

孔莉莎,张秀芝. 西北太平洋历史台风风场重建模型参数试验. 应用气象学报, 2022, 33(1): 56-68.

DOI: 10.11898/1001-7313.20220105

西北太平洋历史台风风场重建模型参数试验

孔莉莎* 张秀芝

(国家气候中心, 北京 100081)

摘要

基于 Yan Meng 风场模型,使用中国近海浮标观测资料,对影响风场模拟的台风最大风速半径 R_{\max} 、压力分布常数 B 、粗糙度 z_0 3 个参数进行估算试验,结果表明:台风中心最大风速 V_{\max} 和台风所处纬度的组合方案对估算 R_{\max} 更合理;海面(浮标站)在 $z_0=0.005\text{ m}$, $B=1.0$ 时风速模拟效果较好。选取登陆闽北浙江、北上东海、西进南海、穿台湾岛进入台湾海峡的共 19 个台风过程进行模拟效果检验发现:当中央气象台发布的 $V_{\max}<40\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, $B=1.0$, $z_0=0.005\text{ m}$ 模拟的 V_{\max} 接近发布的 V_{\max} ,非最强风速区的模拟风速与浮标站观测风速拟合较好,发布的 $V_{\max}\geq 40\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, $B=1.4$, $z_0=0.005\text{ m}$ 模拟的 V_{\max} 接近发布的 V_{\max} ,非最强风速区的模拟风速在 $B=1.0$, $z_0=0.005\text{ m}$ 时更合理。基于该风场模型和参数估算方案,可重建西北太平洋历史台风风场。

关键词: 台风; 风场模型; 参数试验; 模拟验证

引言

西北太平洋是世界上发生热带气旋最多的海区,约占全球热带气旋的 $1/3$ ^[1](以下将热带气旋统称为台风)。我国地处西北太平洋西岸,海岸线较长,是世界上受台风影响最严重的国家之一^[2]。台风发生时,台风大风会对沿海工程设备、海洋能源开发设施^[3]等产生不利影响,给人民群众生命财产安全、交通运输等造成重大损失^[4]。随着我国海洋开发和海洋经济的快速发展,台风影响区的大风分布成为研究热点。台风影响期间船舶避航,海上大风观测资料非常匮乏^[5],卫星测风达不到实际台风强度。研究表明:欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) ERA-Interim 和 ERA5、日本气象厅 JRA-55、美国国家环境预测中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)再分析资料的台风中心位置偏差为 $20\sim 140\text{ km}$,台风中心最大风速

(V_{\max})平均偏差均为负值,其中 JRA-55 平均偏差为 $-24.5\sim -6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,中位数为 $-18\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ^[6]。因此,为满足风暴潮、海浪等其他台风灾害致灾因子风险评估^[7]、海上能源开发^[8]、海上军事活动、海洋渔业需求,亟待重建西北太平洋历史台风风场。在此基础上建立 1951—2020 年中国近海分辨率为 0.25° 网格点台风大风序列,计算西北太平洋 50 年一遇最大风速,可为海洋工程设计提供科学依据。

利用数值模型计算是获取台风风场的常用方法。气象学中的台风数值模型包括 WRF(The Weather Research and Forecasting), GRAPES(Global/Regional Assimilation and Prediction System)^[9]等,但数值模式计算周期较长,计算量大,不适合历史台风风场重建。半经验半数值的风场模型以及参数化风场模型计算较为简便,取得的模拟效果也较为精确,如 Shapiro 风场^[10]、CE 风场^[11]、Yan Meng(简称 YM)风场等。其中, YM 风场模型是 Meng 等^[12]1995 年建立的一种考虑边界层摩擦力修正的压力梯度平衡方程,有些学者使用 YM 风

2021-05-26 收到, 2021-09-18 收到再改稿。

资助项目: 国家自然科学基金项目(51761135012), 中国气象局 2021 年度气候研究开放实验室青年基金项目“浮标、海上平台海面风观测资料的质量控制及应用”, 国家重点研发计划(2020YFA0608203)

* 邮箱: kongls@cma.gov.cn

场模型模拟台风风场,证实了该模型的可行性。如郭云霞等^[13]通过 Monte-Carlo 模拟方法和 YM 风场模型计算每个研究点台风的最大风速,构成极值风速序列。赵林等^[14]基于 YM 风场模型,构建台风风场随机模型。谢汝强等^[15]结合观测资料,验证该模型具有较好的模拟效果。因此,本文选用 YM 风场模型进行台风风场模拟。

