

# 基于多源数据的台风风暴潮概率预报研究:台风集合的构建

郭文云<sup>1</sup>, 安佰超<sup>2</sup>, 裘诚<sup>2</sup>, 李钺<sup>2</sup>, 李丕学<sup>2</sup>, 葛建忠<sup>3</sup>, 丁平兴<sup>3</sup>

(1.上海海事大学海洋科学与工程学院,上海 201300;2.上海市海洋监测预报中心,上海 200062;3.华东师范大学河口海岸学国家重点实验室,上海 200062)

**摘 要:** 建立了一套用于台风风暴潮集合预报的台风集合构建方案。首先基于中国中央气象台、中国香港天文台、中国台湾中央气象局、美国联合台风预警中心、日本气象厅和韩国气象台6家预报中心的预报数据,构建一个误差更小的24 h、48 h和72 h预报时效的台风分析数据;然后基于分析数据构建9个路径样本(1条分析路径+2个概率圆上的8条概率路径)和3个台风最大风速(概率偏弱、居中和偏强)样本,形成27个台风样本集合,并根据分析风场的误差分布合理确定不同台风样本的发生概率。通过对台风“利奇马”的应用,证实该集合方案可以覆盖大部分可能的情景,集合样本具有较强的代表性,可用于台风风暴潮的集合预报。

**关键词:** 集合预报;台风路径;最大风速;概率圆;误差分析

**中图分类号:** P731.23 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2021)01-0026-08

## 1 引言

风暴潮是我国主要的海洋灾害之一,可摧毁沿海基础设施,并破坏海洋渔业及农作物。据统计,2018年我国由于风暴潮灾害造成的直接经济损失为44.56亿元,占海洋灾害总损失的93%<sup>[1]</sup>。此外,有研究显示,受全球气候变化和海平面上升的影响,热带气旋引起的台风风暴潮出现的频率和强度都呈现潜在的上升趋势<sup>[2-3]</sup>。在此背景下,亟需提高我国的风暴潮预报能力,从而准确预估风暴潮危害并做好防灾减灾措施。

风暴潮预报在经历了定性和半定量的经验统计方法后,逐渐转向了基于海洋模型的数值模拟技术<sup>[4-6]</sup>。风暴潮数值模拟的精度主要取决于模式本身(如空间分辨率和模式中包含的物理过程等)及外部驱动(如潮动力和风应力等)的精度。大气运动,特别是台风发展和演化过程中强烈的非线性特征,导致台风的路径和强度预报都存在不可忽略的

误差<sup>[7-10]</sup>。统计数据显示,2016年中央气象台台风24 h、48 h和72 h预报时效的平均路径误差分别为76.2 km、147.3 km和244.7 km;平均最大风速误差分别为5.4 m/s、7.3 m/s和7.6 m/s<sup>[8]</sup>。台风预报中较为显著的误差使得台风风场成为制约风暴潮预报准确性的重要因素<sup>[11-12]</sup>。

克服这一缺陷最有效的手段是发展风暴潮集合预报(或概率预报)技术,即根据台风预报的不确定性,生成多个可能的台风样本(不同路径、不同强度或不同大小),并合理确定每个样本的发生概率,进行多个情景的预报<sup>[11, 13-14]</sup>。理论上,样本越多结果越合理,但这将带来计算量的显著增长,制约预报时效。因此,合理确定台风集合及不同集合样本的发生概率成为风暴潮概率预报的关键。美国国家飓风中心(National Hurricane Center, NHC)发展的P\_surge模型根据其历史台风预报误差,确定了3个可能路径、3个可能中心风速以及3个可能最大风速半径及其发生概率,相互交叉形成27个台风样本来

收稿日期: 2019-12-04; 修回日期: 2020-02-23。

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(41906143);上海市海洋局科研项目(沪海科2018-07);上海市青年科技英才扬帆计划项目(19YF1418500)。

作者简介: 郭文云(1989-),男,讲师,博士,主要从事河口海岸水沙动力数值模拟研究。E-mail: wyguo@shmtu.edu.cn

通讯作者: 葛建忠(1981-),男,副研究员,博士,主要从事近海环境动力学研究。E-mail: jzge@sklec.ecnu.edu.cn。

进行风暴潮的概率预报<sup>[15]</sup>。日本气象厅(Japan Meteorological Agency, JMA)则对台风集合预报的27个路径进行聚类分析,得到5个代表性台风路径用于风暴潮的集合预报<sup>[16]</sup>。

