# 上海近海海域低层风特性分析

# 史军 穆海振 徐家良 马悦

(上海市气候中心,上海 200030)

【摘 要】基于南汇和奉贤两个海上测风塔观测资料,采用数值统计分析方法,研究了上海近海海域低层风特征, 包括风切变指数特征、风的阵性特征和湍流强度特征。结果表明,上海近海10<sup>~70</sup> m高度风切变指数在0.09左右, 阵风系数在1.20左右,均小于《建筑结构荷载规范》的推荐值。随着风速的增大,风切变指数和阵风系数均呈减小 的变化。当风力等级在4级及以上时,切变指数可靠性较好,阵风系数变化较小,湍流强度基本相等。上海近海阵 风系数和湍流强度均随着高度的增加而减小,在40 m以上时都趋于稳定。研究结果可为上海近海风资源评价、重大 工程规划设计和施工建设以及区域防灾减灾实践提供科学依据和参考。

【关键词】低层风特性;风切变指数;阵风系数;湍流强度;上海近海

【中图分类号】P425.2 【文献标识码】A 【文章编号】1004-8227(2016)08-1184-07

DOI: 10.11870/cjlyzyyhj201608004

风能资源的开发利用是我国能源发展战略和调整电力结构的重要措施之一。近年来,中国风电建设迅速发展,但是陆上风 电场受到土地等众多因素制约,目前逐渐饱和,近海风电场则越来越成为风电发展的趋势和方向<sup>[11]</sup>。与陆上风电场相比,近海风 电场具有节约土地资源、风速较高且持续性较长、风能利用率高、风电机组发电量多、没有复杂地形对气流的影响等优点<sup>[1, 2]</sup>, 其能量收益比沿海风资源丰富地区的陆地风机高20%<sup>~</sup>40%<sup>[3]</sup>。因此,近海风电场已成为我国风电技术发展和产业竞争的前沿。

我国海岸线长,海上风能资源丰富<sup>[4]</sup>。据中国国家能源局预计,到2020年我国海上风电将达到3 000万kW<sup>[5]</sup>。然而,长期以 来,我国学者着重于对陆上风能资源的分析研究<sup>[6]</sup>,对近海风能资源由于观测资料的相对缺乏,开展相应的分析研究还较少<sup>[7, 8]</sup>。 徐家良等<sup>[7]</sup>采用上海海岸测风梯度塔及海上测风平台观测数据,结合高分辨率数值模式,对台风影响下上海近海区域最大风速的 分布、不同高度风速变化规律、湍流强度的变化等进行分析。肖仪清等<sup>[9]</sup>根据博贺海洋观测站上测得的0814强台风"黑格比", 研究了其在海面上的风场特性,给出了风场特征参数,并与海岸观测结果进行了对比分析。另一方面,随着我国国民经济的高 速发展,沿海地区重大工程,如跨江(海)大桥、高耸建筑物、港口、码头等日益增多,开展近海海上风环境特征的研究也是这 些风易损结构工程设计和生产建设中抗御大风所必须要考虑的问题<sup>[10, 11]</sup>。

上海地处中亚热带季风气候区,受冬夏季风的影响,沿海滩涂和近海海域风力资源较为丰富,尤其是近海,地域开阔、障

收稿日期: 2015-11-23; 修回日期: 2016-04-23

**基金项目:**中国清洁发展机制基金项目(2012043和1212117)[China Clean Development Mechanism (CDM) Fund Project (2012043 and 1212117)]; 国家自然科学基金项目(41571044)[National Natural Science Foundation of China (41571044)]

作者简介: 史 军(1975<sup>~</sup>), 男, 高级工程师(正研级), 博士, 主要从事气候监测和气候变化研究. E-mail: shij@climate. sh. cn

碍物少,对于陆上土地资源十分稀缺的状况而言,风能资源更具有开发利用价值<sup>[7]</sup>。同时,每年来自西太平洋的台风、冷空气南下引起的寒潮大风、强对流引起的飑线大风以及雷雨大风<sup>[12]</sup>常在沿海地区及近海引发灾害<sup>[11, 13]</sup>,造成人员伤亡和财产损失。鉴于此,本文利用上海近海海上测风塔观测资料,开展了近海海上不同高度风速变化特征、风的阵性特征以及湍流强度分析,以期为上海风资源评估、风环境评价以及区域防灾减灾行动提供科学依据和实施借鉴。

