

# 热带气旋对中国沿海风电开发的影响

张容焱<sup>1</sup> 张秀芝<sup>2</sup> 蔡连娃<sup>3</sup> 李白良<sup>4</sup>

(1. 福建省气候中心, 福州 350001; 2. 国家气候中心;  
3. 福建省东山县气象局; 4. 福建省气象台)

**提 要:** 利用 1961—2006 年热带气旋(TC)资料, 选取进入距海岸 3 个纬距左右警戒区的 TC 为影响中国沿海风电开发的 TC; 根据风电工程风电机组(WTGS)安全等级, 详细分析了影响中国沿海地区 TC 路径、强度、风力的气候特征, 发现进入警戒区后台风和强热带风暴占 59.5%, 超强台风、强台风占总频数的 21.5%; TC 造成的 10 分钟平均最大风速  $40\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  以上的区域集中在珠江口以东的广东沿海和海南东部沿海和浙闽交界处; 登陆福建及以北沿海强度达台风以上的常造成  $\geq 25\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  的强风, 而在福建以南登陆并造成强风的为强热带风暴以上; 福建中南部沿海 TC 大风的可利用率达 80% 以上; TC 威胁风电机组安全的区域主要在浙江的中部沿海、浙闽交界处沿海和珠江口以东的广东沿海。

**关键词:** 热带气旋 最大风速 WTGS 安全参数

## The Impact of Tropical Cyclones on Coastal Wind Farm Development in China

Zhang Rongyan<sup>1</sup> Zhang Xiuzhi<sup>2</sup> Cai Lianwa<sup>3</sup> Li Bai liang<sup>4</sup>

(1. Fujian Climate Center, Fuzhou 350001; 2. National Climate Center;  
3. Dongshan Meteorological Station of Fujian Province; 4. Fujian Meteorological Observatory)

**Abstract:** According to the security class of wind turbine generator systems (WTGS), the characters of tracks, intensity and wind of tropical cyclones (TC), which impacted China coast areas, were analyzed in detail by using the TC data from 1961 to 2006 and selecting TC which entered the warning region about 3 degrees in latitude from the coastline and impacted China coast. The analysis showed that typhoon and severe tropical storm (STS) accounted for 59.5% of the total frequency, super typhoon and severe typhoon accounted for 21.5% of the total frequency. In Zhejiang and its southern coast the 10-min average maximum wind speed of TC was over  $25\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,

资助项目: 福建省自然科学基金项目 2007J0122, 福建省青年人才项目 2007F3019

收稿日期: 2008 年 6 月 25 日; 修定稿日期: 2009 年 5 月 8 日

and it is less than  $25\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  in its northern coast. The region, where the 10-min average maximum wind speed was over  $40\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , is mainly at the Guangdong coast east of the Zhujiang Estuary and southeastern coast of Hainan. The high wind of TC, which landed at Fujian and its northern coast and whose intensity was over typhoon, was usually over  $25\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , and the intensity of TC, which landed at the south of Fujian and caused high wind, was over severe tropical storm. The availability of TC high wind is over 80% at the middle-southern coast of Fujian and Jiangsu coast, and the areas are mainly at the middle coast of Zhejiang, the coast at the borderline of Zhejiang and Fujian Provinces and Guangdong coast east of Zhujiang Estuary, where the TC threatens the safety of wind turbines.

**Key Words:** tropical cyclone maximum wind speed WTGS security parameter

## 引 言

随着人们对可再生能源利用价值认识的提高, 风力发电以其无污染和可再生性日益受到广泛的重视。近年来, 风电机组制造、控制和其他相关技术发展非常迅速, 风电场的规模、风电机组的单机容量也不断增长, 因此风电场的安全运行问题已成为人们关注的焦点。

