害从 5 月份开始出现（图 2.19），并以 7、8、9 月份为多，这与台风影响季节相吻合。6 月下旬到 7 月江淮梅雨开始，主要雨带北移到江淮、黄淮一带，由于这一区域平原居多，总地质灾害发生频率和非台风地质灾害发生频率已降到各自的次峰值，而台风地质灾害已显著增加。到了 8、9 月份的台风季节，台风诱发地质灾害也达到全年的峰值 35.6% 和 35.4%。台风地质灾害的高发期较非台风地质灾害高发期滞后 2~3 个月。

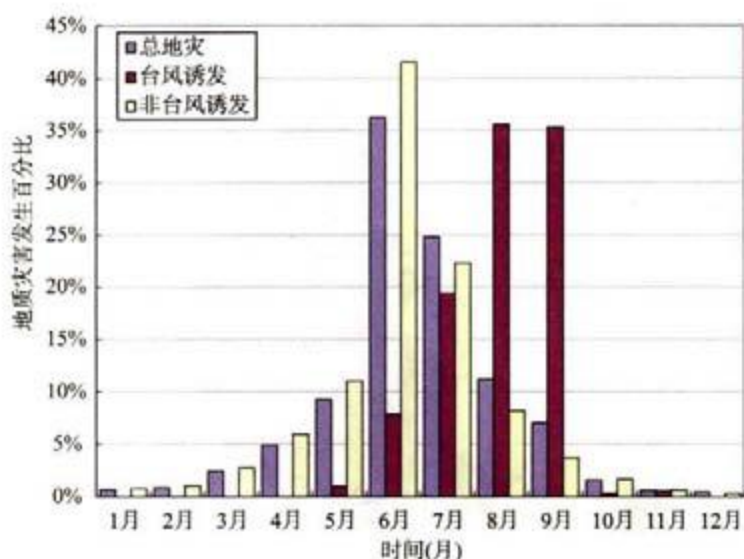


图 2.19 台风影响区内逐月地质灾害频数
(紫色柱体为台风诱发地质灾害频数)

2.5.5 台风降雨影响区域内自然地质地理特征

我国台风降雨的影响范围主要在东部地区，这个区域内平原分布广泛，同时山脉丘陵纵横，雨量丰富，地质环境复杂，众多山地丘陵之间的地带也是地质灾害发育的地区。

(1) 台风影响区地形地貌特征

台风降雨影响区主要位于我国第一台阶地带以及第一阶梯向第二阶梯过渡地带(图 2.20)，地势普遍较低，其中近四分之一的地势是处于海拔 0~50 m 之间，近 40% 的海拔高度在 100~500 m 之间，大于 1000 m 的地区很少，只占台风影响区的 3% (表 2.6)。台风影响区平均高度虽然在 500 m 以下，但地形复杂，地域差异明显，主要包含了山地、丘陵、河谷盆地和沿海平原等，自北向南山系分布中，黄河以北有长白山脉、龙岗山、千山、燕山山脉、太行山脉和吕梁山脉，在黄河以南到长江之间分布有秦岭、伏牛山、大别山等山系，长江以南主要分布有东南丘陵、江南丘陵、两广丘陵和浙闽丘陵等丘陵地带。超过 2000 m 的山峰共有 6 座。

第一阶梯向第二阶梯过渡地带包括秦岭以南的大巴山、巫山、雪峰山、武陵山等。这一段海拔 500~2000 m。地貌上多级宽缓的河流堆积阶地和多级夷平台地都比较发育。滑坡和泥石流灾害主要发生于阶地和台地边缘位置，海拔高度主要在 400~800 m。