然而,以上都是基于单一预报源的风暴潮概率预报。对于影响我国的西北太平洋热带气旋,中国中央气象台(简称“中国台”)、日本气象厅(简称“日本台”)、美国联合台风预警中心(简称“美国台”)、韩国气象台(简称“韩国台”)、中国香港天文台(简称“中国香港台”)和中国台湾中央气象局(简称“中国台湾台”)都进行了长期稳定的业务化预报。丁雪霖等<sup>[17]</sup>、袁杰颖等<sup>[18]</sup>、江应境等<sup>[19]</sup>以及刘莹等<sup>[20]</sup>的研究证实,基于多个预报源的台风数据可以得到误差更小的分析路径,有利于构建更合理的台风集合。

本文建立了一套利用多源台风预报数据生成风暴潮预报所需台风集合的方案。方案首先对不同预报中心的历史预报数据进行充分的误差分析,根据各预报中心的预报台风及历史统计误差生成一条误差更小的分析路径,并得到分析路径的误差统计;然后采用“概率圆”方法<sup>[21-22]</sup>,生成9条台风路径和3个不同强度的中心风速,相互交叉得到27个台风样本的台风集合。

## 2 数据与方法

### 2.1 台风资料

本文采用上海台风所(网址: <http://112.124.12.97/publicityphoon/>)公布的2014—2018年中国台、中国香港台、中国台湾台、美国台、日本台和韩国台于台风期间发布的台风预报数据,并从中国气象局热带气旋中心收集对应的最佳路径数据集用于误差统计。该数据集提供每6 h的位置、近中心2 min最大平均风速和中心最低海平面气压。

本文主要研究区域为长江口,因此只选取对长江口存在显著影响的31个台风过程(台风经过范围为25°~35°N, 117°~127°E的区域)进行分析。所得预报数据共13 775条,其中24 h、48 h、72 h、96 h和120 h预报数据记录分别为3 982、3 308、2 734、2 116和1 635条(本文只分析24 h、48 h和72 h预报时效的数据);来自中国台、中国香港台、中国台湾台、

美国台、日本台和韩国台的数据记录分别为2 834、1 495、2 602、2 563、2 745和1 536条。有效台风位置、最大风速和中心气压预报记录分别为13 775、11 461和4 593个。由于中心气压预报数据太少,本文不对其进行分析。

### 2.2 预报台风误差的估计

对于台风路径预报误差,本文采用台风位置平均绝对距离误差( $\Delta R$ )来进行检验评估:

$$\Delta R = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M |\vec{P}_f - \vec{P}_o| \quad (1)$$

式中: $\vec{P}_f$ 为预报位置; $\vec{P}_o$ 为对应时刻最优路径的位置; $M$ 为参与误差计算的数据量。

对于台风中心附近最大风速,本文不直接定量风速绝对误差,而是定量预报风速的相对误差:

$$\alpha_v = \frac{V_o - V_h}{V_h} \quad (2)$$

式中: $V_h$ 为预报时效(如24 h预报)的最大风速; $V_o$ 为该时刻最佳路径的最大风速。风场误差则采用 $\alpha_v$ 的均方根来估计。式(2)中分母使用 $V_h$ 而不是 $V_o$ 是因为本文的工作主要为风暴潮预报而做,预报的时候 $V_h$ 已知而 $V_o$ 未知,这样可以方便地使用 $V_h$ 来估计 $V_o$ 。

### 2.3 分析台风风场的估计

分析路径根据6个预报源的预报数据及其误差来估计,每个预报源数据的权重为其误差的倒数<sup>[22]</sup>:

$$P_a = \sum_{i=1}^N a_i P_i / \sum_{i=1}^N a_i \quad (3)$$

式中: $P_i$ 为某预报时效(如24 h预报)第*i*个预报源预报的变量,如位置坐标和最大风速等; $a_i = 1/E_i$ ,  $E_i$ 为该预报源的关于该变量的预报误差,该误差可根据历史预报数据统计得到。 $N$ ( $\leq 6$ )为该时刻所使用的有效预报源数量。

