

热带气旋影响下的深圳港湾码头最大阵风预报方法研究

王延青¹ 李晴岚² 兰红平¹ 孙立群² 曹宇麟^{2, 3} 李广鑫²

(1 深圳南方强天气研究重点实验室/深圳市气象局(台), 深圳 518040;

2 中国科学院深圳先进技术研究院, 深圳 518055; 3 东北大学, 沈阳 110819)

摘要: 通过分析深圳三个沿海港口码头自动气象站(盐田港、妈湾港、蛇口码头)的瞬时极大风资料与热带气旋的主要特性(即热带气旋强度、热带气旋离气象站的距离、热带气旋相对于气象站的方位角的关系), 提供了一个气象站在热带气旋影响下的最大阵风定量预报方法。同时分析了2004—2014年6月的所有距离气象站700km范围内的热带气旋以及3个气象站的同期小时极大风观测。研究表明, 瞬时极大风具有间歇性, 热带气旋对观测站的风力影响受周边环境影响大, 越开阔的地域, 热带气旋风力影响越大。一般情况下, 深圳的3个沿海自动站中盐田港受热带气旋风力影响的程度远大于妈湾港和蛇口码头。当热带气旋靠近华南沿海, 热带气旋对东北象限的风影响最大。在此象限中, 强热带风暴级别以上的热带气旋引发盐田港瞬时大风的距离可以达到400km以上。热带气旋引发的深圳沿海自动站瞬时极大风(阵风 $>17.2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)统计模型在2014年7月至2016年9月得到了很好的验证。本研究对深圳市气象局针对港口码头抗台防风的精细化预报服务以及全市的台风预警发布提供了有价值的参考。

关键词: 热带气旋, 阵风, 精细化预报, 港口码头

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2017.01.017

Forecast of Maximum Wind Gust in Tropical Cyclones for Port Terminals in Shenzhen

Wang Yanqing¹, Li Qinglan², Lan Hongping¹, Sun Liqun², Cao Yulin^{1,3}, Li Guangxin²

(1 Shenzhen Key Laboratory of Severe Weather in South China, Shenzhen Meteorological Bureau, Shenzhen 518040

2 Shenzhen Institute of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055

3 Northeast University, Shenyang 110819)

Abstract: This study provides a quantitative forecast method to predict the potential maximum wind gust at three coastal automatic weather stations (Yantian International Container Terminal, Mawan Port and Shekou Ferry Terminal) in Shenzhen based on the investigation of the relationship between the wind gusts observed at the stations and tropical cyclones' (TCs') main characteristics, i.e., TC intensity, TC distance to the station and TC's azimuth relative to the station. The Historical data of TCs within the distance of 700 km to these AWSs, and the hourly maximum wind gusts at these stations at the same time are analyzed for 2004 to June 2014. Results show that the wind induced by TCs is intermittent. The wind induced by offshore TCs is strongly affected by the surrounding terrain condition of the stations. Generally, coastal stations face to the wind direction suffers more from wind influence than those stations back to the wind direction. The wind gust induced by TCs is bigger at Yantian international container terminal station than that at the other two coastal stations. When TCs are approaching to the coast in South China, the most dangers are in the Northeast quadrant of TCs. In this quadrant, TCs with higher intensity in severe tropical storm might incur gust gale (wind gust $>17.2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) at Yantian international container terminal even with a distance more than 400 km to the stations. Finally, the statistical scheme was tested and it works well to forecast wind gusts induced by TCs at those stations for the period from July 2014 to September 2016. It is a valuable tool to forecast the wind gust more precisely for these port terminals, and may serve to the city's typhoon warnings.

Keyword: tropical cyclone, wind gust, precision forecast, port and container terminal

收稿日期: 2016年10月17日; 修回日期: 2016年12月2日

第一作者: 王延青(1962—), Email: 438487808@qq.com

通信作者: 李晴岚, Email: ql.li@siat.ac.cn

资助信息: 国家高技术研究发展计划(2014AA01A302);

广东省科技发展专项资金(2016A050503035);

广东省自然科学基金自由申请项目(2015A030313742)

0 前言

热带气旋(也称台风)是最具破坏力的自然灾害之一^[1-2]。广东省地处亚热带, 濒临南海, 海岸线长达4114km, 为中国海岸线最长省份, 也是热带气旋登陆最频繁的省份。作为广东省沿海最大的城市, 深圳位于珠江口的东侧, 夏秋之际常受热带气旋的肆虐。

深圳不仅有美丽的海岸线，也有着密集的港口群，分别为蛇口、赤湾、妈湾、盐田、东角头、福永、沙鱼涌、下洞及内河九个港区，其中盐田国际集装箱码头是中国集装箱吞吐量最大的单一码头，港区有18个大型集装箱深水泊位，码头面积为417hm²。对于类似盐田港这样的国际集装箱港口码头，其日常运行业务受天气状况影响很大，特别是风力条件，做好港口码头的气象服务，尤其是热带气旋天气影响下的港口码头预警预报服务非常重要。