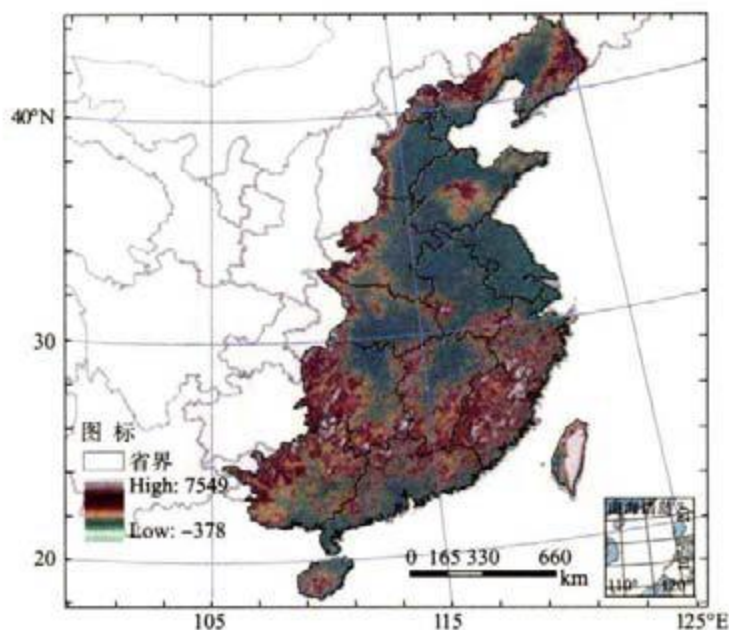


图 2.20 台风影响区地形高程分布

表 2.6 通过对 1:25DEM 数据按照 1 km² 的栅格分辨率计算的高程分布

高程范围 (m)	<100	100~200	200~300	300~400	400~500	500~1000	>1000	合计
面积 (10 ⁵ km ²)	85.50	28.29	19.03	14.58	11.55	23.69	3.30	182.64
面积百分比 (%)	46.81	15.49	10.42	7.98	6.32	12.96	1.81	100

(2) 地层岩性构造

我国东南和东部沿海具有复杂的地表构造，多属花岗岩分布和深、浅层复杂岩性结构和构造。华南各地地层发育情况存在差异，大陆地区地层发育齐全，出露的最古老地层为上太古界—下元古界，零星分布于上扬子地区。最近在浙闽地区也发现下元古界地层的存在。大陆地区南部与北部的中元古界、下古生界地层分布比较殊异：北部（扬子区）中、上元古界分布较广，且自晚元古代，先后过渡为以稳定型为主的沉积，其中江南地区显示出过渡型沉积特征；南部（南华区）中元古界最近发现于浙、闽、琼地区和邻近海域，而上元古界、早古生界均属活动型沉积。晚古生代以来，大陆由南北分界转变为东西递变的沉积体制。上古生界、中三叠统则以浅海相稳定型沉积为主，晚三叠世后形成以陆相为主的盆地沉积。台湾岛主要为中生界活动型沉积，上古生界出露十分局限，且尚未见更古老的地层出现（图 2.21）。

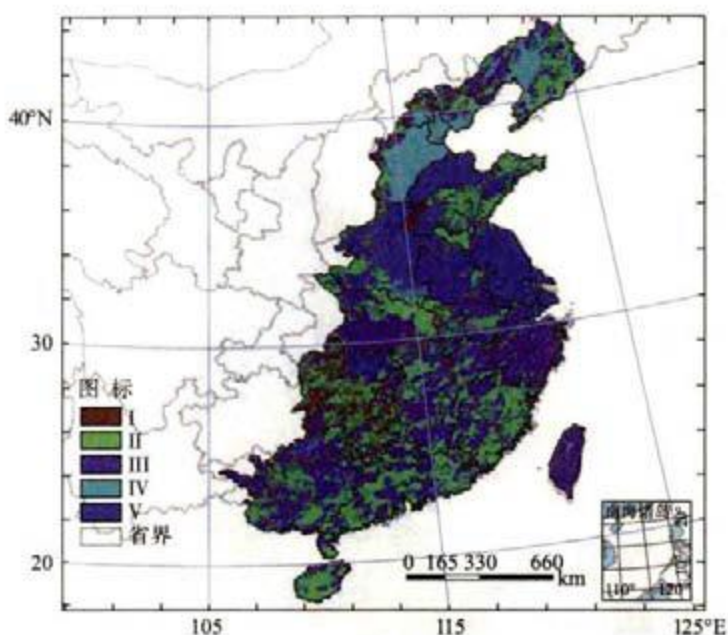


图 2.21 台风影响区岩性分布

华南大陆构造形变强烈，经历了多期造山与伸展运动。其中最重要的要属四堡—晋宁、加里东、印支和燕山、喜马拉雅四个形变期。各个时期的形变格局既具有继承性，又因不同时期板块运动方式、方向和边界条件的变化，而具有不同的综合形态与图像（王光杰等，2000）。复杂的地质构造、强烈的形变为地质灾害提供了较好的发育条件（图 2.22）。

（3）水文气候

水文气候特征是地质灾害形成的重要背景，既直接影响区域的植被分布特征，影响泥石流等的松散碎屑物质的形成，也通过影响地下水位的变化来直接影响滑坡等灾害的形成。台风影响区纵跨热带、亚热带和暖温带，分属海洋性气候、海洋性过渡气候和部分大陆过渡气候，是我国降雨集中的区域。台湾省、海南省和东南沿海的广东、广西、福建、浙江南部的年平均降雨都在 2000 mm 左右，雨量向北向西逐渐减少。

台风是引起沿海诸省暴雨的重要原因，台风影响区内也是我国暴雨集中的区域。此外，由于台风影响区山脉丘陵纵横，地形作用也是导致东部山区多暴雨的重要原因。我国东部地区内河流水网非常发达，分别属于珠江、长江、淮河、黄河、海河和辽河几大流域，其中华北、华中和华南地区的河流都以雨水补给为主，华南沿海河流具有明显的台风汛和春夏汛，东部沿海分布有我国大多数河流的入海口，列在我国年径流量前 10 位的河流中有 6 条位