YM 风场模型中,台风最大风速半径(R_{\max})、压力分布常数(B)、粗糙度(z_0)3 个关键参数对台风风场模拟效果影响很大。其中, R_{\max} 指台风云墙附近最大风速出现处与台风中心之间的径向距离^[16],是最关键的模型参数之一,也是衡量台风水平尺度的主要标准之一。然而,目前包含 R_{\max} 的资料非常有限,国内外学者多采用统计或物理模型计算 R_{\max} 。雷小途等^[17]利用 Bogus 台风的切向风速廓线模型得到 R_{\max} 与 8 级风圈半径之间的转换关系;Vickery 等^[18]、Fang 等^[19]、江志辉等^[20]、李瑞龙^[21]基于历史资料的中心气压、 V_{\max} 、纬度等参数对 R_{\max} 进行拟合;胡邦辉等^[22]利用含有摩擦的平面极坐标水平运动方程组,得到海面移动非对称台风的 R_{\max} 计算方案;陈德文等^[23]利用 QuikSCAT 卫星遥感风场建立一种基于遥感风场的台风 R_{\max} 反演方法。压力分布常数 B ,也称 Holland B 参数,国外关于 B 的研究多针对不同海域,建立 B 与其他参数的经验计算方程^[24-27],但针对西北太平洋 B 取值研究的报道尚不多见,Guo 等^[28]比较国内外求取 B 的几种计算模型,并试验 B 取固定值的方法,基于某台风个例得到 B 约为 0.8 时,观测站风速与模拟风速较接近。粗糙度 z_0 与地形有关,大面积海域 z_0 的测量资料少且时空分布极不均匀,各国规范和不同学者对其的研究略有不同,传统外推方法得到的 z_0 随 10 m 风速的增加而增加, z_0 可高达 0.02 m,Zeng 等^[29]构建的 z_0 参数化方案证明 z_0 虽也随 10 m 风速的增加而增加,但最大约为 0.008 m,10 m 风速超过 $40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 后, z_0 有所降低。

重建西北太平洋历史台风风场,需要模拟 1951—2020 年西北太平洋区域所有台风,因此上述 3 个参数的取值要适合大范围区域的大量台风个例的计算,所用资料应方便获取。目前的台风风场模拟研究多数针对某一个地点、某一个台风个例或某个时间段,且参数取值多采用经验公式计算,但某些

参数的经验公式仅适用于特定海域,缺少大量观测资料对其探讨。因此,对 3 个参数的适配取值进行试验并结合西北太平洋台风影响期间观测资料进行合理优化是首要问题。

本文首先基于美国联合台风警报中心(Joint Typhoon Warning Center, JTWC)资料集,讨论 R_{\max} 的影响因子,提出 4 种影响因子组合方案,并通过观测资料选取最佳组合方案;结合不同台风影响期间的浮标站观测风速,对 B, z_0 取值进行估算试验;基于 YM 模型和 3 个参数的最优组合,对 19 个台风过程进行海上台风风场模拟效果检验。

1 资料与方法

1.1 资料

本文所用资料包括:①2001—2018 年 JTWC 西北太平洋台风最佳路径资料集,包含台风发生的时间、台风中心位置、 V_{\max} 、中心最低气压、 R_{\max} 等,时间间隔为 6 h;②2001—2018 年 ECMWF 再分析资料集中西北太平洋每日 4 个时次,水平分辨率为 $0.75^\circ \times 0.75^\circ$ 的海温数据;③2013—2020 年中央气象台台风网(typhoon.nmc.cn/web.html) 24 个台风的中心位置、 V_{\max} 、中心最低气压、移速、移向等要素;④来源于国家气象信息中心、国家海洋信息中心的浮标观测资料(2013—2020 年 24 个台风影响期间 13 个浮标站 10 m 高度 10 min 平均风速),浮标站分布见图 1。前两种资料用于 R_{\max} 影响因子组合方案研究,后两种资料用于参数取值试验及台风风场模拟效果检验。

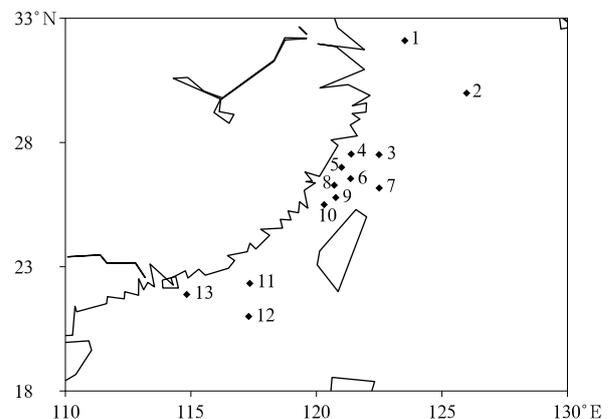


图1 浮标站分布

Fig. 1 Distribution of buoy stations

重建西北太平洋历史台风风场目的之一是计算海面不同重现期最大风速^[30]并用于海洋工程设计^[31],而进行海洋工程设计风速推算时,通常选择10 min平均风速为标准风速值^[32]。由于资料①和资料③中的 V_{\max} 分别采用的是1 min,2 min平均风速,因此需要将资料①和资料③中 V_{\max} 的不同时距统一换算为10 min平均风速。1 min,2 min平均风速换算为10 min平均风速的换算系数分别取1.11和1.07^[32-33]。下文中 V_{\max} 均为换算后的10 min平均风速。