### 2.4 台风集合的构建方法

由于风暴潮增水对台风路径的影响十分敏感,本文拟基于分析生成两个概率圆(见图1)。每个概率圆上分布4条台风极端路径,分别为偏快、偏慢、偏左和偏右。台风路径集合由1条分析路径和8条

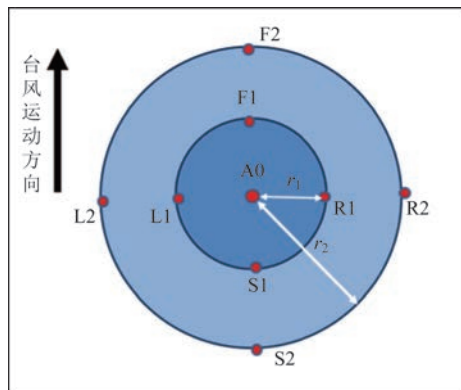


图1 台风路径集合概图

扰动路径构成。

内外概率圆半径 $r_1$ 和 $r_2$ 及不同路径的发生概率是确定台风概率集合的重要参数。如果我们先确定 $r_1$ 和 $r_2$ ,再根据历史预报数据统计各个路径的发生概率,那么很难保证同一条路径在24 h、48 h和72 h预报时效的概率是相同的,也给以后的数据处理带来很大不便。因此,本文先确定不同样本的发生概率,然后通过历史预报误差累积概率分布得到对应的 $r_1$ 和 $r_2$ 值。

我们认为当 $r_2 \approx 2r_1$ 时,各个路径样本的代表性较强。同时为使得路径集合尽可能全面地覆盖所有可能性,经过多次验证,本文设计分析路径的概率为40%,内概率圆上每条路径的概率为12%,外概率圆上每条路径的概率为3%。据此可求得 $r_1$ 对应于路径误差累积概率曲线上40%+12%×4/2=64%处的误差值;同理, $r_2$ 对应于路径误差累积概率曲线上40%+12%×4+3%×4/2=96%处的误差值。

基于分析台风最大风速的误差分布,同样可以构建台风最大风速集合。本文仅构建概率偏弱、居中和偏强3个扰动最大风速。美国P\_surge风暴潮集合预报系统设计的最大风速偏弱、居中和偏强的概率为30%、40%和30%<sup>[15]</sup>。为了覆盖更多的可能性,本文设计其发生概率分别为20%、60%和20%,从而它们的值分别对应于台风最大风速误差累积概率曲线10%、50%和90%处的误差值。

最后,由以上9条台风路径和3个台风最大风速相互交叉,可形成27个不同的预报路径,作为风暴潮集合预报的风场驱动样本。

### 3 结果及分析

#### 3.1 预报台风误差

采用式(1)对所选择的2014—2018年的31个台风过程进行路径误差分析,所得结果如图2a所示。得益于台风预报技术的不断发展,6家预报中心可以做到24 h预报平均误差小于90 km,48 h预报平均误差小于140 km(韩国台除外),72 h预报平均误差小于220 km(韩国台除外)。24 h、48 h和72 h台风预报路径误差最小的机构分别是日本台(68 km)、日本台(128 km)和中国台(196 km)。除韩国台误差较大外,其他5家预报中心的预报路径误差没有明显差距。

对于台风最大风速,本文采用式(2)来分析预报相对误差,并计算其均方根值来估计各个预报中心的预报误差。结果表明(见图2b),24 h、48 h和72 h预报最大风速误差最小的机构分别是日本台(0.194)、中国台(0.235)和中国台(0.253)。与路径误差特征不同的是,台风48 h预报时效的最大风速相对误差与72 h预报时效的误差相差不大,相似的特征也出现于陈国民等<sup>[18]</sup>统计的台风最大风速绝对误差中。此外,台风最大风速预报误差以中国台湾台的最大,其余5家预报中心的误差没有明显区别,特别是对于48 h和72 h预报时效(见图2b)。

#### 3.2 分析台风风场

采用各预报中心在不同预报时效的平均路径误差,通过式(3)计算得到一条分析路径。同样可以采用式(1)估计分析路径的误差。如图2a所示,分析路径在24 h、48 h和72 h预报时效都优于表现最好的单一预报源,其平均误差分别是66 km、125 km和192 km,相对最优预报源的误差分别偏小3 km、3 km和4 km。