目前科学家及气象预报者们预报台风和台风引发区域大风的最主要方法是基于动力学的数值模式^[3-5]。在台风的预报研究中，台风路径预报水平比台风强度和台风风雨分布预报水平遥遥领先^[3-6]。过去十几年中数值预报模式和资料同化技术的不断进步，卫星遥感资料在数值预报模式中有效的利用，使得大尺度天气背景的预报有了持续的改进，而台风路径预报多取决于大尺度天气背景，因此台风路径预报的准确率有很大提高，与世界先进水平相当^[4-5]。相比之下，台风引起的风雨预报，以及台风强度预报，是比台风路径预报更难的预报要素。在台风强度预报方面，国家气象中心和上海台风研究所用一些气候持续性方法和统计动力模式进行研究探讨，但其业务预报应用进展非常缓慢^[4]。台风引发的降水和大风不仅与大尺度天气背景有关，还与台风的结构及其内部的动力和物理过程紧密联系^[3-6]。对于登陆台风而言，下垫面特征和地形等因素对台风降水和大风有直接影响。而目前数值预报模式对大气的动力、物理描述还不够精细，中小尺度的观测资料不足，尤其对于从海上来的台风系统，海上的观测资料非常少，没有足够多的资料用来做台风初始结构的数据同化。另外，当前中小尺度的数据同化技术也不够完善，因此动力模式在预报台风强度和台风引发局地暴雨和大风的能力还非常有限^[7-10]，登陆台风引发降水和大风的数值预报准确率偏低，远不能满足实际业务预报的需要^[4-5]。在风雨预报方面，许映龙等^[4]和端义宏等^[5]分别在2010和2012年指出，我国在风雨预报方面，尚无有效的台风大风和暴雨客观预报方法可供业务预报应用，风雨预报的精细化水平远不能满足防台抗台的现实需求。针对这种现状，Li等研究了登陆台风引发深圳地区的降雨，并给出量化的统计结果供当地气象部门预报参考，取得了良好效果^[2]。针对近海及登陆台风引发区域大风的定量预报研究，Li等做了初步的探讨^[10]，并在预报业务推广方面进行了初步尝试。

热带气旋引发的区域大风具有明显的阵性特点，阵风与平均风速差有时可达30m·s⁻¹以上，热带气旋

引发的风灾，往往会以较大的阵风造成建筑物及生命财产的破坏^[11-12]；强风天气严重影响集装箱码头的日常运作^[13]，根据新的《欧洲起重机设计标准》（EN13001）规定，起重机抗风压设计就明确按照阵风条件来执行^[14]。所以本文中有关热带气旋影响下港口码头的风力预报都是按照阵风考虑。

本研究将对深圳地区安装有自动气象站时间较长的蛇口码头站、妈湾港站以及盐田港站的历史数据进行分析，并建立热带气旋影响下的阵风预报模型，再用近2年对深圳有影响的热带气旋个例，来验证阵风预报模型对深圳市重点防护单位阵风预报的应用，从而满足目前从气象要素预报到行业气象风险预报转变的迫切需求。

1 数据和方法

本论文针对深圳的3个重点港湾码头站：盐田港、妈湾港、蛇口码头站，在热带气旋影响下的阵风历史数据进行分析并建模，3个站的地形位置见图1，3个气象站分别于2007，2006和2004年建站。本研究用3个站2014年6月以前的历史记录建立预报模型，用2014年7月以后的台风个例来检验预报模型的应用效果。根据中央气象台定义，阵风，即瞬时风速，为3s的平均风。本研究采用气象站的小时极大风，即每小时内最大瞬时风值，其观测资料来源于深圳市气象台的历史记录，台风的观测资料来源于中央气象台发布的实时台风路径数据。

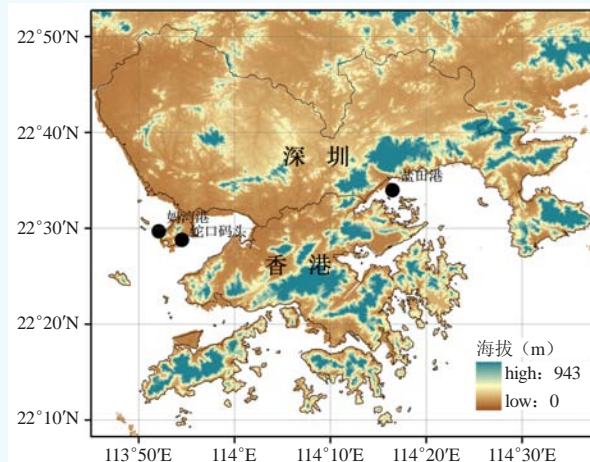


图1 盐田港、妈湾港、蛇口码头的地形位置图
Fig. 1 Topographies and Locations of the Yantian International Container Terminal (YICT), Mawan Port (MWP), Shekou Ferry Terminal (SFT)