于台风影响区，分别是长江、珠江、闽江、黄河、钱塘江和淮河。

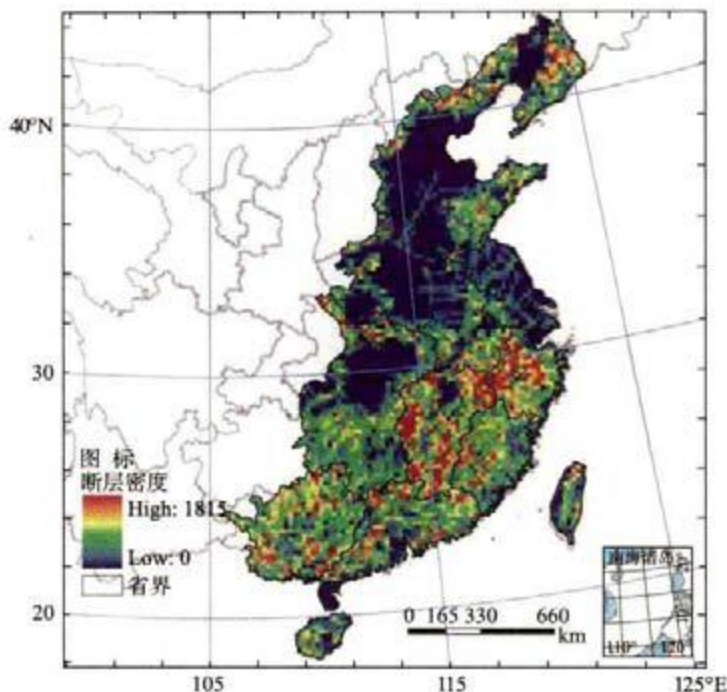


图 2.22 台风影响区断层密度分布

河流水流通过侵蚀作用破坏地表并揭起地表物质。河岸受江水的侧向侵蚀，前缘容易形成陡坡，是诱发岸体滑坡和山体滑坡的主要原因；流域内的沟道侵蚀是形成泥石流沟的重要途径；而在河道水流下切淘刷作用下，造成陡壁土体失去平衡发生崩塌。因此，台风影响区域内河网密集也为滑坡、泥石流和崩塌等地质灾害的发生提供了有利条件。

2.5.6 影响地质灾害形成的因素

通常根据经验或相关分析来检验地理、地质因子与地质灾害的关系。例如，滑坡的启动与地表侵蚀度、地貌、岩性、坡度、坡向、高程、植被之间的相关性。根据考虑区域、台风影响区域尺度和资料的精细化程度，区划选取的环境因子有所不同，对环境因子的选择，目前并无确定标准。例如，根据香港土木工程署的经验，断层对于香港地区的浅层滑坡影响很小。而作为地震活动频繁的台湾地区，地震因子（如断层密度）则作为一个重要的地质灾害诱发因子。这些因素概括起来主要有以下几方面：

(1) 地形地貌。地质灾害的发生与地形地貌关系密切。根据调查统计，中国绝大多数的地质灾害主要分布在河流、河谷的两岸。我国台风影响区的地

质灾害主要发生在海拔100~400 m之间的地区, 占到总灾害数的54%; 发生在海拔500~800 m之间的占到17%。地质灾害多集中分布于自然阶梯过渡地带和长江以南丘陵和山地。大于海拔1000 m的灾害较少, 只占总数的2%, 这也意味着在地势较高的山峰, 不利于形成地质灾害的积存物质堆积, 从而也不容易形成地质灾害。

同时, 地质灾害主要集中在长江以南地形高差较大的区域, 尤其是在浙江、福建, 高差主要在50~300 m之间, 地质灾害也较为集中, 占到总数的60%。而长江以北地区大多以平原为主, 地形高差较小, 地质灾害也较少。地质灾害主要分布在高差在50~300 m之间的地区。但随着高差继续增加, 地质灾害发生概率开始减少, 在落差较大的峡谷地带, 由于相对稳定, 而且土层不易堆积, 不利于滑坡、泥石流的发育。

(2) 坡度。地形坡度的大小, 直接影响到地质灾害的发生。坡度大小将影响地表汇流时间, 坡度越大, 地表汇流时间越小, 洪水峰值大而历时短, 极有利于泥石流形成, 而坡度越小, 其情况就完全相反; 另一方面是对于滑坡、崩塌以及残坡积物参与泥石流活动的可能性大小, 坡度越大, 地表坡面的松散物质的移动可能性就越强, 越有利于泥石流活动。对于滑坡, 坡度较大且岩层节理面与坡面平等时, 则容易发生。在台风影响区内, 灾害发生在坡度 20° ~ 30° 之间的灾害占到总数的45%, 在 10° ~ 20° 之间的灾害占28%, 30° ~ 40° 之间的灾害占16%, 而坡度大于 40° 的陡坡发生灾害的个例较少。