### 1 资料与方法

1.1 观测资料

本文所用的资料为上海近海海上两座测风塔的测风数据。两座测风塔的观测点位置、仪器设置及观测环境情况见表1和图1。 每座测风塔上均设有6层风速仪,每层分别安装有美国生产的NRG#40型和NOMAD2型轴式测风仪各1个,采样时间均为1s,记 录每个10min的平均值、极大值和标准差。两座测风塔中NRG#40型测风仪采集的有效数据率分别达98.3%和96.04%,高于NOMAD2 型,原因主要是NOMAD2型测风仪后期电源故障较多,造成南汇测风塔出现连续近两个月的缺测。

对NRG#40型和NOMAD2型测风仪测得的10 m和70 m各月平均风速比较发现,两者十分接近,误差一般仅有0.1<sup>~0</sup>.2 m/s,故可以相互插补。本文选择NRG#40型测风记录集为基础数据,其中缺测数据由同时段同层的NOMAD2型测风数据插补,最后得到序列 完整的测风数据集,用于上海近海海域的风速、阵性、湍流强度等各项特征统计分析。

1.2 分析方法

1.2.1 近海海上低层风的切变特征分析

风速随高度的变化(风速廓线)一般呈对数律或指数律关系。对于指数律变化,其数学表达式如式1所示[14]:

$$V = V_1 (\frac{Z}{Z_1})^{\alpha} \tag{1}$$

式中,*V为Z*高度上的风速,*Z*为高度,V1为Z1高度上的风速, α为风切变指数,其值大小反映了风速随高度增加的快慢。α 值越大表示风速随高度增加得越快,或者说风速变化梯度大;反之,则表示风速随高度增加得慢,或者风速变化梯度小。

在近海海面、海岛、海岸等A类地区, α的取值为0.12<sup>[14]</sup>,但α是根据大量的实测风速,兼顾大小不同风速情况下拟合推算的,实际上风速较小的样本占了大多数。对上海近海海域而言,当风速增大,特别在强风(6级风)以上时,风速随高度变化是否也遵循指数规律,α如何取值,都是值得分析讨论的。

本文首先基于 6 层风速观测资料,按照 10 m 高度处风速观测值的大小对观测资料分组,具体划分为五个风力等级组,分别 是 1<sup>3</sup> 级风(1.0<sup>5</sup>.4 m/s)、4 级风(5.5<sup>7</sup>.9 m/s)、5 级风(8.0<sup>10</sup>.7 m/s)、6 级风(10.8<sup>13</sup>.8 m/s)和 7 级及以上风( $\geq$ 13.9 m/s),分析在不同高度层次以及不同风力等级下 a 值的差异,同时用 o 去度量 a 值与其平均值的偏离程度。若 o 值小,则表示 a 计算 值较稳定,波动也小。

			Tab.1 Conditions of Two Offs	note Anemometer Towers	
测风塔名称	塔高(m)	测风仪器	观测设置	观测时间	观测环境
奉贤	70	NRG#40型、 NOMAD2型	10、25、40、50、60、70 m风	200/510日 2007511日	杭州湾海上,距奉贤海岸约8 km
南汇	70	NRG#40型、 NOMAD2型	速;10、70 m风问;10 m气温和 气压	2006年10月~2007年11月	东海海上,距南汇海岸约22 km

表1 两座海上测风塔的基本情况 C 70 C 70 L







然后,分析不同风力等级下计算的风廓线对实况的拟合效果,即开展风廓线指数律的检验。具体是利用各组风速和不同高 度层次计算出的 a 值,将10 m高度的实测风速(V1)及相应的各层高度(25、40、50、60和70 m)代入式(1),求得计算值 V,与相 应的各层高度实测值进行比较,并用绝对误差和相对误差两项指标来检验。

1.2.2 近海海上低层风的阵性特征分析

大风的阵性特征是结构工程设计所关注的破坏因子之一,通常以阵风系数来讨论风的阵性。一般情况下,将持续时距小于3 s的风称为阵风,平均风速可按风的持续时间定义为分钟、小时、日、月平均风速等。目前多采用持续时距为10 min的平均风速 <sup>114</sup>,并定义最大阵风风速与相应10 min平均风速之比为阵风系数。