资料显示, 我国风力资源主要集中在两个带状地区, 分别是三北(东北、华北、西北)地区丰富带和沿海及其岛屿丰富带。沿海地区经济发达, 是我国的电力负荷中心, 电网好, 电价高, 风电发展潜力很大。但由于这一地区极易受热带气旋(以下简称 TC)影响<sup>[1-2]</sup>, 风电场的安全运行问题更为突出。如 2006 年第 1 号强台风珍珠 5 月 18 日凌晨穿过南澳岛, 在澄海登陆, 登陆时风速达到  $35\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 受其影响, 南澳某风电场最大风速(10 分钟平均)超过  $40\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 极大风速(3 秒钟瞬时风速)达到  $56.5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 是南澳 57 年不遇的强台风, 多台风机受损。2006 年第 8 号超强台风桑美 8 月 10 日在闽浙交界处登陆, 登陆时中心附近最大风速达  $60\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 中心气压为 920hPa, 浙江苍南霞关观测到的极大风速  $68.0\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 福建福鼎合掌岩(海拔高

度 700m 左右)观测到的极大风速为  $75.8\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 受其影响, 温州某风电场 28 台发电机组全部受损, 损失惨重。

关于 TC 活动对沿海地区的影响, 有关学者开展了许多研究工作。宋丽莉等<sup>[3]</sup>研究了 TC 大风对风电开发的利弊影响, 将 TC 分效益型、防御型和破坏型三种, 指出登陆 TC 威胁较大的地区主要在浙江、福建、广东、海南, 同时还指出 TC 经过的区域风速和湍流强度均发生突变现象。杨玉华等<sup>[4]</sup>研究了登陆我国 TC 大风的空分布, 分析 6~8 级以上大风的时空分布以及引起大风的 TC 强度和登陆地点的特征。田辉等<sup>[5]</sup>分析了华南、华东沿海登陆台风暴雨和大风, 指出无论是华南沿海还是华东沿海登陆台风其平均最大风速都超过  $27\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。李英等<sup>[6]</sup>对登陆我国 TC 作了统计特征分析, 指出在我国沿海不同地区(不包括岛屿)登陆的 TC 在登陆后的明显衰减时段主要发生在登陆后 12 小时内, 登陆时越强的 TC, 衰减得越厉害。王秀萍等<sup>[7]</sup>的研究表明 7—9 月是北上 TC 发生的关键月份, 尤其 7、8 月是高峰期, 1—4 月和 12 月没有北上热带气旋。王东生等<sup>[8]</sup>对 1949—2005 年西北太平洋上和南海中心风速  $\geq 17.2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  的 TC 活动的若干特征进行了统计学分析, 表明 7—9 月是发生和登陆我国 TC 最多的月份, 华南沿海是登陆最频

繁的区域。Clausen 等<sup>[9-10]</sup> 研究指出, 国际电工委员会 (IEC) 制定的主要参数<sup>[11]</sup> 不能应用于遭受 TC 影响频繁的地区, 特别是西北太平洋地区, 他们利用 TC 中心气压和风速计算了 50 年一遇的海上最大风速, 有针对性地探讨了菲律宾地区风机涡轮参数设计, 其负载的安全系数比欧洲或美国要大 0.35, 意味着在西北太平洋沿岸国家发展风电投资将比国际标准增加 20%~30%。

还有许多关于热带气旋的研究多是以台风预报和台风气候变化为目的, 以省或区域热带气旋的登陆频数、暴雨、路径特征等的分析较多<sup>[12-14]</sup>。但针对 TC 影响沿海风电工程安全的研究仍欠深入, 缺乏基于 WTGS 安全参数的大风统计分析。本文根据风电工程 WTGS 安全参数, 探讨 TC 对沿海风电场安全的影响, 以期为受 TC 影响地区的风机设计、风机选型和风电场安全运营管理提供科学的依据。

## 1 资料来源和处理

### 1.1 资料来源

采用 1961—2006 年上海台风研究所编制的《台风年鉴》、《热带气旋年鉴》和 TC 影响期间各台站 10 分钟平均最大风速资料。

### 1.2 资料处理

由于 TC 6 级风圈半径大约为 2.7~4.3 个纬距<sup>[15]</sup>, 也就是说当 TC 在距海岸线大约 3 个纬距时, 沿海区域就有可能出现大风, 故取距海岸 3 个纬距左右的距离为警戒线 (图 1), 进入警戒区的 TC 定义为影响中国沿海的 TC, 按照 WMO 关于 TC 等级划分规定, TC 强度用进入警戒线后 TC 中心 2 分钟最大风速的最大值表示, 各等级频数列于表 1。1961—2006 年间, 进入警戒区 TC 共有 428 个, 其中有 372 个登陆中国大陆, 其中台