(3) 岩性。台风影响区内岩石按成因类型可分为三大类: 火成岩、沉积岩和变质岩。其中火成岩 (igneous rocks) 主要是高温熔融的岩浆在地下或地表冷凝形成的, 故也叫岩浆岩 (magmatic rocks); 沉积岩 (sedimentary rocks) 主要是由地表的风化剥蚀产物、火山碎屑物质等经过水和风等外力搬运、沉积或生物参与下固结而成的岩石; 变质岩 (metamorphic rocks) 是由先生成的火成岩、沉积岩或变质岩经变质作用转化而成的岩石。岩浆岩和变质岩又多是由结晶矿物组成, 故又叫做结晶岩。

按照岩石硬度大小和吸水性强弱来划分, 最后参照地层进行修正, 其中地层顺序 (按对泥石流贡献由大到小): 第四系—新生代 (第三系)—前寒武—元古代—古生代—中生代。由此确定了台风影响区内的岩性分级 (表 2.7), 其中等级表示由硬到软的分类, 级别越高表示岩性越软, 同时抗风化能力越低。从台风影响区的地层岩性分布来看 (图 2.21), 在东北平原以及江淮平原一带都以第四和第五类岩性为主, 第五类岩性条件下的第四纪松散层和软性易风化地层又都是易发生地质灾害的条件。对岩性分析结果表明, 地质灾害主要发生在第二类和第三类地层岩性条件下, 但在台风影响区域内,

这两类地层岩性条件又是主体地层，占到整个区域的 80%，而在台风影响区内在具备一定坡度条件（大于 5°）下的第四类和第五类地层岩性条件只占到 3%，地质灾害发生频数分别为 4% 和 2%，随着岩层硬度的降低和抗风化能力的降低，地质灾害发生的概率增大，砂岩、砾岩、花岗岩、板岩、片岩等质地相对较软的岩石和松散堆积物都是容易诱发地质灾害的物质条件。

表 2.7 岩性分级表

岩性 分级	岩性类型描述			备注
	沉积岩	岩浆岩	变质岩	
I	白云岩，深灰色、厚层状灰岩，结核、硅质、燧石灰岩	厚层酸性岩（厚层流纹岩、鞍山岩等）	石英，石英岩脉，辉绿岩，辉绿岩脉	凡遇到第四纪、前寒武纪和古元古代则自动降一级
II	石英砂岩，硅质砾岩，浅色灰岩，石英粉砂岩	细中粒花岗岩，闪长岩，辉长岩，鞍山岩，玄武岩，凝灰岩，流纹斑岩，基性火成岩（辉长石），超基性（橄辉岩），碱性（正长石），辉绿岩，玢岩	大理石，石英片岩，角闪岩，蛇纹岩	
III	砂岩，粉砂岩，泥灰岩，砂质、硅质泥岩，砾岩	火山碎屑岩，斑状、粗粒花岗岩，正长斑岩	片岩，板岩，变粒岩，变质玄武岩，变质流纹岩，变质砂岩，片麻岩	
IV	页岩，半胶结泥岩，泥炭，含煤层，半固结岩，弱固结砂岩，第三系普格达组，含石膏层	火山碎屑	千枚岩	
V	第四纪松散层（黄土，冲积、洪积、坡积、冰积物），亚黏土，黏土，黏质砂土			

(4) 断层密度。断层分布的密度可用以描述区域地质构造活动的强弱。可以通过土地表面断层线线密度来表征区域地质构造活动的强烈程度。通过台风影响区内断层密度和地质灾害分布的关系可以看出，断层密度越大，对地质灾害的影响程度越大。台风影响区内地质灾害样本主要分布在 300~800 m/km²，从频率比数的分布上来看，当断层密度超过 300 m/km² 时，对地质灾害的发生是有利的。

(5) 土地利用。基于夏季的遥感影像，将全国的植被和土地利用分为六大类，分别为林地（亚热带常绿针叶林、热带亚热带混交林、常绿阔叶林、温带常绿针叶林、落叶阔叶林、落叶针叶林和温带混交林）、灌丛（郁闭灌丛和稀疏灌丛）、田地（双季稻、一年一熟田、一年水旱田和一年两熟田）、草地

(高覆盖草地、低覆盖草地)以及城镇用地和滩涂等。

从不同大类的植被类型下地质灾害的分布状况分析看出(图 2.23),有 45%和 42%的地质灾害发生在林地和灌丛的情况下,从频率比数上说,林地和灌丛也在诱发地质灾害的因素中起重要作用。另外起重要作用的还有城镇用地,这也反映了人类活动的结果,人类活动包括不合理切坡、坡面破坏等。