与前面讨论风切变指数相同,文中首先根据10 m高度处风速大小对风速资料进行分组,分为1~3级风、4级风、5级风、6级 风和7级及以上风五组,分析风速与阵风系数的关系;然后分析不同风速情况下的平均阵风系数随高度(10、25、40、50、60和 70 m)的变化。

1.2.3 近海海上低层风的湍流强度分析

风速一般被认为由平均风速和脉动风速两部分组成,平均风速表现为一段时间内观测数据的平均状况,脉动风速则反映了 大气的湍流特性。湍流强度表示瞬时风速偏离平均风速的程度,是评价气流稳定程度的指标,其对桥梁等建筑结构有不利影响。 为了能捕获脉动风速的瞬时变化,目前一般采用超声风速仪,采样时距一般小于 0.1 s。本文根据表 1 中所列的轴式测风仪观测数据,利用脉动风速标准差与平均风速的比值(式 2)来计算湍流强度<sup>[15,16]</sup>:

$$TI = \frac{\sigma}{V} \tag{2}$$

式中: σ表示10 min内瞬时风速相对平均风速的标准差, V为10 min平均风速(m/s), TI为水平方向的湍流强度。

逐时湍流强度的计算有两种方法:一种是以1 h内最大的10 min湍流强度作为该小时的代表值<sup>[15]</sup>;另一种是以1 h内风速最 大对应的10 min湍流强度作为该小时的代表值<sup>[17]</sup>。从观测的数据来看,当出现1<sup>~</sup>2级小风时,用式2计算的湍流强度往往异常偏 大,而小风状况时的湍流强度对建筑结构等影响没有指导意义,故本文采用第二种方法的计算值,反映10 min内风速随机变化 幅度的大小。

## 2 结果与分析

2.1 上海近海海上低层风的切变特征

2.1.1 风速与切变指数的关系

表 2 是不同高度层在不同风力等级情况下 a 值的变化,可以看出,当风力等级在 1~3 级时, a 值为 0.08~0.11;当风力等级 在 4~5 级时, a 值减小到 0.06~0.07;当风力等级达 6 级或以上时,测风塔 a 值反而有所增大,多数为 0.07~0.09,但由于观测 样本数不够多,结果在一定程度上还缺乏说服力。国家标准《建筑结构荷载规范》<sup>[14]</sup>将地面粗糙度类别规定为海上、乡村、城 市和大城市中心 4 类, a 值分别取 0.12、0.15、0.22 和 0.30,梯度高度分别取 300、350、450 和 550 m。海面上风速随高度变 化小于《建筑结构荷载规范》的推荐值,这与肖仪清等<sup>[9]</sup>研究结果一致。各高度层风速如用指数律公式计算, a 值可取 0.09 左 右。本文关于 a 值随风速增大而减小的结果也被其他对陆上的研究证实,如王志春等<sup>[18]</sup>根据琼州海峡两岸 2 个梯度塔和 1 部车 载风廓线雷达共同获取的强台风"纳沙"实测风速资料,分析强台风"纳沙"影响期间大风特性,结果表明 a 随风速增大有减 少的趋势,在风速达到 6 级后, a 随风速变化不明显,且出现 a 收敛的大风阈值与下垫面粗糙度有关,粗糙度越大,大风阈值 也越大。

			•	÷					
高度(m)	And readily	风力等级							
	测风语 -	1~3级	4级	5级	6级	7级及以上			
10.70	南汇	0.109 0(27 072)	0.071 7(19 095)	0.058 8(11 325)	0.057 7(3 550)	0.064 3(302)			
10~70	奉贤	0.103 8(30 260)	0.070 1(21 123)	0.065 8(8 360)	0.074 5(1 438)	0.084 9(162)			
10 (0	南汇	0.090 7(27 072)	0.066 1(19 095)	0.062 0(11 325)	0.060 2(3 550)	0.073 9(302)			
10~60	奉贤	0.098 3(30 260)	0.068 8(21 123)	0.064 8(8 360)	0.072 9(1 438)	0.084 2(162)			
10 50	南汇	0.105 5(27 072)	0.070 2(19 095)	0.057 7(11 325)	0.054 4(3 550)	0.068 9(302)			
10~50	奉贤	0.107 7(30 260)	0.071 7(21 123)	0.065 8(8 360)	0.072 7(1 438)	0.087 1(162)			
10 10	南汇	0.081 6(27 072)	0.076 6(19 095)	0.064 0(11 325)	0.064 2(3 550)	0.079 0(302)			
10~40	奉贤	0.073 3(30 260)	0.066 8(21 123)	0.067 2(8 360)	0.075 2(1 438)	0.093 0(162)			
10~25	南汇	0.085 1(27 072)	0.069 2(19 095)	0.061 2(11 325)	0.067 3(3 550)	0.082 7(302)			
	奉贤	0.085 1(30 260)	0.064 1(21 123)	0.064 4(8 360)	0.076 0(1 438)	0.089 6(162)			