本研究使用的建模方法同Li等^[10]的研究。一般来讲，热带气旋的风力影响决定于热带气旋的强度和尺寸大小^[15-18]，热带气旋强度越强，给地方带来的灾害越大；热带气旋的尺寸大小，即7级风圈的大

小范围，往往也决定了热带气旋的潜在破坏范围。根据中央气象台的分类标准，热带气旋分为：超强台风（super typhoon, SuperTY）、强台风（severe typhoon, STY）、台风（typhoon, TY）、强热带风暴（severe tropical storm, STS）、热带风暴（tropical storm, TS）、热带低压（tropical depression, TD）。靠近华南沿海及登陆的超强台风和强台风相对其他强度类别的热带气旋要少一些，所以本研究中将这两者合并为一类，给其命名为SSTY。

所有历史上靠近观测气象站700km范围以内的 N 个热带气旋先按其不同强度发展阶段划分成 $SSTY_i$, TY_i , STS_i , TS_i , TD_i , ($1 \leq i \leq N$)，然后 $SSTY_1$, $SSTY_2$, $SSTY_3$, ..., $SSTY_{N-1}$, $SSTY_N$ ，组合成 $Total_{SSTY}$; TY_1 , TY_2 , TY_3 , ..., TY_{N-1} , TY_N ，组合成 $Total_{TY}$; 等等。另一方面，收集各热带气旋同期气象站的每小时极大风值。

热带气旋对局地的风力影响，一般情况下是距离越近，影响越大，台风眼内除外^[11,19-21]。此外，当台风临近海岸时，其风力影响是不对称的，向岸风比离岸风要大^[22-24]，所以热带气旋相对于气象站的方位角是另一个非常重要的影响因素。如果知道地球上两点（ A 和 B ）的经纬度值，则可以通过以下公式计算两点间的距离和台风相对于气象站的方位角^[25]：

$$S = R \times \frac{\pi}{180} \times \arccos[\sin \varphi_1 \sin \varphi_2 + \cos \varphi_1 \cos \varphi_2 \cos(L_1 - L_2)] \quad (1)$$

其中， S 是地球上两点间距离（km）； R 是地球的半径（km）； L_1 和 φ_1 是 A 点的经度和纬度， L_2 和 φ_2 是 B 点的经度和纬度。

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{\sin(90 - \varphi_2) \sin(L_2 - L_1)}{\sin(\theta)}\right), \quad (2)$$

α 为 A 、 B 两点间的方位角，公式（2）中 θ 满足以下要求：

$$\cos(\theta) = \cos(90 - \varphi_2) \cos(90 - \varphi_1) + \sin(90 - \varphi_2) \sin(90 - \varphi_1) \cos(L_2 - L_1) \quad (3)$$

当 B 点位于相对于 A 点的第一象限时，方位角= α ；当 B 点位于第二象限时，方位角= $360 + \alpha$ ；当 B 点位于第三和第四象限时，方位角= $180 - \alpha$ 。

基于上述公式计算热带气旋路径点相对于气象观测站的距离以及方位角，热带气旋的路径点就可以画在以气象站为圆心的角坐标系上，热带气旋位置点可以用不同深浅颜色表示气旋对气象站小时极大风的影响，700km范围的空间可以通过基于历史路径点的台站观测风力进行插值运算得到。

另外，一个特定强度级别的热带气旋通过距离气

象站700km范围内一个 $1^\circ \times 1^\circ$ 的格点，可能需要几个小时，在这几个小时期间，气象站的极大风不会保持恒定大小。鉴于气象预报关注的是热带气旋对区域可能带来的最大灾害，因此，筛选气象站这几个小时当中的小时极大风观测的最大值留在数据库中，用于预报未来同样强度级别的热带气旋通过邻近位置时可能引发的气象站最大阵风影响。