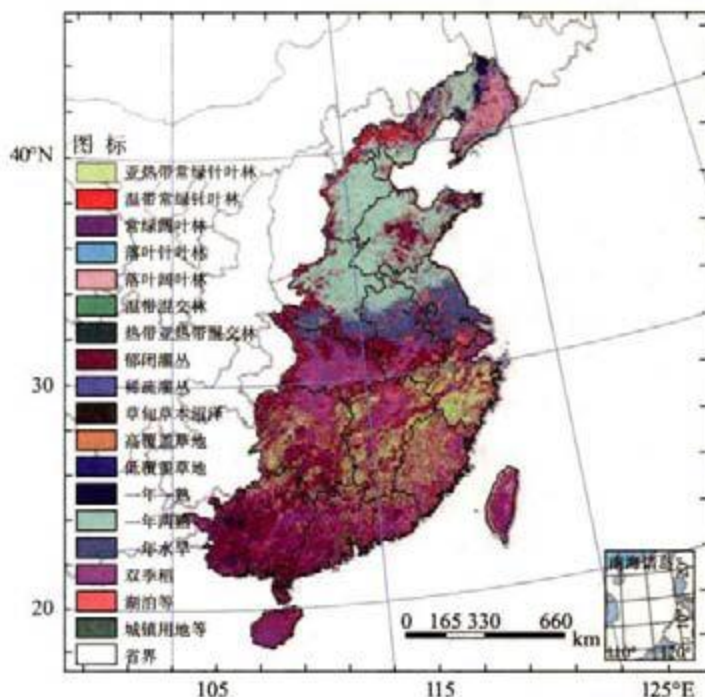


图 2.23 台风影响区植被分布

2.5.7 地质灾害危险性评价

对地质灾害发生的危险性进行分区的目的是确定某一区域内不同区域位置的地质灾害易发程度,为地质灾害防灾减灾提供基础信息和决策支持。对于区域地质灾害预测而言,地质灾害危险性评价又称为地质灾害空间预测,其重要的理论基础是工程地质类比法,即类似的滑坡工程地质条件及组合应具有类似的斜坡不稳定性和可能的滑坡作用。一方面,由于控制地质灾害发生的地质环境因素具有空间上的稳定性,因此,地质灾害的空间分布具有区域上的分布规律和地质作用规律;另一方面,地质灾害系统是非常复杂的,外部因素的随机作用又会造成地质灾害的发生具有随机性的特点。因而,地质灾害的空间预测是近似的、相对量化的。无论是区域地质灾害空间预测还是单体地质灾害预测都必须建立在对地质灾害的机理研究的基础之上,机

理研究有助于准确选择地质灾害空间预测的要素和预测模型,对地质灾害发生的空间危险性分析具有重要的参考价值。

对地质灾害危险性评价的研究很多,一般采用统计预测方法,如信息量模型、Logistic 回归模型、支持向量机(SVM)模型等,将地质灾害发生的可能性与其所处地质环境因子联系起来,并借助地理信息系统(GIS)建立区域的地质灾害危险性评价模型。地质灾害危险性区划模型发展是与地质灾害预测理论、数学、信息科学等相关学科及技术的发展紧密联系的,伴随复杂科学和计算机技术的飞速发展,地质灾害空间预测模型的发展也是日新月异,这里主要介绍两种常用的预测模型。

(1) 信息量模型

信息量模型是进行区域地质灾害危险性区划的一种有效方法,它适用于中小比例尺区域地质灾害危险性区划。在信息预测中,地质灾害现象受多种因素的影响,各种因素所起作用的大小、性质是不相同的;在不同的环境中,对于地质灾害的危险性而言,总会存在一种因素组合,而不是停留在单个因素上,而这种因素组合可用“信息量”来表示。

信息量模型从整个台风影响区域的角度,考虑各灾害分布单元中某一因子的具体状态对灾害发生的影响,信息量模型是对地质灾害环境影响因子集成的一种办法。这里模型的影响区域为台风影响区域,单元面积为 1 km^2 。设 S 为台风影响区域单元总数, S_{i,A_i} 为第 i 个因子状态为 A_i 的单元数, N 为地质灾害分布的单元数, N_{i,A_i} 为灾害分布单元中第 i 个因子状态为 A_i 的单元数,则对于每个第 i 个因子状态为 A_i 的单元,该因子的信息量,即对该单元灾害易发性的贡献为

$$I_{i,A_i} = \ln\left(\frac{N_{i,A_i}/N}{S_{i,A_i}/S}\right), (i = 1, 2, \dots, n)$$

各因子对该单元灾害易发性的贡献之和,即该单元的总信息量为

$$I = \sum_{i=1}^n I_{i,A_i}$$

总信息量 I 越大,则表明灾害发生的危险性越大。因此,各灾害发生点的总信息量即可作为综合预警模型中表征各地质和环境因子对灾害易发性影响的相对静态部分。

(2) Logistic 回归模型

回归分析是研究随机变量关系的一种数理统计方法,可以通过对大量资料的分析找出其内部的关系,但其适用前提是有足够多的有代表性的样本。近十余年来,降雨引发地质灾害的机理及预报预警技术的研究取得了长足进展,其中,基于统计学中的 Logistic 回归,利用高分辨率的地学数据来拟合