表 2	不同	司高度层次和不同风力等级下风切变指数(a)值(括号内数字为样本数)
Tab	.2	Wind Shear Exponent in Different Heights and Different Wind Scales

表 3 是各组风速下不同高度层次 a值的标准差( $\sigma$ )的平均值,可见看出,风速越大, $\sigma$ 越小,7 级及以上大风的 $\sigma$ 值仅是 1~3级小风时的1/6。与前面表2对应来看,当风力等级为1~3级小风时, σ值已大于α值,表明计算的α值波动很大,可靠性 较差。随着风力等级的增加,相应的计算 α 值波动明显减小,稳定性和可靠性都增强。

### 表 3 不同风力等级下风切变指数的标准差(σ)值

#### Standard Deviation of Wind Shear Exponent in Different Tab.3

Wind Scales

201 12,144	风力等级						
测风培	1~3级	4级	5级	6级	7级及以上		
南汇	0.138 5	0.074 1	0.045 4	0.029 5	0.026 2		
奉贤	0.133 1	0.073 0	0.049 4	0.031 3	0.020 7		

### 2.1.2 风廓线指数律的检验

奉贤

如不区分风力大小等级,计算所有≥1.0 m/s风速廓线的平均 α值,则南汇海域 α值为0.083 5,奉贤海域 α值为0.084 9, 与所有风速求拟合的平均 a 值(南汇海域和奉贤海域分别为0.086 3和0.092 7)相比都略小,主要是由于剔除了小于1.0 m/s的风 速,所以a值变小了。

Tab.4 Error Test of Wind Speed Profile in Different Wind Scales											
Status 144	1~3级		4	4级		5级		6级		7级及以上	
测风塔	A	В	А	В	А	В	Α	В	A	В	
南汇	0.73	16.18	0.65	8.16	0.50	4.77	0.44	3.36	0.54	3.09	
素層	0.67	14.88	0.60	7.56	0.55	5.26	0.47	3.56	0.44	2.50	

表 4 不同风力等级下风廓线的误差检验(A:绝对误差,m/s;B:相对误差,%)

从表 4 可见,用指数律风廓线来推算 10 m以上近地层各个高度上的风速,6 级及以上风的效果最好,绝对误差在 0.4 ~ 0.5 m / s , 相对误差为 3%~4%; 风力在 7 级及以上时,相对误差仅 3%。风速越小,推算结果误差越大,1~3 级小风时,相 对误差达 15%<sup>~</sup>16%。从各组风速的检验结果来看,当风力达到 4 级及以上(≥5.5 m/s)时,用指数律风廓线来推算近地层各个高 度的风速,是可以得到较好的结果。从图2也可以看出,计算的廓线与实测的廓线均较一致。另一方面,表4的检验结果与表3 也是相对应的,标准差越大, a 值的计算值稳定性越差,风速随高度变化的推算效果必然较差。海上风廓线指数律的计算和检 验结果,在工程项目的设计基准风速计算应用中具有重要意义,因为设计风速都关注的是大风,一般都是7级以上的风速。



图 2 指数律公式计算的不同高度平均风速廓线与实测结果的比较 (点为计算值,线为实测值)

Fig.2 Comparison Between Calculated and Measured Wind Speed Profile in Different Heights

2.2 上海近海海上低层风的阵性特征

2.2.1 风速与阵风系数的关系

表5是不同风力等级情况下,阵风系数大小的变化。可见,随着风速的增大,阵风系数的变化与风切变指数 a 变化十分相似。 当风力等级在3级及以下时,阵风系数为1.23<sup>~</sup>1.24;风力等级在4<sup>~</sup>5级时,减小到1.16<sup>~</sup>1.17。当风力等级达到6级或以上时,阵 风系数略增至1.17<sup>~</sup>1.21,但同样也存在着观测样本数较少的问题。国家标准《建筑结构荷载规范》<sup>[14]</sup>中对近海海面、海岸、乡 镇、城市郊区以及城市市区的离地10m高度阵风系数推荐值为1.60<sup>~</sup>2.40,可见推荐的陆上阵风系数也远较海面上的阵风系数大。