风和强热带风暴最多, 频率分别占 33.6% 和 25.7%, 超强台风和强台风频率分别占 7.9% 和 13.6%, 此强度的 TC 会给风电场造成损失。热带风暴和热带低压频率分别占 10.3% 和 8.9%, 此强度的 TC 一般可为沿海风电场带来很高的发电量。

表 1 进入警戒区的 TC 强度等级标准及发生频数

风速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	风力/级	名称	频数
$\geq 51$	$\geq 16$	超强台风	34
41.5~50.9	14~15	强台风	58
32.7~41.4	12~13	台风	144
24.5~32.6	10~11	强热带风暴	110
17.2~24.4	8~9	热带风暴	44
10.8~17.1	6~7	热带低压	38

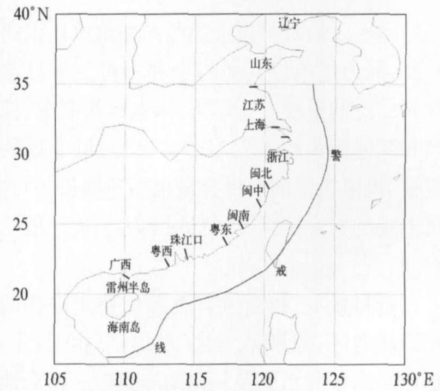


图 1 热带气旋警戒区和登陆 TC 统计区域划分

## 2 影响沿海热带气旋基本特征

对沿海风电场来说, 防御强 TC 具有很大的挑战性, 因此深入分析强热带风暴以上的 TC 移动规律和登陆强度对风电场安全运营具有重要的意义。

### 2.1 不同强度热带气旋的移动路径

图 2 为进入警戒区不同强度的 TC 优势路径, 可以看到超强台风以西北太平洋生成并登陆广东中东部、福建南部和浙闽交界处为主 (图 2a); 强台风也以西北太平洋生成

主(图 2b), 常见路径有 3 条: 由西北太平洋直接进入浙江沿海, 或经台湾进入福建中部沿海, 或生成于南海登陆海南后再次登陆雷州半岛; 台风常见的移动路径也有 3 条: 生成于西北太平洋并登陆粤西, 或生成于南海并