1.2 YM风场模型

YM风场模型^[12]采用Holland气压模型,其形式如下:

$$p = p_c + \Delta p e^{-(R_{\max}/r)^B} \quad (1)$$

式(1)中, p_c 为台风中心气压, Δp 为台风外围气压与台风中心气压的差值, B 为压力分布常数, R_{\max} 为台风最大风速半径, p 为距离台风中心径向距离为 r 的海平面压强。

YM风场模型的数值形式如下:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \cdot \nabla V = -\frac{1}{\rho} \nabla p - f \mathbf{k} \times V + F \quad (2)$$

式(2)中, V 为风速, ρ 为空气密度, \mathbf{k} 为垂向单位向量, f 为科氏参数, F 为边界层摩擦力。

YM模型中,风速可以视为梯度风速和摩擦风速的矢量和,由摩擦风速引入阻力系数 C_d , C_d 与粗糙度的关系为

$$C_d = \kappa^2 / \{\ln[(H_{10} + h - d)/z_0]\}^2 \quad (3)$$

式(3)中, z_0 为粗糙度,单位:m; κ 为卡曼常数,取0.4; H_{10} 为平均粗糙单元以上10 m高度,单位:m; $H_{10} = 10 + d$; d 为零平面位移,单位:m; $d = 0.75h$, $h = A z_0^{0.86}$, $A = 11.4$ 。YM模型详细说明可参考文献^[12]。在该风场模型中,除 R_{\max} , B , z_0 3个参数之外,其余参数可从现有资料获得。

2 R_{\max} 影响因子组合方案

R_{\max} 是衡量台风水平尺度的重要指标,其取值直接影响台风气压场和风场的模拟效果。由于本文研究目的是利用包含 R_{\max} 在内的台风参数重建1951—2020年西北太平洋历史台风风场,而JTWC西北太平洋台风最佳路径资料集无2001年以前的 R_{\max} ,因资料所限,需要以现有资料对 R_{\max} 取值进行探讨。本章通过统计分析,讨论月份、纬度、海温、 V_{\max} 、中心气压与 R_{\max} 之间的关系,确定 R_{\max} 影响因子的组合方案。月份、纬度、 V_{\max} 、中心气压、 R_{\max} 取自2001—2018年JTWC西北太平洋台风最佳路径资料集,海温来自ECMWF再分析资料,取台风中心位置对应时刻周围200 km范围的海温平均值。

2.1 R_{\max} 影响因子筛选

由于本文目标是模拟海上台风风场,因此对于登陆台风只取登陆前的样本,从JTWC资料集共获得9790条台风路径点样本。为便于统计,对各因子进行分级(表1)。

表1 各因子等级

Table 1 Grade of factors

等级	$V_{\max}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	中心气压/hPa	纬度	台风发生月份	海温/°C
1	(12,17]	(875,950]	(3°N,20°N]	1,2,3,12	(15,20]
2	(17,25]	(950,970]	(20°N,25°N]	4,5,11	(20,27]
3	(25,30]	(970,1000]	(25°N,30°N]	6—10	(27,32]
4	(30,40]	(1000,1015)	(30°N,50°N)		
5	(40,90)				

图2为各因子与 R_{\max} 的关系。 R_{\max} 在不同月份表现不同, R_{\max} 中位数在1月、2月、3月、12月为55~75 km,这一时期台风生成和移动路径一般在15°N以南,强度较弱;4—5月和7—11月约为50 km,6月约为65 km。 R_{\max} 上限在4月、6—8月、11月约为130~140 km,其他月份为90~110 km。各月 R_{\max} 的95%分位数在100 km上下。 R_{\max} 在不同纬度表现也不同,各纬度区间的 R_{\max} 中位数最大约为56 km,在(20°N,30°N]最小,约为45 km; R_{\max}

的95%分位数在(20°N,30°N]约为110 km,30°N以北最大,约为130 km。在海温与 R_{\max} 的关系中,各海温等级中 R_{\max} 中位数均为50 km左右,95%分位数均为110 km。图2表明 V_{\max} 与 R_{\max} 呈负相关关系,即 V_{\max} 越大, R_{\max} 越小;中心气压与 R_{\max} 呈正相关关系,中心气压越高, R_{\max} 越大。

由上述分析可知,各海温等级中 R_{\max} 中位数、95%分位数几乎相同,由于早期海温资料缺乏,因此选择月份、纬度、 V_{\max} 、中心气压为 R_{\max} 的影响因子。