王志春等<sup>[18]</sup>对琼州海峡研究也表明,阵风系数随风速增大而减小,但风速达到 6 级以后,阵风系数不随风速大小产生趋势 变化,阵风系数与下垫面粗糙度有关,在粗糙下垫面上阵风系数会偏大。夏波文[19]基于 2014 年台风"娜基莉"影响下的 10 m 高度风数据,研究浦东地区近地风特性,结果也表明,纵向、横向和竖向阵风因子随 10 min 平均风速的增大呈减小的趋势。但 肖仪清等[9]根据博贺海洋观测站测得的 0814 台风"黑格比"三维风速时程,发现在海面观测的阵风因子随着平均风速的增大 而增大,当平均风速大于 30 m/s 时,基本上不再变化,而在沙角旋海岸观测塔 11 m 高度超声风速仪的结果表明,当平均风速 较大(>17.2 m/s)时,阵风因子基本上不发生变化。

要素	30d E3 13*			风力等级		
	视风培	1~3级	4级	5级	6级	7级及以上
防闭系数	南汇	1.24(27 072)	1.17(19 095)	1.16(11 325)	1.17(3 550)	1.18(302)
阵风杀数	奉贤	1.23(30 260)	1.17(21 123)	1.17(8 360)	1.18(1 438)	1.21(163)
いたまでは	南汇	0.10(27 072)	0.07(19 095)	0.07(11 325)	0.07(3 550)	0.08(302)
而沉弛反	奉贤	0.09(30 260)	0.07(21 123)	0.07(8 360)	0.07(1 438)	0.08(163)

表 5 不同风力等级下南汇和奉贤阵风系数和湍流强度的变化(括号内数字为样本数) Tab.5 Variation of Gustiness Factor and Turbulence Intensity under Different Wind Scales in the Coastal Waters of Nanhui and Fengxian

2.2.2 阵风系数的垂直变化

图3是在不同风速情况下,平均阵风系数随高度的变化。可以看出,近海面风的阵性均随着高度的增加而稳定减小,并且在 10<sup>~</sup>25 m高度间减小比较明显。10 m高度平均阵风系数为1.23,25 m高度已降至1.20,40 m以上时平均阵风系数趋于稳定,维持 在1.18<sup>~</sup>1.19。







2.3 上海近海海上低层风的湍流强度

### 2.3.1 风速与湍流强度的关系

下垫面的粗糙度不同,湍流强度相差较大。在各类下垫面中,海面粗糙度最小,相应的湍流强度也很小。从表5可以看出,海面上1<sup>~</sup>3级小风时的湍流强度与4级风以上时的差异最大,4级以上各级风力的湍流强度基本相等。与陆上各级风速下湍流强度

变化不同的是,当出现7级以上风力时,海上湍流强度略有增加,当然也存在着观测样本数较少的问题。王旭等<sup>[20]</sup>基于10、20、 30和40 m高度处台风"米雷"影响下的上海浦东地区近地风实测数据,对台风过程中湍流强度分析表明,各高度处各向湍流强 度均随平均风速的增大而减小,并且呈现出明显的线性关系。夏波文<sup>[19]</sup>研究也表明,纵向、横向和竖向的湍流度随平均风速的 增大呈减小的趋势。

2.3.2 湍流强度的垂直变化

图 4 是在不同风速情况下,平均湍流强度随高度的变化。可以看出,海上 10 m 高度湍流强度约在 0.09,随着高度的增加, 湍流强度呈下降趋势,并且在 10<sup>~</sup>40 m 高度之间变化明显,高度 40 m 以上时湍流强度趋于稳定,至 70 m 时湍流强度有进一步 减小趋势。这种特征与湍流强度变化是由下向上传播是一致的。





## 3 结 论

根据南汇和奉贤两个海上测风塔观测资料,采用数值统计分析方法,研究了上海近海海上不同高度、不同风力等级时风切 变指数的变化特征、风的阵性特征和湍流强度特征,得出如下主要结论:

(1)上海近海10<sup>~</sup>70 m高度风切变指数在0.09左右,海面上风速随高度变化小于《建筑结构荷载规范》的推荐值。随着风速的增大,切变指数呈减小趋势。4级以上风力时,计算的切变指数可靠性较好,可以用风廓线来推算近地层各高度的风速。

(2)海面上阵风系数在1.20左右,也远小于《建筑结构荷载规范》的推荐值。随着风速的增大,上海近海阵风系数的变化与风切变指数相似,也是呈减小趋势。近海阵风系数随着高度的增加而减小,在10<sup>~</sup>25 m高度间减小明显,40 m以上时趋于稳定。

(3)1<sup>~</sup>3 级小风时近海低层风湍流强度与 4 级风差异最大,4 级以上各级风的湍流强度基本相等。海上湍流强度的垂直变化与陆上相近,随着高度的增加,湍流强度呈下降趋势,并且在 10<sup>~</sup>40 m 高度之间变化明显,高度 40 m 以上时湍流强度趋于稳定。

### 参考文献:

[1] 陈冬晓, 顾平, 石昌雪. 中国近海风电场浅谈[J]. 科技资讯, 2014(23): 114.

[2] 彭秀芳, 王秀杰, 辜晋德. 海上风电场风能计算中关于海面粗糙度问题的探讨[J]. 太阳能学报, 2012, 33(2): 226-229.

[3] 王志新, 王承民, 艾芊, 等. 近海风电场关键技术[J]. 华东电力, 2007, 35(2): 37-41

[4] 郑崇伟,潘静.全球海域风能资源评估及等级区划[J].自然资源学报,2012,27(3):364-371.

[5] 黄孝彬, 王晓称, 郭 鹏. 考虑气象因子的海上短期风速预测[J]. 太阳能学报, 2014, 35(3): 475-480.

[6]许杨,杨宏青,陈正洪,等.湖北省丘陵山区风能资源特征分析.长江流域资源与环境,2014,23(7):937-943.

[7]徐家良,穆海振. 台风影响下上海近海风场特性的数值模拟分析[J]. 热带气象学报, 2009, 25(3): 281-286.

[8] 周荣卫,何晓凤.海面动力学粗糙度参数化方案对近海风资源评估结果的影响[J].自然资源学报,2015,30(3):513-522.

[9] 肖仪清, 李利孝, 宋丽莉, 等. 基于近海海面观测的台风黑格比风特性研究[J]. 空气动力学学报, 2012, 30(3): 380 - 387.

[10] 王静静,刘敏,权瑞松,等.沿海港口自然灾害风险评价[J]. 地理科学, 2012, 32(4): 516-520.

[11] 史 军, 徐家良, 谈建国, 等. 上海地区不同重现期的风速估算研究[J]. 地理科学, 2015, 35(9): 1191-1197.

[12]谢萍,谢忠,周金莲,等.湖北省近50年风灾灾情分布特征分析[J].长江流域资源与环境,2013,22(S1):122-126.

[13] 《中国气象灾害大典》编委会. 中国气象灾害大典: 上海卷[M]. 北京:气象出版社, 2006: 1-222.

[14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50009-2012建筑结构荷载规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2012:1 - 246.

[15]中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 18710-2002风电场风能资源评估方法[S]. 北京:中国标准出版 社, 2004:1-19.

9

[16] 吴 琼, 聂秋生, 周荣卫, 等. 江西省山地风场风能资源储量及特征分析[J]. 自然资源学报, 2013, 28(9): 1605-1614.

[ 17 ] International Electrotechnical Commission (IEC). International standard IEC 61400-1, wind turbines-part1: design requirements[S]. 3rd ed. Geneva, Switzerland: IEC Central Office, 2005: 1-85.

[18] 王志春, 植石群, 丁凌云. 强台风纳沙(1117)近地层风特性观测分析[J]. 应用气象学报, 2013, 24(5): 595-605.

[19] 夏波文. 台风"娜基莉"影响下浦东地区近地风特性[J]. 科技视界, 2014(35): 8-9.

[20] 王 旭, 黄 鹏, 顾 明, 等. 台风"米雷"近地层脉动风特性实测研究[J]. 土木工程学报, 2013, 46(7): 28-36.