登陆海南, 或从西北太平洋北上穿过台湾岛进入福建沿海(图 2c); 强热带风暴多由西北太平洋生成, 穿过菲律宾进入南海(图 2d), 以登陆粤西和海南为多。

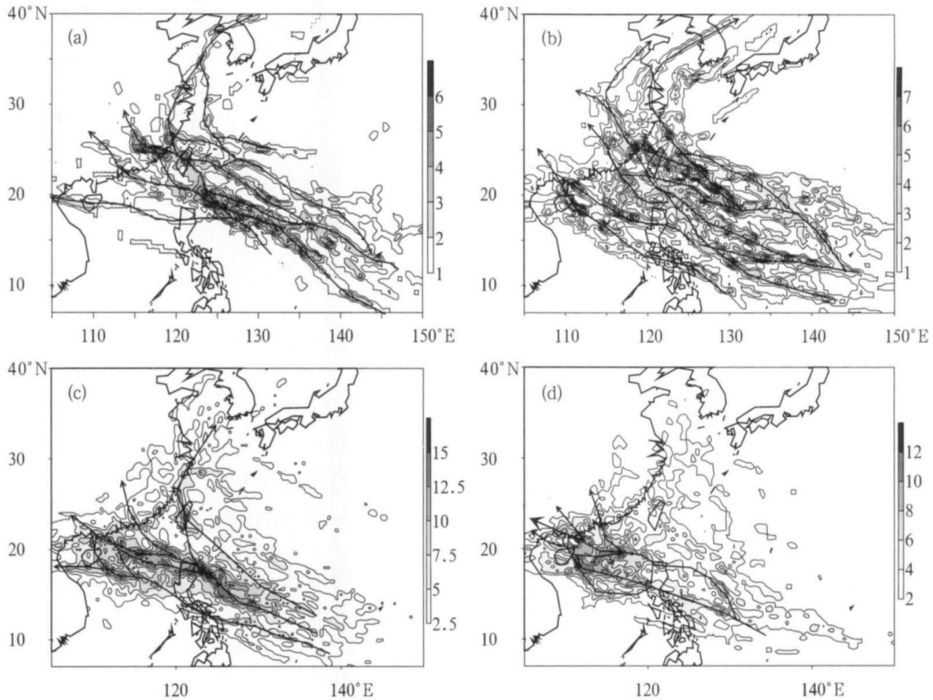


图 2 各种强度 TC 优势路径

(a) 超强台风; (b) 强台风; (c) 台风; (d) 强热带风暴

## 2.2 各登陆区域的 TC 强度

以登陆前 6 小时内的最大风速表示登陆 TC 的强度, 按地段分为 14 个区域(见图 1), 分别统计各种强度 TC 出现的频率, 结果列于表 2。由表可见, 有 70.43% 的登陆 TC 强度在强热带风暴以上; 登陆 TC 最多的区域是海南, 占全国登陆总数的 25.81%, 其次是粤西(包括雷州半岛), 占登陆总数的 21.51%, 再次是粤东(包括登陆珠江口), 占登陆总数的 20.43%。

登陆 TC 中台风和强热带风暴居多, 强台风和超强台风仅占登陆总数的 12%, 以福

建中南部、浙南、粤东和海南东部沿海的出现频率较大, 这些区域的风电场规划和建设投产较集中, 应引起足够的重视。

## 3 影响沿海风电场的热带气旋大风分布特征

### 3.1 热带气旋最大风速极值风速的空间分布

为了保证风力发电机组(WTGS)的运行安全, 文献[11, 16]将参考风速划分为 4 个级别: 30、37.5、42.5、50  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。考虑到规范划分的级别中风速级差较大, 将两级参考风速求平均再分一级, 即增加 34、40、46  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  三

表 2 各区域登陆 TC 强度频数(个)

区域	超强台风	强台风	台风	强热带 风暴	合计	合计占总登陆 数的比例/%	热带风暴 以下强度	总计	总计占总登陆 数的比例/%
海南	2	6	27	21	56	15.05	40	96	25.81
雷州半岛	0	3	6	10	19	5.11	8	27	21.51
粤西	0	2	14	21	37	9.95	16	53	
珠江口	0	2	8	5	15	4.03	9	24	20.43
粤东	1	3	17	21	42	11.29	10	52	
闽南	0	2	3	1	6	1.61	4	10	2.69
闽中	1	1	19	10	31	8.33	12	43	11.56
闽北	0	2	4	11	17	4.57	3	20	5.38
浙江	1	6	11	10	28	7.53	4	32	8.60
上海	0	0	1	1	2	0.54	0	2	0.54
江苏	0	0	1	1	2	0.54	1	3	0.81
山东	0	0	0	5	5	1.34	1	6	1.61
辽宁	0	0	0	1	1	0.27	2	3	0.81
广西	0	0	0	1	1	0.27	0	1	0.27
合计	5	27	111	119	262	70.43	110	372	100

个级别风速,同时根据目前主流风机运行风速特点,将  $30\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  以下的风速按 10、15、 $25\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  分成三级。利用上海台风研究所提供的热带气旋影响期间台站 10 分钟最大风速,挑取每个台站 1961—2006 年受 TC 影响的最大风速绘成极值风速分布图(图 3),图中色斑是基于上述风速级别划分的。可以看到,浙江及其以南沿海风速基本上都在  $25\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  以上,而其以北沿海地区都在  $25\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  以

下。在  $25\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  以上的区域内,福建中部沿海(除岛屿)风速明显小于其它地区。 $40\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  以上的区域集中在珠江口以东的广东沿海、海南东部和浙闽交界处。

### 3.2 不同强度的热带气旋最大风速极值分布差异

针对风电场管理人员和工程设计人员所关心的不同强度 TC 对各地的可能影响问题,对 47 年来不同强度 TC 影响下各台站出现的最大风速极值做了进一步分析,图中色斑级别划分同图 3。