地质灾害的发生概率是地质灾害预报预警技术的发展方向之一。

广义线性模型中的 Logistic 回归可用来建立地质灾害的发生概率模型。对于地质灾害预报而言, 设所要回归的随机变量为灾害发生的概率 p_i , 其取值范围为 $(0, 1)$, 而预报因子则为引发地质灾害的气象和地质环境因素。这些因子的取值范围一般在 $(-\infty, +\infty)$ 。为了能建立回归关系, 需要引入连接函数, 将 p_i 的取值范围映射到 $(-\infty, +\infty)$ 。具体形式为

$$\ln\left(\frac{p_i}{1-p_i}\right) = \beta_0 + \sum_{j=1}^m \beta_j x_{i,j} \quad (i = 1, \dots, n)$$

上式称为 Logistic 回归。其中, p_i 为第 i 种因子条件下灾害的发生概率, β_j ($j = 0, \dots, m$) 为需要拟合的模型参数, $x_{i,j}$ ($j = 1, \dots, m$) 对应于第 i 次灾害发生概率所选用的 m 个预报因子, $\mu_{i,j}$ ($i = 1, \dots, n$) 为第 i 种因子取值情况下对应的响应值。模型参数可以用极大似然 (Maximum Likelihood) 法估计。

对地质灾害发生的危险性进行区划的目的是能够定性地描述台风影响区内不同位置的地质灾害易发程度。根据选中的地质灾害影响因子, 利用信息量模型制作了台风影响区地质灾害危险性区划 (图 2.24)。对地质灾害历史样本采用聚类分析法将各栅格的信息量值分为四级, 分别为高易发区、中易发区、低易发区和不易发区。

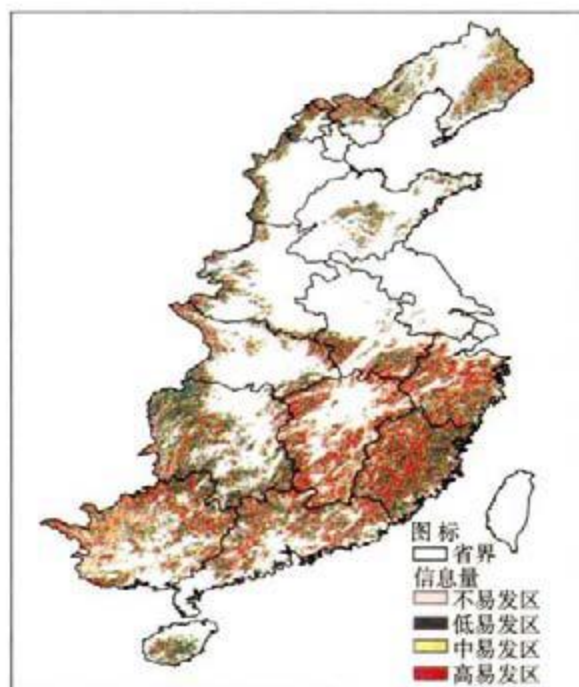


图 2.24 台风影响区危险性区划

可以发现,浙江中南部、江西南部、西部和东部以及广东北部和福建西部都是地质灾害危险性较高的区域,这与地质灾害历史个例的分布是一致的。

在台风影响区域内超过一半(61%)的区域属于地质灾害不易发区,这些区域包括平原地带和高差较低的区域。低、中、高易发区分别占到台风影响区域的13%、15%和10%。中、高易发区主要位于浙江、福建和江西。

2.5.8 台风地质灾害典型个例

(1) 9608号超强台风(Herb)。登陆后先西行,后北行,降雨过程集中在1996年7月31日—8月4日,主要影响福建、浙江、广东、江西、湖南、湖北、河南和安徽省。降雨主要发生在福建东部、湖南东部、浙江南部、江西南部 and 河南北部,累计雨量最大为江西庐山418mm。地质灾害主要发生在浙江南部、福建东部、江西西南山区、湖南南部以及河南北部。地质灾害点主要分布在大雨中心的江西、河南、湖南、福建和浙江南部地区。

(2) 9909号热带风暴(Wendy)。9909号热带风暴在广东登陆后,1999年9月3—6日为主要降雨日,降雨主要集中在广东东南部、江西中部、上海、江苏南部,雨量为50~140mm,地质灾害主要集中在浙江南部山区。