2 结果与讨论

2.1 热带气旋对港湾自动站最大阵风的影响

按第1节所述的方法，基于3个沿海自动站2014年6月以前的所有历史台风及自动站风力观测数据，计算不同级别热带气旋在700km范围内不同位置对3个港湾码头站最大小时极大风影响，因为热带低压对区域的大风影响相对较小，此处只显示了SSTY、STY、STS与TS对3个港口码头站的最大小时极大风影响，如图2所示。从图2中可以看出，各级别的热带气旋引发各港口码头的最大极大风，随着热带气旋强度级别的增加，引发极大风影响越大；热带气旋引发各站极大风具有间歇性，有时热带气旋位置相差不大，引发极大风大小有差别；此外，热带气旋位于各站的西南方向，对港湾码头的最大小时极大风影响远远大于热带气旋位于其他方位时对港口极大风的影响。比较深圳3个观测站，热带气旋对盐田港的风力影响远远大于其对妈湾港和蛇口码头的的影响。从图1可以看出，3个气象站地形不同，当热带气旋位于3个站的西南象限时，3个台站盛行东南风，区别于妈湾港和蛇口码头，盐田港站的东南方向直接面朝大海，而妈湾港站和蛇口码头站东南方向有香港岛存在，因而减缓了热带气旋对妈湾港与蛇口码头两站的风力影响。另外，从图1中可以看出，盐田港站的西北方向存在有两个山脉之间的峡谷，当盐田港盛行东南风时，其西北方向的峡谷对盐田港的风有加强的效应。基于以上两个原因，盐田港在热带气旋影响下，其风力影响是最大的。

此外，从图2中可以看出，当热带气旋在第三象限时，强台风、台风、强热带风暴在400km以外，都很有可能给盐田港站带来8级以上（ $> 17.2 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ）的大风；相比之下，当热带气旋在第二象限时，一般需要离气象站更近的距离，约200km，才可能给气象站带来8级以上大风的影响。

2.2 预报方法的应用及检验

基于历史热带气旋数据及自动站的阵风观测数据建立的统计关系（图2），可以用于预报未来的近海热带气旋对这3个沿海自动站最大阵风的影响。实际应用时，可以依赖最新的数值模式输出的未来