分析台风的最大风速也可基于各预报源的历史误差统计采用式(3)进行估计。如图2b所示,分析台风的最大风速误差同样都优于表现最好的单一预报源,其24 h、48 h和72 h的平均误差分别是0.184、0.232和0.244,相对最优预报源的误差分别偏小0.010、0.003和0.009。



虽然根据多源数据所得分析台风并没有比最优的单一预报源数据有显著改善,但是由于不同预报时效表现最优的预报机构是不同的,这导致如果采用单一预报源数据会在某个预报时效呈现较大的误差。如仅采用中国台预报数据,那么其24 h预报风速并不是统计意义上最好的选择。总体来看,采用多源数据的优势主要体现在可以在任意预报时效和任意变量(路径或最大风速等)中采用(可供选择的)统计意义上的最优预报数据。

### 3.3 台风集合

本文拟根据所得台风分析场衍生出8条路径(两个“概率圆”)。两个“概率圆”的半径 $r_1$ 和 $r_2$ (见图1)需要根据分析台风的误差分布来进行估计。图3a为分析台风24 h、48 h和72 h预报时效的路径

误差累积概率分布。内概率圆半径 $r_1$ 对应于累积概率曲线上64%处的误差值;外概率圆半径 $r_2$ 对应于累积概率曲线上96%处的误差值。所得结果如表1所示,24 h预报时效的 $r_1$ 和 $r_2$ 分别为74 km和146 km;48 h预报时效的 $r_1$ 和 $r_2$ 分别为134 km和307 km;72 h预报时效的 $r_1$ 和 $r_2$ 分别为218 km和438 km。 $r_2$ 约为 $r_1$ 的两倍,表明各个路径样本的代表性较为合理。

同理,根据分析台风的最大风速累积概率曲线可以得到衍生的台风最大风速集合。本文设计3个最大风速样本:概率偏弱、居中和偏强。取值分别对应于分析台风最大风速误差累积概率曲线上10%、50%和90%的误差值。图3b为分析台风24 h、48 h和72 h预报时效的最大风速误差累积概率分布。3个最大风速样本如表2所示,24 h预报时效的