超强台风类中,  $30\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  以上大风区分布于浙江、福建、粤东、海南沿海(见图 4a),其中  $42.5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  以上大风区集中在福建南部到珠江口以东沿海和海南的东部沿海,以广东遮浪的  $61\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  为最大;强台风类中,  $30\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  以上大风区分布于浙江、福建的局部,广东沿海和海南(见图 4b),最大的风速是浙江北几的  $46\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;台风类中,  $30\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  以上大风区主要分布于广东、海南、广西(图略),最大的风速是浙江嵊泗的  $45\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;强热带风暴类中(图略),  $30\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  以上大风区主要分

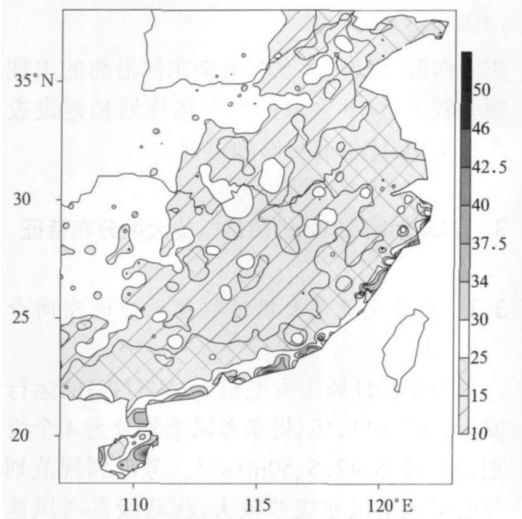


图 3 影响中国沿海的 TC 最大风速极值分布

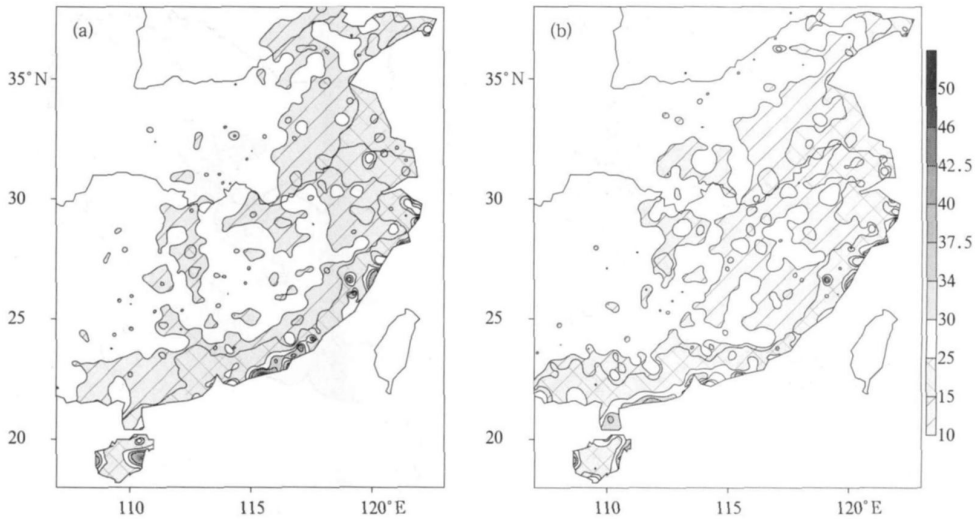


图 4 中国沿海超强台风(a)和强台风(b)影响下最大风速极值分布

布于粤西, 最大的风速是浙江石浦的  $37\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

#### 4 风电机组安全风速等级出现频率分析

按照上述 WTGS 运行安全风速等级, 将 10 分钟平均最大风速分成 7 个风速等级进行分析(见图 5)。综观全图, 随着风速的增加, 各等级风速出现的区域向沿海迅速缩减。

##### 4.1 可利用风速分布

由图 5a 可见, TC 影响下大部地区风速小于  $15\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 内陆频数可达 60% 以上, 沿海大部区域可达 40% 以上;  $15\sim 24.9\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  的风速频率介于 16%~20% (图 5b), 表明大部分 TC 影响沿海时其风速是可以利用的, 特别是福建中南部和江苏沿海, 可利用风速比例是沿海地区最高的, 达 80% 以上。