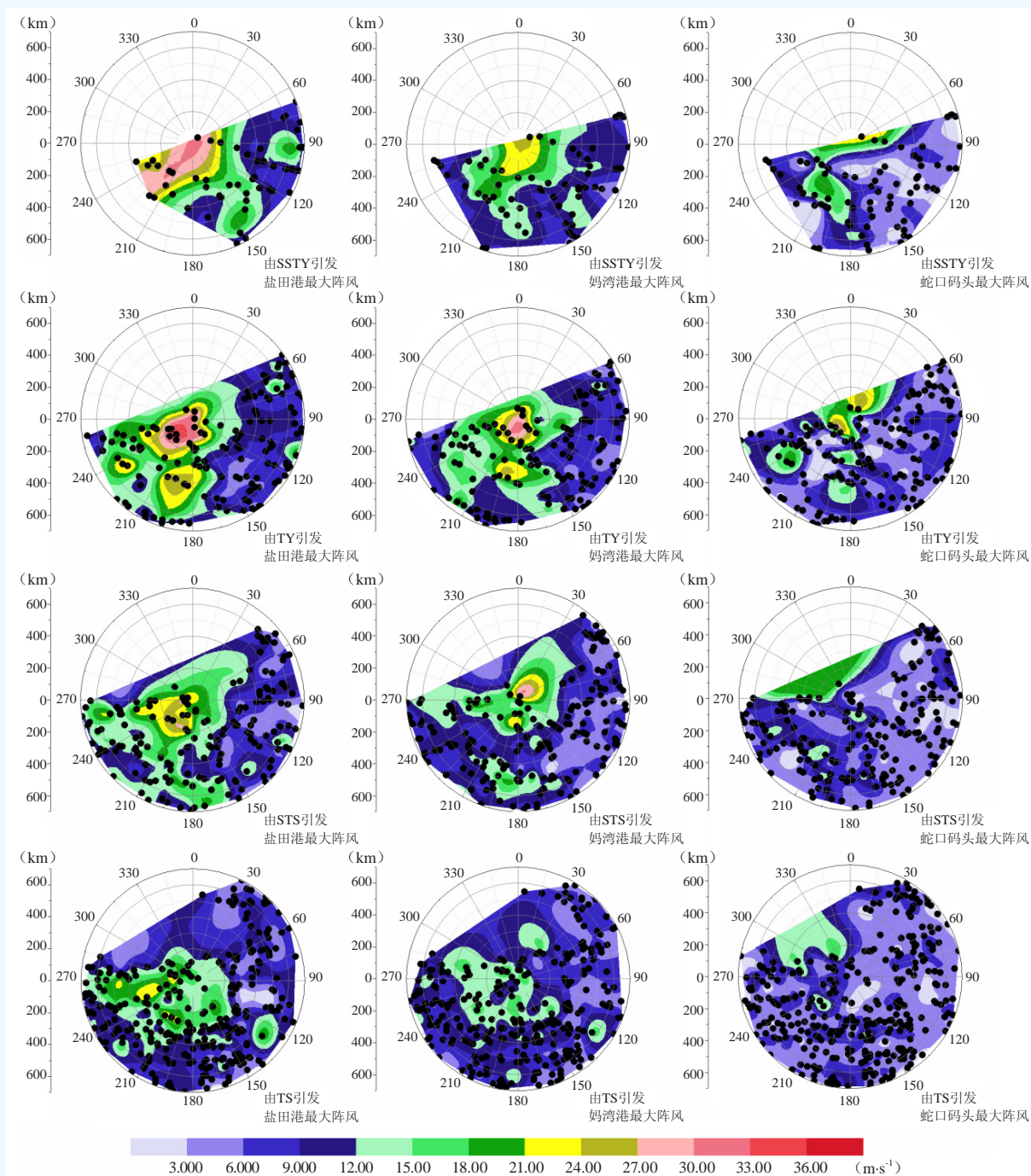


图2 各级别热带气旋（第一行为SSTY，第二行为TY，第三行为STS，第四行为TS）引发盐田港、妈湾港、蛇口码头瞬时极大风的位置空间分布图（第一列为盐田港，第二列为妈湾港，第三列为蛇口码头；图中的黑点表示的是历史上的热带气旋位置）

Figs. 2 Spatial relationships between the positions of historical TCs and the wind gusts at YICT, MWP, SFT. The black dots refer to the positions of the historical TCs with certain intensity categories. The first row is for SSTY category; the second row is for TY category; the third row is for STS category; the fourth row is for TS category. The first column is for YICT; the second column is for MWP; the third column is for SFT

12~24h热带气旋路径预报结果，因为数值模式预报热带气旋未来短期的路径比较可靠^[2,10]；热带气旋的强度可以依赖于预报员的经验判断，以及数值模式的输出结果确定，因为热带气旋的强度一般情况下需要

至少12h的时间才会有显著的改变^[1-2,10]。在已知热带气旋未来12~24h的强度和路径以后，则可以根据历史阵风统计图（图2）进行未来台站阵风影响估测。

2014年下半年“海鸥”台风给深圳带来比较大的

风雨影响。图3a中的圈实线为“海鸥”的实际路径。2014年9月15日11时，“海鸥”位于深圳市东南方向的600km左右，此时台风对深圳地区基本无风雨影响。根据欧洲中心中期天气预报模式（ECMWF，简称EC模式）的预报台风路径（图3a中的蓝色虚线），“海鸥”将以台风强度于海南北部或雷州半岛附近登陆，经过路径距深圳最近距离大约400km。根据此预报路径及预报强度，预报员可以参考图2中台风强度热带气旋对各自动站的阵风影响。以盐田港为例，按统计模型方法预报的盐田港阵风情况见图3b，用红、绿点画线表示。统计方法预报的盐田港最大阵风发生在9月16日00—02时，大小约为 $27\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，而实际发生的最大阵风值为 $29\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，发生时间为01时14分。相比较，最新的EC模式预报的盐田港阵风情况见图3b中的蓝色虚线，按统计方法预报的港湾码头站的阵风情况准确度远高于数值模式的预报结果。

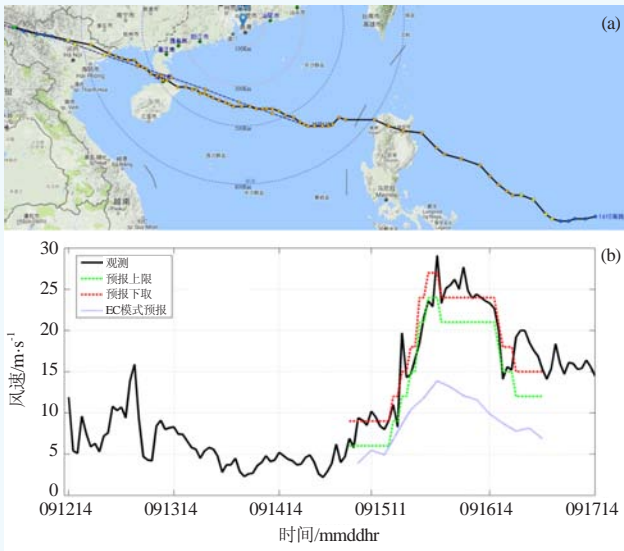


图3 台风“海鸥”的实际路径（圈黑实线）及预报路径（蓝色虚线）（a），以及盐田港在“海鸥”期间的阵风观测时间序列，统计模型预报阵风时间序列及EC模式的阵风预报（b）
Fig. 3 The comparison between the real track (the circles with solid black line) and the predicted track (the blue dash line) for the TC of Kalmaegi (a); The black solid line is the time series of the wind gust observation at YICT during the TC period from 00am, Sep. 13 to 14pm, Sep. 17; the red and green dash lines refer to the wind gust prediction; the blue solid line is the wind predicted by ECMWF model(b)

2014年下半年除了台风“海鸥”以外，还有“威马逊”、“TD465”、“凤凰”登陆华南沿海，Li等^[10]的研究证明历史阵风统计方法可以对3个港湾码头站的最大阵风做出比较准确的估测，可以为预报员