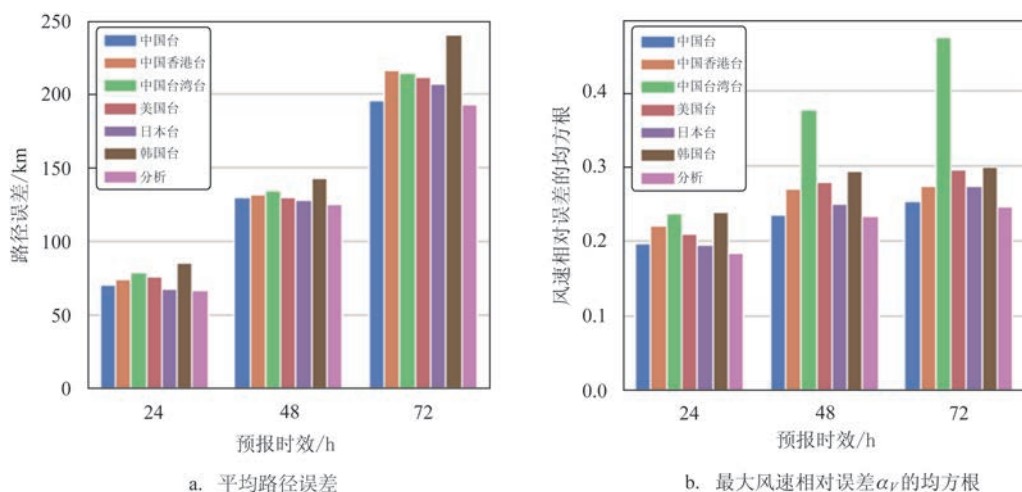


图2 研究区域台风预报误差统计

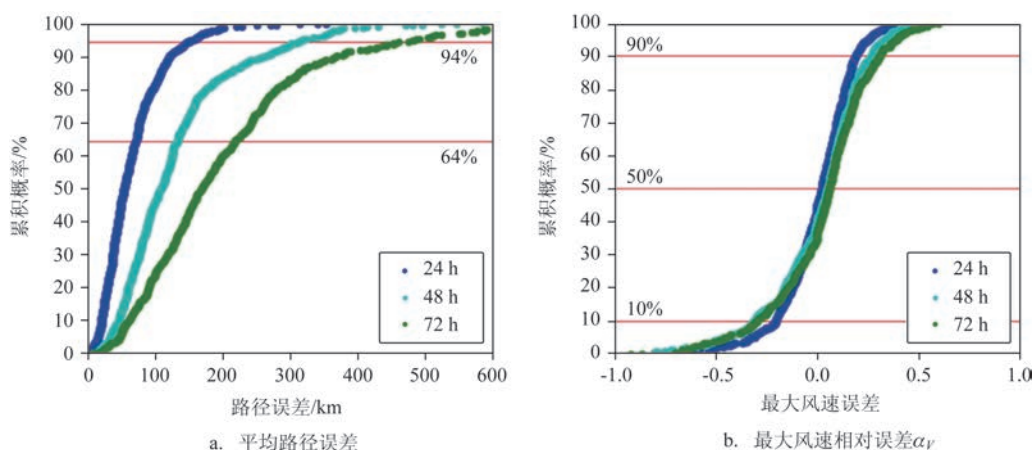


图3 不同预报时效台风分析场的误差累积概率图

最大风速在预报风速的0.81~1.2倍范围内;48 h预报时效的最大风速在预报风速的0.69~1.26倍范围内;72 h预报时效的最大风速在预报风速的0.70~1.31倍范围内。我们看到,24 h预报时效的预报风速误差较小,但48 h和72 h预报时效的风速误差变化不大。需要注意的是,预报风速误差并不是呈严格对称分布,因此概率居中的最大风速与分析场的最大风速略有差异,最大差异为0.06倍,也就是每17 m/s差1 m/s。

以上我们建立了一套基于多源台风预报数据构建分析台风风场,然后根据分析台风风场衍生出9个台风路径样本和3个台风最大风速样本的方案。将以上9个路径样本和3个最大风速样本相互交叉,可形成一个包含27个台风样本的集合。集合主要参数根据分析风场的误差分布和不同样本的设计发生概率来确定(见表1和表2)。

#### 4 典型个例分析

以2019年第9号台风“利奇马”为例,介绍本文建立的台风集合构建方案在实际风暴潮预报中的具体应用。1909号热带风暴“利奇马”于2019年8月4日14时(北京时,下同)生成于我国台风48 h警戒线附近(17.4°N,131.9°E);之后一路向西北方向移动,于8月7日5时加强为台风,并快速地向当日晚间加强为超强台风。台风“利奇马”于8月10日01时45分在浙江省温岭市城南镇沿海登陆,登陆时中心附近最大风力16级(52 m/s),仍然为超强台风(见图4a)。登陆后,台风“利奇马”迅速减弱,经过

上海附近的太湖时已减弱为热带风暴。

本文以台风“利奇马”登陆前24 h左右(即8月9日02时为预报时间点)进行台风集合构建。图4a显示各个预报中心于该时刻的预报路径。6家预报中心预报的台风登陆地点(24 h预报时效)和时间十分接近,虽然中国台湾台预报台风移动偏慢,韩国台预报台风移动偏快,但差距不大。但对于48 h预报,各家预报中心的预报路径差距较大,中国台湾台依然预报台风慢速移动,只到达30°N;而韩国台依然预报偏快,已经到达32.2°N,两者相差超过200 km。如果在风暴潮预报中仅采用单一预报源数据,那么采用韩国台和中国台湾台预报路径进行的风暴潮预报结果将存在显著差异。至于72 h预报,除中国台湾台预报台风移动偏慢(只到达33°N)以外,其他5家预报中心的预报位置十分接近(到达35.6°N附近)。

采用式(3),利用图2a所示各预报中心的误差进行加权平均,可以得到分析路径。由于各家预报中心的预报路径误差十分接近,分析路径的位置几乎相当于各家预报中心预报位置的平均位置。我们需要强调的是,分析路径并不总是最优的,如图4a所示,对于48 h预报路径,中国台的预报路径比分析路径更接近台风实际运移路径;但分析路径一定是统计意义上最优的。