##### 4.2 可防御风速分布

$25\sim 35\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  为风电机组可防御风速,

最显著的特点是该风速段的分布区域仅限于沿海地区。  $25\sim 29.9\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  的频率在 8% 以下(图 5c), 其中较大的频率出现在海南、广东沿海、福建南部和北部沿海、浙江沿海、山东半岛、辽东半岛;  $30\sim 33.9\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  的频率在 2% 以下(图 5d), 范围缩减至浙江及以南沿海, 其中较大的频率出现在海南南部、广东珠江口以西沿海、福建北部沿海和浙江沿海。

##### 4.3 威胁风电机组安全的风速分布

该风速段的空间分布逐渐趋于零散, 风速频率大部分在 2% 以下, 浙江的中部沿海、浙闽交界处沿海和珠江口以东的广东沿海出现频率为 4% 以上, 表明这三个区域的风电机组较易受到强 TC 大风的破坏。值得一提的是  $37.5\sim 39.9\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  出现频数变化突减, 大于  $40\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  的风速只限于广东珠江口以东局部和海南的东部, 其中  $42.5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  以上风速出现的概率仅有 0.1%, 主要出现在广东省的珠江口以东沿海和海南岛南部(图略)。

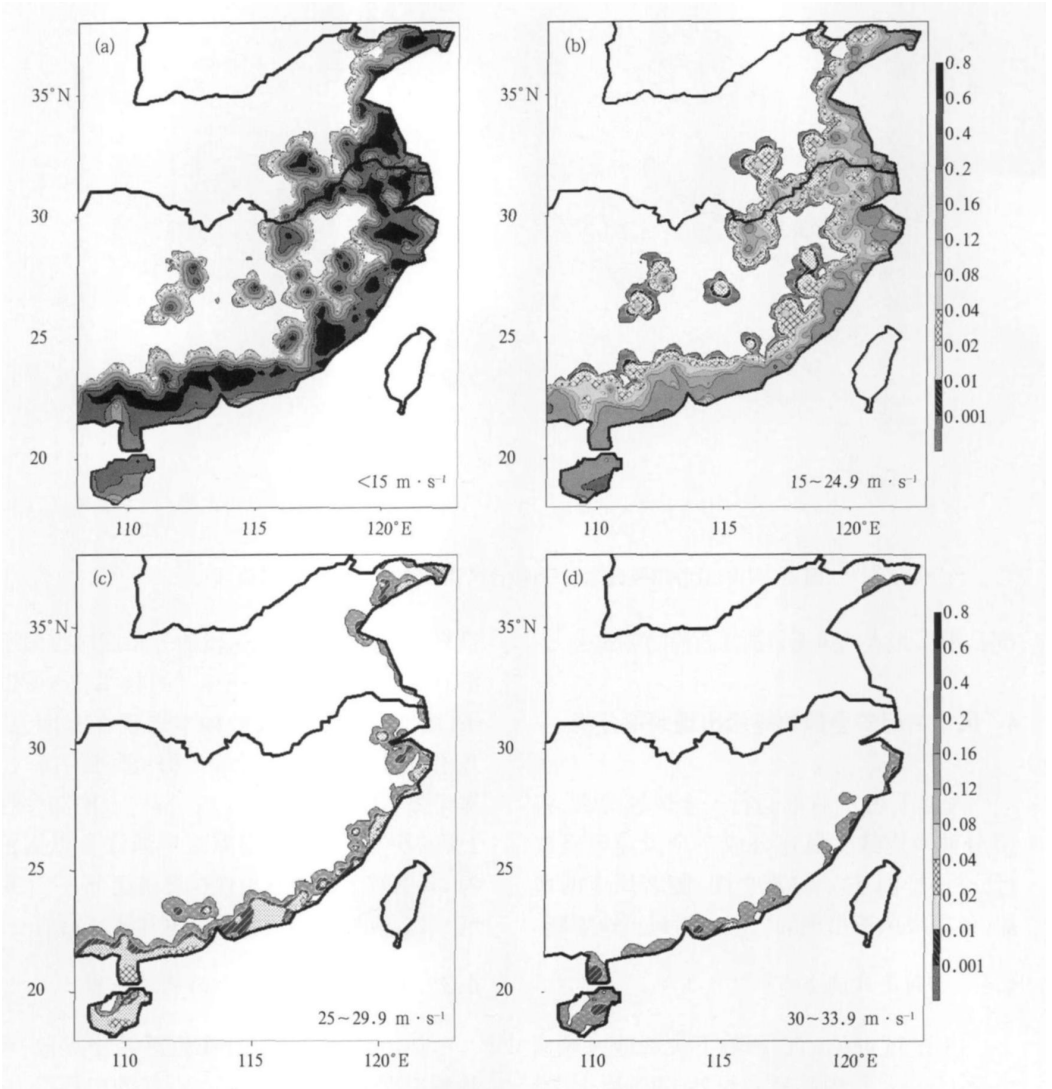


图 5 风电机组安全风速频率图组

(a) 风速小于  $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ; (b)  $15 \sim 24.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ; (c)  $25 \sim 29.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ; (d)  $30 \sim 33.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

## 5 小结

(1) 进入警戒区的台风和强热带风暴最多, 占总频数的 59.5%, 超强台风和强台风频率分别占 7.9% 和 13.6%。

(2) 威胁风电机组安全的 TC 主要在浙江的中部沿海、浙闽交界处和珠江口以东的广东沿海。

(3) 超强台风登陆福建中南部、浙江、粤东和海南沿海的频率较大, 在风电场建设中应引起足够的重视。

## 参考文献

- [1] 赵洪杰, 马春宁. 风力发电的发展状况与发展趋势 [J]. 水利科技与经济, 2006, 12(9): 618-622.