提供非常有价值的参考信息。2015年进入深圳700km影响范围圈的热带气旋有：“美莎克”、“鲸鱼”、“莲花”、“苏迪罗”、“杜鹃”、“彩虹”，对深圳影响最大的是台风“彩虹”（图4）。参考图2中台风强度热带气旋对盐田港的历史影响，盐田港的最大阵风应该在 $24\sim 28.5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，而实际观测到的盐田港最大阵风为 $25.9\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。相比，ECMWF最新预报的盐田港最大风力为 $13\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，历史统计方法预报最大阵风影响的准确率远高于ECMWF模式。

深圳市气象局在此研究结果基础上开发成阵风预报模块，纳入深圳市气象局热带气旋综合业务平台（图4）。当一个热带气旋进入气象站700km范围，预报员根据其强度，选定相应的热带气旋类型，根据数值模式提供的台风路径，该阵风预报模块就能提供一个沿海自动站的阵风时间序列的预报，并给出相应最佳预警信息、预警发布时间等信息供预报员参考。

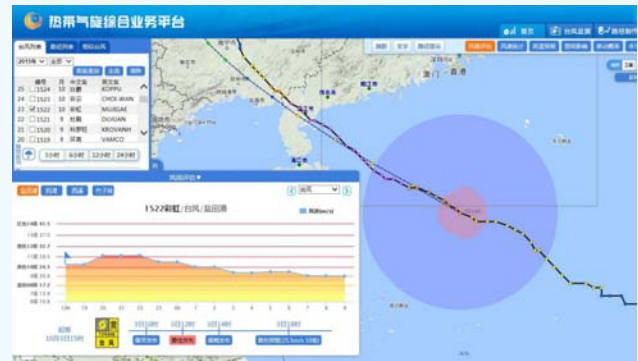


图4 深圳市气象局热带气旋综合业务平台“近海热带气旋对台站阵风影响预报”模块

Fig. 4 The integrated operational service platform for tropical cyclones at Shenzhen Meteorological Bureau – the module of wind gust prediction due to offshore tropical cyclones

再以2016年对深圳影响最大的、登陆深圳市大鹏区与盐田区的“妮妲”台风为例，检验阵风预报模块的应用。不同于“海鸥”与“彩虹”，妮妲是于深圳的东南方向趋近深圳（图5），即台风处于各气象站的第二象限方位，参考图2中台风影响图，从东南方向移近深圳，台风要距离盐田港200km左右，盐田港才开始8级以上大风，从图5中看到热带气旋预报模块预报的大风开始时间大概为8月1日22—23时；模块预报的最大阵风为 $29.1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，发生时间为8月2日05时。盐田港实际观测的8级以上大风的发生时间是8月1日22时，最大风大小为 $28.8\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，发生时间为8月2日05时57分，模块的预报情况与实际发生情况非常吻合^①。

① 热带气旋登陆以后，强度会迅速衰减，之后所有的阵风影响应该参考强热带风暴或者热带风暴曲线，所以图5中台风引发阵风时间序列只参考8月2日07时以前的预报曲线。



图5 热带气旋阵风预报模块预报“妮妲”对盐田港阵风的影响
Fig. 5 The wind gust prediction at YICT due to Nida by the wind gust prediction module for tropical cyclones

同样，台风“妮妲”期间，预报模块对妈湾港、蛇口码头也提供了阵风量级以及发生时间的准确评估（表1）。

表1 “妮妲”对深圳各气象站最大阵风影响观测与预报比较

Table 1 Comparison of the maximum wind gust predictions with observations at the three coastal stations in Shenzhen during the TC period of Nida

气象站	观测		统计方法预报（8月1日14时预报）		EC模式预报（8月1日00UTC预报）	
	最大阵风（m·s ⁻¹ ）	发生时间	最大阵风（m·s ⁻¹ ）	发生时间	最大阵风（m·s ⁻¹ ）	发生时间
盐田港	28.8	8月2日05:57	29.1	8月2日5时	14.46	8月2日8时
妈湾港	22.5	8月2日03:02	25.2	8月2日6时	24.45	8月2日8时
蛇口码头	27.3	8月2日08:30	27.0	8月2日5时	24.45	8月2日8时

台风有非常强的观测能力。下一步将研究探讨卫星资料在台风的灾害预报中的应用，以提高台风灾害的预报能力。

本研究对深圳3个港湾码头观测站，在热带气旋影响期间的历史瞬时极大风进行分析。研究发现瞬时风具有间歇性，其大小受周边环境影响大。无阻挡的地方，风最大；地形条件存在狭管效应会进一步加大风力影响。所有方位中，同样级别热带气旋位于观测站的西南象限时，对观测站影响最大，STS级别以上热带气旋在西南象限时引发盐田港8级以上大风的距离可以达到400km及以上。