得到分析路径后即可基于表1中所示参数构建台风集合。图4b为采用8月9日02时的预报数据构建的台风“利奇马”路径集合。显然,24 h、48 h和72 h预报时效的实测路径都被本文所构建的路径集合覆盖,表明本文的台风路径集合构建方法是合理

表1 台风路径集合主要参数(路径集合概图见图1)

集合路径	发生概率	概率圆半径/km		
		24 h	48 h	72 h
分析路径A0	40%	—	—	—
内概率圆 $r_1$ (F1,S1,L1,R1)	12%	74	134	218
外概率圆 $r_2$ (F2,S2,L2,R2)	3%	146	307	438

表2 台风最大风速集合主要参数(对应的最大风速 $V=(1+\alpha_v)V_h$ ,其中 $V_h$ 为分析风场的最大风速)

集合最大风速 $\alpha_v$	发生概率	24 h	48 h	72 h
概率偏弱	20%	-0.19	-0.31	-0.30
概率居中	60%	-0.02	0.05	0.06
概率偏强	20%	0.20	0.26	0.31

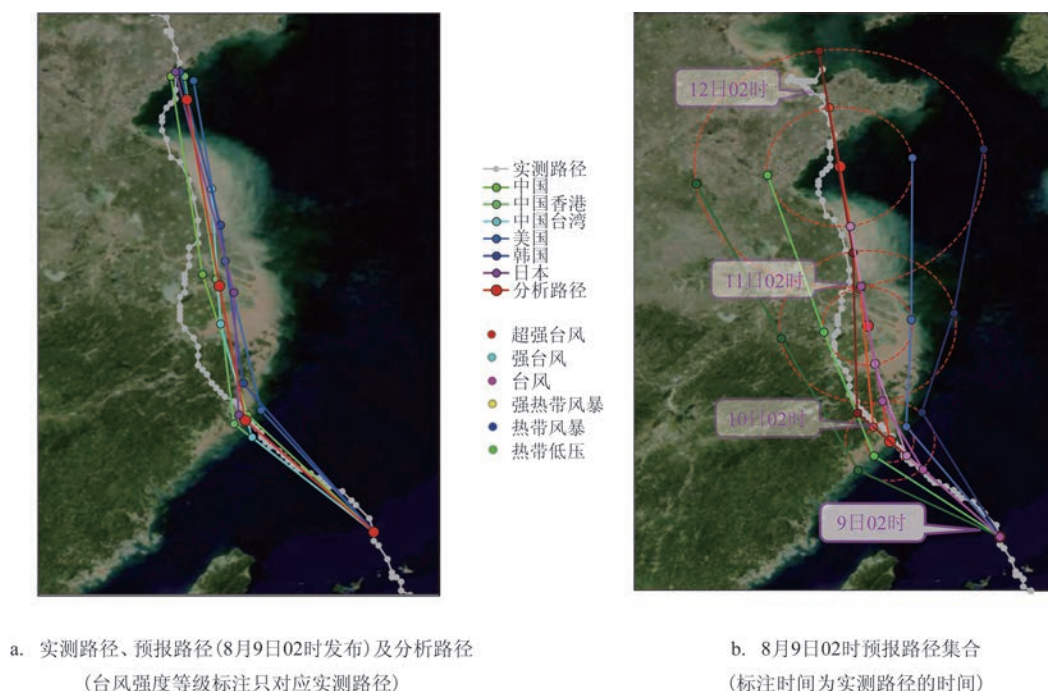


图4 台风“利奇马”路径

表3 2019年8月9日02时不同预报中心对台风“利奇马”的预报最大风速、分析最大风速、集合最大风速和实测最大风速(单位:m/s)

预报时效	中国台	中国香港台	中国台湾台	美国台	日本台	韩国台	分析	概率偏弱	概率居中	概率偏强	实测
24 h	48	49	53	51	40	40	46.8	37.9	45.8	56.1	52
48 h	33	40	40	31	25	32	33.1	26.1	34.7	41.7	23
72 h	23	33	30	26	20	29	26.5	18.6	28.1	34.7	23

的,可以较为全面地覆盖可能的路径。其中,24 h和48 h预报时效的实测路径都在内概率圆以内,72 h预报时效的实测路径则略微超出了内概率圆,也体现了本文采用两个概率圆的重要性。