- [2] 顾为东. 我国风能利用潜力及江苏沿海风力发电的前景 [J]. 宏观经济研究, 2006(4): 44-47.
- [3] 宋丽莉, 毛慧琴, 钱光明, 等. 热带气旋对风力发电的

- 影响分析[J]. 太阳能学报, 2006, 27(9): 961-965.
- [4] 杨玉华, 雷小途. 我国登陆台风引起的大风分布特征的初步分析[J]. 热带气象学报, 2004, 20(6): 633-642.
- [5] 田辉, 马开玉, 林振山. 华南、华东沿海登陆台风暴雨和大风的分析[J]. 应用气象学报, 1999, 10(Supplement): 148-152.
- [6] 李英, 陈联寿, 张胜军. 登陆我国热带气旋的统计特征[J]. 热带气象学报, 2004, 20(1): 14-23.
- [7] 王秀萍, 梁军. 近 52 年北上热带气旋的若干气候特征[J]. 气象, 2006, 32(10): 76-80.
- [8] 王东生, 屈雅. 西北太平洋和南海热带气旋的气候特征分析[J]. 气象, 2007, 33(7): 67-74.
- [9] Clausen N E, et al. Design of Wind Turbines in an Area with Tropical Cyclones[G]. Proceedings of the European Wind Energy Conference & Exhibition, Athens, Greece, 27 February-2 March 2006.
- [10] Clausen N E, et al. Wind Farms in Regions Exposed to Tropical Cyclones[G]. Proceedings of the European Wind Energy Conference & Exhibition, Athens, Greece, 7-10 May 2007.
- [11] International Electrotechnical Commission (IEC), IEC 61400-1 Ed. 3 Wind turbines part 1: Design requirements, August 2005.
- [12] 金荣花, 高立柱, 顾华. 近 31 年登陆北上台风特征及其成因分析[J]. 气象, 2006, 32(7): 33-39.
- [13] 刘爱鸣, 林毅, 黄美金, 等. 0713 号台风韦帕路径预报难点分析[J]. 气象, 2008, 34(10): 27-33.
- [14] 刘晓波, 邹兰军, 夏立. 台风罗莎引发上海暴雨大风的特点及成因[J]. 气象, 2008, 34(12): 72-78.
- [15] 陈联寿, 丁一汇. 西北太平洋台风概论[M]. 北京: 科学出版社, 1979.
- [16] 中华人民共和国国家标准 GB18451.1-2001. 风力发电机组安全要求[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.