本研究的沿海自动气象站的瞬时极大风与热带气旋强度、热带气旋距离和相对自动气象站方位三要素之间的统计关系，对深圳市气象局发布台风预警有很大的参考价值，并为港口码头的精细化预报、重点防护单位的防台减灾工作提供了服务。本研究着力于从传统的气象要素预报到行业气象风险预报转变，为区域社会生活和经济发展做出了重大贡献。

从表1可以看出，相比较欧洲中心数值预报模式，基于历史数据统计方法预报的“妮妲”台风对深圳3个沿海港湾码头自动站的预报更为精准，不但能准确预报出最大阵风的量级大小，而且对最大阵风发生的时间也能给出非常准确的预报。

3 结论

基于历史观测数据，本研究给出3个沿海港湾码头自动站在不同级别热带气旋影响下的最大阵风图，可供业务预报参考。深圳市气象局已将统计研究结果开发成阵风预报模块，纳入气象局热带气旋综合业务平台。本研究成果在2014年7月—2016年9月台风影响期间得到了应用和比较好的验证。需要指出的是，因为自动站的历史原因，用于统计建模的自动站阵风数据还不是太多，所以本研究的统计预报方法会有预报不准的时候，但是随着将来观测记录的增加，阵风样本的增多，统计方法预报热带气旋对港湾码头的阵风影响的准确度会越来越高。另外，在台风研究中，卫星观测是一个比较可靠的信息来源，地球静止卫星对

参考文献：

- [1] Willoughby H E, Rappaport E N, Marks F D. Hurricane forecasting: the state of the art. *Natural Hazards Review*, 2007, 8(3): 45-49.
- [2] Li Q, Lan H, Chan J C L, et al. An operational statistical scheme for tropical cyclone induced rainfall forecast. *J Trop Meteor*, 2015, 21(2): 101-110
- [3] 陈联寿. 热带气旋研究和业务预报技术的发展. *应用气象学报*, 2006, 17(6): 672-681.
- [4] 许映龙, 张玲, 高栓柱. 我国台风预报业务的现状及思考. *气象*, 2010, 36(7): 43-49.
- [5] 端义宏, 陈联寿, 许映龙, 等. 我国台风监测预报预警体系的现状及建议. *中国工程科学*, 2012, 14(9): 4-9.
- [6] DeMaria M, Knaff J A, Sampson C. Evaluation of long-term trends in tropical cyclone intensity forecasts. *Meteor Atmos Phys*, 2007, 97(1): 19-28.
- [7] Kidder S Q, Kusselson S J, Knaff J A, et al. The Tropical Rainfall Potential (TRaP) technique. Part I: description and examples. *Wea Forecasting*, 2005, 20(4): 456-464.
- [8] Davis C, Wang W, Chen S, et al. Prediction of landfalling hurricanes with the Advanced WRF model. *Mon Wea Rev*, 2008, 136(6): 1990-2005.
- [9] 许映龙, 韩桂荣, 麻素红, 等. 1109号超强台风“梅花”预报误差分析及思考. *气象*, 2011, 37(10): 1196-1205.
- [10] Li Q, Xu P, Wang X, et al. An operational statistical scheme for tropical cyclone induced wind gust forecasts. *Wea Forecasting*,

(下转148页)

象服务的社会经济效益。

致谢：在历史台风个例收集中，感谢上海、福建、浙江、江苏、江西、安徽、海南、广西、广东、山东、河北、辽宁、吉林共13个省（自治区、直辖市）的大力支持，他们为本研究提供了相关台风个例的气象服务背景材料及基础数据。在此致以诚挚谢意。