如表3所示,2019年8月9日02时不同预报中心预报的台风“利奇马”最大风速值差异较大。24 h、48 h和72 h预报时效的最大差异都超过10 m/s。如中国台湾台预报24 h后台风“利奇马”的最大风速为53 m/s,但日本台和韩国台相应的预报值仅为40 m/s。同样采用式(3)和图2b所示参数进行加权平均可得分析台风的最大风速,24 h、48 h和72 h预报时效最大风速分别为46.8 m/s、33.1 m/s和26.5 m/s。基于表2中的参数即可得到3个集合最大风速。如表3所示,24 h和72 h预报时效的最大风速集合都较好地覆盖了实测风速,但预报48 h时效的最大风速集

合没有覆盖到实测风速,实测风速(23 m/s)比概率偏弱的风速(26.1 m/s)更小。这可能是由于实际台风在陆地上的运移距离比预报的更长,导致实际受到的地面摩擦效应更强所致。

## 5 结论与展望

本文建立了一套台风集合构建方案。该方案首先搜集了中国中央气象台、中国香港天文台、中国台湾中央气象局、美国联合台风预警中心、日本气象厅和韩国气象台6家预报中心的预报数据;然后构建一个误差更小的分析台风风场;最后基于分析风场及其误差分布构建了27个台风样本(9条路径和3个最大风速),并根据不同样本的设计概率合理确定相关参数。该方案具有如下优点:



(1)采用多源数据,可以得到误差更小的分析台风风场。基于此构建的台风集合离散度较低,用于风暴潮预报可期望得到更精确的结果。同时,多源数据还可避免单一来源预报数据在某个时刻的较大误差,减少漏报几率。

(2)台风集合考虑了路径和最大风速的误差,构建了9条路径和3个最大风速一共27个台风样本,可以较为全面地覆盖可能的情景。

(3)台风集合中每个台风样本的发生概率都有所不同,通过分析台风风场误差分布得到。台风集合样本及其发生概率较为合理。

当然,本文所建立的方案还存在可改进之处。首先,台风路径集合采用的是“概率圆”思想,但从实际情况(见图4)及有关研究<sup>[7,20]</sup>来看,预报台风的路径误差在不同方向上有所不同。如预报台风路径经常偏慢或偏快较多,但是偏左或偏右的幅度则相对较小。因此,对于路径集合的构建,可以尝试采用“概率椭圆”方法。其次,台风最大风速的变化应该与台风的运动路径有关,如图3所示,偏左路径都在陆地上,而偏右路径都在海洋上。地面和海面台风的摩阻效果显然存在巨大差异。因此从理论上来说,对于图4中的偏左路径,其最大风速集合中的概率偏弱风速的发生概率应该更大,而风速概率偏强的概率应该更小。