(3) 0010号超强台风(碧利斯)。0010号超强台风“碧利斯”在我国台湾和福建登陆,2000年8月23—27日为主要降雨日,广东中部、湖南东部、江西、浙江、安徽、上海、江苏、湖北和河南部分地区降雨总量10~50mm,其中广东、福建、湖南部分地区、浙江东部、山东东部降雨总量50~200mm,而广东梅县地区、福建中部、浙江东南部降雨200~300mm,降雨日数均为1~4天。地质灾害主要发生在浙、闽南部的雨量中心。地质灾害点主要分布在浙、闽南部山区。

(4) 0212号强热带风暴(北冕)。0212号强热带风暴“北冕”于2002年8月5日6—7时在广东陆丰登陆,最后在江西境内消失。2002年8月2—6日,广东大部、福建大部、湖南南部、江西南部、广西东部过程雨量一般有100~200mm,部分地区达200~400mm,局地超过400mm。地质灾害点主要集中在福建东部和江西南部山区和丘陵地带。

2.6 其他灾害

台风不仅带来狂风、暴雨、风暴潮等灾害性天气,而且由于台风的连锁效应还会带来群发性灾害。例如,台风引发的暴雨、洪水,可能导致洪泛区卫生状况恶化,引发各种急性传染病的流行。水土流失、泥石流等次生灾害使

农业耕地遭到泥沙石的掩盖,影响农业生产的发展。风暴潮引起的海水入侵,使地下水受污染,土地盐碱化,破坏当地的生态平衡。同时,由于受灾群众生活遇到很大困难,精神受到沉重打击,大大降低生产积极性,使受灾地区经济发展滞后,形成脆弱的社会环境,降低抗灾自救能力。此外,台风灾害对具有特殊文化特性的建筑或遗迹及具有科学价值和旅游价值的珍稀动植物、自然保护区、风景旅游区可能造成破坏。

2.6.1 瘟疫

台风灾害后,因死伤禽畜和各处污秽杂物不及时处理,病菌容易繁殖,加以蚊蝇之传播,极易有传染病流行,如痢疾、霍乱等。1991年4月29日孟加拉国发生一次特大台风灾害,再加上台风过后瘟疫横行,共造成约13.9万人死亡,损失近30亿美元。事后,孟加拉国政府组织了详细的调查分析指出,平坦低洼地形、漏斗状海岸线、落后的社会制度、人民极端贫穷是特大灾害的基本原因。

因此,在台风过后,应特别注意及时清洁环境、清除污物、喷洒消毒药品,发现有传染病应立即赴医疗卫生机构隔离医治,以防蔓延。

2.6.2 台风与健康

台风的低气压和狂风这两种气象特征要素对人体健康都有负面影响。大风呼啸时,其极大的噪音会直接影响人体的中枢神经系统,从而使人产生包括恐惧在内的一些心理障碍。台风影响时伴随的激烈天气变化,包括气温的大幅下降,对人体也有影响,科学实验证实,当空气温度低于 20°C 时,风力每增加2级,就相当于气温下降 $5\sim 6^{\circ}\text{C}$,也就是通常说的“体感温度”下降。台风来临时,风速骤增,气温突降,而“体感温度”下降得就更厉害了,人体的寒冷感觉会突增,强风会使人体呼吸道局部温度降低,毛细血管收缩,黏膜上皮的纤毛活动减慢,气管排出细菌的功能减弱,故容易诱发呼吸道疾病(常见的是感冒、咳嗽),慢性气管炎、支气管炎、肺气肿病人在凉风吹拂下,病情极易复发,一些发热病症,一遇凉风势必加重病情。在大风和相对低温的刺激下,人体动脉平均压升高,心肌需氧指数也相应增高。据医疗气象学家研究,约77%的心肌梗塞患者对降温明显的大风过程有显著的敏感症状,这样的过程对关节病症、胃部病症的影响也非常显著。

台风作为一种低气压天气过程,低气压本身对人体健康也有不利影响,主要是影响人体内氧气的供应。当自然界气压下降时,大气中氧分压、肺泡的氧分压和动脉血氧饱和度都随之下降,导致人体发生一系列生理反应,如

呼吸急促、心率加快、头晕、头痛、恶心、呕吐和无力的症状，神经系统也会发生障碍。尤其在台风中心（也就是“台风眼”）移来时，气压常常降到 900 多 hPa，心脑血管病或心肺功能不佳的患者会有明显的不适，而健康人因为台风眼的迅速移出，气压逐渐升高，就可能忽略了低气压的“不适”反应。

日本的医疗气象专家经过数年的研究发现，大多数肺结核患者咳血、血痰加重的程度与低压环流天气有密切的关系。患者病情恶化时，有 90% 是在低压环流形势下发生的，有半数以上是在低压过境时发生的。如同夏季雷雨前的高温高湿天气（此时气压较低）一样，台风到来前，人们也会感到憋气和压抑，使人的植物神经趋向紧张，容易引起一些不适症状和生理病症。