参考文献

- [1] 姚秀萍, 吕明辉, 范晓青, 等. 我国气象服务效益评估业务的现状与展望. 气象, 2010, 36(7): 62-68.
- [2] 李佳英, 薛建军, 王维国, 等. 2013年台风决策气象服务浅析. 防灾科技学院学报, 2014, 16(1): 62-68.
- [3] 陈香. 福建省台风灾害风险评估与区划. 生态学杂志, 2007, 26(6): 961-966.
- [4] 陈文方, 徐伟, 史培军. 长三角地区台风灾害风险评估. 自然灾害学报, 2011(4): 77-83.
- [5] 彭琳玲. 气象服务效益与热带气旋灾害评估方法的研究. 南京: 南京大学, 2012.
- [6] 陈香, 沈金瑞, 陈静. 灾损度指数法在灾害经济损失评估中的应用——以福建台风灾害经济损失趋势分析为例. 灾害学, 2007, 22(2): 31-35.
- [7] 郑卫江. 气象要素可视化与台风灾害评估关键技术研究. 北京: 首都师范大学, 2007.
- [8] 方玉. 福建省台风灾害危险性评估和气象指数保险. 南京: 南京信息工程大学, 2012.
- [9] 刘程波. 热带气旋灾损预测技术研究及其决策支持系统的开发. 南京: 南京信息工程大学, 2011.
- [10] 樊琦, 梁必骥. 热带气旋灾害经济损失的模糊数学评测. 气象科学, 2000, 21(3): 360-366.
- [11] 吴先华, 徐中兵, 袁迎蕾, 等. 台风灾害的关联经济损失评估——以江苏省为例. 灾害学, 2014, 29(2): 77-83.
- [12] 周福. 重大气象灾害（台风、暴雨）服务效益评估研究. 科技通报, 1998(1): 39-43.
- [13] 张美娟. 台风气象服务效益评估方法研究与系统开发. 南京: 南京信息工程大学, 2011.
- [14] 张颖超, 张美娟. 基于逆推算法的浙江省台风气象服务效益评估. 信息技术, 2011(10): 30-34.
- [15] 林继生, 罗金玲, 张勇. 热带气旋灾害预报服务效益评估方法之一——对比分析法. 气象科技, 1998(2): 61-64.
- [16] 杨林, 曹春荣, 林秋, 等. 台风“苏力”灾害风险与防御行为效益评估. 气象与环境学报, 2015(1): 106-111.
- [17] 吴林荣, 罗慧, 鲁渊平, 等. 重大气象灾害服务效益评估系统设计与业务应用. 气象科技, 2010, 38(3): 394-398.
- [18] 陈衍泰, 陈国宏, 李美娟. 综合评价方法分类及研究进展. 管理科学学报, 2004, 7(2): 69-79.
- [19] 韦钢, 杨毅, 王建, 等. 基于综合评价方法的输变电工程技术后评价. 电网技术, 2010(3): 112-116.
- [20] 顾基发. 物理—事理—人理（WSR）系统方法论. 交通运输系统工程与信息, 1995(3): 25-28.
- [21] 张永恒, 薛建军, 温显罡, 等. 关于台风决策气象服务技术的总结与探究. 防灾科技学院学报, 2013, 15(4): 68-74.
- [22] 许小峰. 现代气象服务. 北京: 气象出版社, 2010: 12-13.
- [23] 毛恒青, 姚秀萍, 吕明辉. 全国气象服务典型案例集（2011—2012）. 北京: 气象出版社, 2015: 103-110.

（上接133页）

- [11] 林良勋, 冯业荣, 黄忠, 等. 广东省天气预报技术手册. 北京: 气象出版社, 2006.
- [12] Bureau of Meteorology. Tropical cyclone intensity and impacts. [2016-03-15]. <http://www.bom.gov.au/cyclone/about/intensity.shtml>.
- [13] Tsai K. Terminal Operations in High Wind Conditions. ICHCA International Safety Panel Research Series, 2009.
- [14] Bos W V D. Wind Influence on Container Handling, Equipment and Stacking (Edition 29). Port Technology International. [2016-03-12]. https://www.porttechnology.org/images/uploads/technical_papers/PT29-19.pdf
- [15] Powell M D, Reinhold T A. Tropical cyclone destructive potential by integrated kinetic energy. Bull Amer Meteor Soc, 2007, 88(4): 513-526.
- [16] Irish J L, Resio D T, Ratcliff J J. The influence of storm size on hurricane surge. J Phys Oceanogr, 2008, 38(9): 2003-2013.
- [17] Knaff J A, Longmore S P, Molenaar D A. An objective satellite-based tropical cyclone size climatology. J Climate, 2014, 27(1): 455-476.
- [18] Wu L G, Tian W, Liu Q Y, et al. Implications of the observed relationship between tropical cyclone size and intensity over the Western North Pacific. J Climate, 2015, 28: 9501-9506.
- [19] Frank W M. The structure and energetics of the tropical cyclone. I. Storm structure. Mon Wea Rev, 1977, 105: 1119-1135.
- [20] Zhang Q H, Wei Q, Chen L S. Impact of landfalling tropical cyclones in mainland China. Science China (Earth Science), 2010, doi: 10.1007/s11430-010-4034-8.
- [21] Chen L S. Research progress on the structure and intensity change for the landfalling tropical cyclones. J Trop Meteor, 2012, 18(2): 113-118.
- [22] 陈联寿, 孟智勇. 我国热带气旋研究十年进展. 大气科学, 2001, 25(3): 420-432.
- [23] Chen Y, Yau M K. Asymmetric structures in a simulated landfalling hurricane. J Atmos Sci, 2003, 60(18): 2294-2312.
- [24] Kimball S K. Structure and evolution of rainfall in numerically simulated landfalling hurricanes. Mon Wea Rev, 2008, 136(10): 3822-3847.
- [25] Meeus J. Astronomical Algorithms. Willmann-Bell Inc, 1999.