## 参考文献:

- [1] 自然资源部. 2018年中国海洋灾害公报[R]. 北京: 自然资源部, 2019.
- [2] Wahl T, Jain S, Bender J, et al. Increasing risk of compound flooding from storm surge and rainfall for major US cities[J]. *Nature Climate Change*, 2015, 5(12): 1093-1097.
- [3] Lin N, Emanuel K, Oppenheimer M, et al. Physically based assessment of hurricane surge threat under climate change[J]. *Nature Climate Change*, 2012, 2(6): 462-467.
- [4] 王喜年. 风暴潮预报知识讲座 第五讲 风暴潮预报技术(2)[J]. *海洋预报*, 2002, 19(2): 64-70.
- [5] 于福江, 张占海, 林一骅. 一个稳态 Kalman 滤波风暴潮数值预报模式[J]. *海洋学报*, 2002, 24(5): 26-35.
- [6] Chen Y R, Chen L H, Zhang H, et al. Effects of wave-current interaction on the Pearl River Estuary during Typhoon Hato[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2019, 228: 106364.
- [7] Peng X D, Fei J F, Huang X G, et al. Evaluation and error analysis of official forecasts of tropical cyclones during 2005-14 over the western North Pacific. Part I: storm tracks[J]. *Weather and Forecasting*, 2017, 32(2): 689-712.
- [8] 陈国民, 张喜平, 白莉娜, 等. 2016年西北太平洋和南海热带气旋预报精度评定[J]. *气象*, 2018, 44(4): 582-589.
- [9] Colle B A, Charles M E. Spatial distribution and evolution of extratropical cyclone errors over North America and its Adjacent Oceans in the NCEP global forecast system model[J]. *Weather and Forecasting*, 2011, 26(2): 129-149.
- [10] 王坚侃, 何宽科, 徐哲永. 台风“圆规”路径预报偏差分析[J]. *海洋预报*, 2012, 29(3): 48-52.
- [11] 柏亚周, 李训强, 郑崇伟, 等. 风暴潮集合预报现状及前景展望[J]. *中国科技信息*, 2011(4): 28-30.
- [12] 阎秉耀, 周雅静. 气象资料的误差对台风暴雨数值预报精度影响的估计[J]. *海洋预报*, 1990, 7(1): 59-65.
- [13] 肖梦睫, 孙丽, 潘崇伦. 风暴潮多路径预报的集合预报模式研究综述[J]. *地球*, 2018(4): 96-97.
- [14] Kohno N, Dube S K, Entel M, et al. Recent progress in storm surge forecasting[J]. *Tropical Cyclone Research and Review*, 2018, 7(2): 128-139.
- [15] Taylor A A, Glahn B. Probabilistic guidance for hurricane storm surge[C]//19th Conference on Probability and Statistics. New Orleans, LA: American Meteorology Society, 2008.
- [16] Hasegawa H, Kohno N, Higaki M, et al. Upgrade of JMA's storm surge prediction for the WMO Storm Surge Watch Scheme (SSWS) [R]. Technical Review No. 19, Tokyo: RSMC Tokyo-Typhoon Center, 2017: 1-9.
- [17] 丁雪霖, 陈永平, 顾茜. 2013年西北太平洋台风路径集合预报[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2015, 43(4): 361-365.
- [18] 袁杰颖, 陈永平, 潘毅, 等. 台风路径集合化预报方法的优化[J]. *海洋预报*, 2017, 34(2): 37-42.
- [19] 江应境, 高山红. 一种动态权重的台风集成预报方法[J]. *海岸工程*, 2018, 37(3): 1-13.
- [20] 刘莹, 潘毅, 陈永平, 等. 预估偏差法集合化台风路径概率预报[J]. *海洋预报*, 2019, 36(3): 18-23.
- [21] 王培涛, 于福江, 刘秋兴, 等. 福建沿海精细化台风风暴潮集合数值预报技术研究及应用[J]. *海洋预报*, 2010, 27(5): 7-15.
- [22] 陈永平, 顾茜, 张长宽. 集合化台风风场的构建方法研究及应用[C]//第十六届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集(上册). 大连: 中国海洋学会海洋工程分会, 2013.

## Probabilistic forecast for typhoon storm surge based on multi-source data : Creation of typhoon ensemble

GUO Wen-yun<sup>1</sup>, AN Bai-chao<sup>2</sup>, QIU Cheng<sup>2</sup>, LI Cheng<sup>2</sup>, LI Pi-xue<sup>2</sup>, GE Jian-zhong<sup>3</sup>, DING Ping-xing<sup>3</sup>

(1. College of Ocean Science and Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201300 China; 2. Shanghai Marine Environmental Monitoring and Forecasting Center, Shanghai 200062 China; 3. State Key Laboratory of Estuarine & Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062 China)

**Abstract:** This study establishes a scheme for creating a typhoon ensembles that is used in storm surge probabilistic forecast. Based on the forecast products of the China Meteorological Administration, Hong Kong Observatory, Central Weather Bureau, Joint Typhoon Warning Center, Japan Meteorological Administration and Korea Meteorological Administration, a typhoon analysis dataset with higher accuracy for the 24-hours, 48-hours and 72-hours forecast is created. The dataset is used to generate 9 members for track (1 analysis track and 8 probabilistic track on the probability circle) and 3 members for typhoon maximum wind speed (weak, medium and strong probability), which results in 27 typhoon ensemble members. Meanwhile, the probability of each ensemble members is determined based on the error distribution of the typhoon analysis dataset. The scheme is validated by typhoon “Lekima”. The results show that the scheme includes most possible scenarios and the representativeness of the ensemble members are significant, which approves the applicability of the scheme in typhoon storm surge probabilistic forecast.

**Key words:** ensemble forecast; typhoon track; maximum wind speed; probability circle; error analysis