2.6.3 生态灾害

登陆台风过境时会引起沿岸风暴潮异常增水，导致灾害，滨海湿地相当多的部分时常会处于潮水的作用下，当风暴潮发生时，沿岸水位比正常情况下高出 2~5 m，波浪和潮流作用的边界迅速向陆地扩展，岸线遭受侵蚀、滩面遭受冲刷、潮滩结构破碎、沉积物质改变、植被遭受毁坏、地貌形态改观等现象随之发生。在很短时间里，滨海湿地的形态特征、物质组成、生态结构、环境状况等都将发生显著的变化，其所引发的一系列结果在之后相当长时间里都会存在并将产生深刻的影响。主要有以下表现：

(1) 淹没沿海低地，破坏湿地环境

风暴潮发生时，最直接的影响便是迅速淹没大片沿海低洼地，对滨海湿地生态环境造成毁灭性破坏。风暴潮的潮位高，波浪能量大，发生时将使海岸迅速蚀退，湿地范围缩小。例如 1981 年，8114 号台风引发的风暴潮使江苏海州湾北部的沙岸退缩 110 m，东灶港至新港 3200 m 以内的海滩上，近 678 万 m^3 泥沙被冲走，相当于 1981 年 7 月—1982 年 6 月一年内同一地区被冲走的泥沙总量；又如 1992 年的 9216 号台风引发的风暴潮过程中，山东沿岸沙质海岸退缩 3~12 m，最大达 30 m，损失土地约 4.66 km^2 。

(2) 破坏岸滩形态，湿地结构破碎化

台风风暴潮的巨大破坏力能使原有的地貌形态发生迅速变化。在黄河口门及其周围的淤积区，风暴潮往往改变河口流路及潮汐通道的形态和口门的方向；在刁口等蚀退型海岸，风暴潮使高潮线处的陡坎后退，在海滩上形成劣滩、贝壳滩及贝壳堤。风暴潮的高能潮流，卷起大量泥沙，或漫过沿岸堤，直接侵入潮上带平原地区，或沿河道、潮道上溯，造成河道、泻湖海水漫溢。

随着风暴潮能量的减弱及潮水的逐渐退却，其携带的大量泥沙及粗粒沉积物堆积在高潮线向陆的后方，形成风暴潮沉积。在潮间带形成的劣滩，其高约15 cm左右，其宽度约在20~30 m左右。受波浪的影响，由陆向海方向可形成几级大小不等的阶地式劣滩。风暴潮在使岸线迅速后退的同时，使滩面遭受冲刷，潮沟扩宽，枝杈增多，滩面形态破碎化，使其更易于遭受侵蚀。

(3) 毁坏地表植被，改变湿地景观

台风风暴潮来袭时，往往使植被遭受冲刷，根部裸露，严重的可使地表植被全部毁坏死亡。如1997年8月20日，黄河三角洲遭受特大风暴潮侵袭时，在滨海区域经多年营造的总面积达1.2万 hm^2 的全国最大的人工刺槐林和白杨林被全部摧毁，昔日林海顿时变成了荒原。风暴潮期间，海水漫溢，淹没大片土地，大量的可溶性盐类被带至陆地，使大量盐类积聚，破坏土壤物质结构，形成大面积盐碱化土地；盐类物质侵入地下，形成高矿化度地下水，在蒸发作用下，盐类返于地表，形成轻重不同的盐碱土壤，植被难以生长。在滨海地带，风暴潮的反复影响，使土质变坏，往往形成条带状分布的土壤带。在不同的土壤带上，发育的植被群落也不同。在黄河三角洲时常可以看到，植被呈现条带状分布。这是风暴潮对滨海湿地作用程度的强弱不同导致土壤结构发生变化的结果。

(4) 加重海水入侵，恶化湿地水环境

海水入侵是某些滨海低地的重要灾害之一，海水入侵的潜在危害大，治理难度大。海水入侵不仅能使滨海湿地水质变坏，恶化滨海湿地水环境，进而造成滨海湿地生态环境的整体恶化，海水入侵还直接引起水资源的破坏，影响人们的生产、生活和身体健康。在深圳红树林自然保护区，台风对红树林影响的调查研究表明，11~12级或者更大的风力才会对红树林生态系统造成损害。台风对海桑类红树林的损害率最高达80%，严重影响红树林的防护功能和其他效益。

台风风暴潮灾往往扩大海水入侵的范围，加剧海水入侵的危害。莱州湾沿岸是我国海水入侵较为严重的地区之一，这与该区频繁的风暴潮灾害有着直接的关系。风暴潮灾害对滨海湿地的影响，不仅于此。风暴潮灾过后的自然资源退化、生态环境的其他恶化、偶发疾病的流行、湿地生产力的下降、大的风暴潮灾所造成的次生灾害等，往往在较长时间都难以消除。

2.7 气候变化对台风潜在破坏力的影响

台风是否致灾及灾情的大小等在很大程度上取决于台风的强度及其风雨