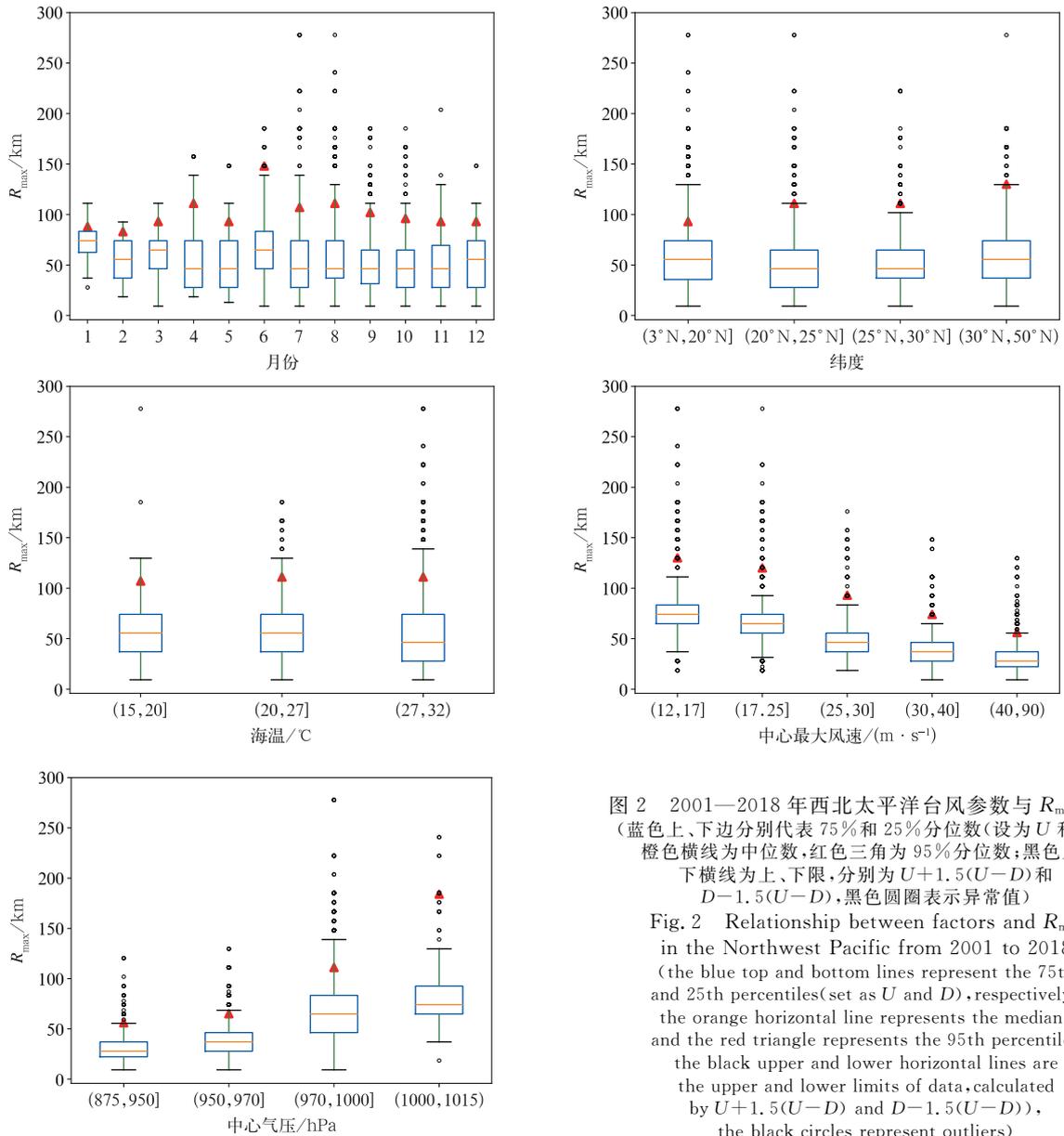


图 2 2001—2018 年西北太平洋台风参数与 R_{max} 关系 (蓝色上、下边分别代表 75% 和 25% 分位数(设为 U 和 D), 橙色横线为中位数, 红色三角为 95% 分位数; 黑色上、下横线为上、下限, 分别为 $U+1.5(U-D)$ 和 $D-1.5(U-D)$, 黑色圆圈表示异常值)

Fig. 2 Relationship between factors and R_{max} in the Northwest Pacific from 2001 to 2018 (the blue top and bottom lines represent the 75th and 25th percentiles (set as U and D), respectively, the orange horizontal line represents the median, and the red triangle represents the 95th percentile, the black upper and lower horizontal lines are the upper and lower limits of data, calculated by $U+1.5(U-D)$ and $D-1.5(U-D)$, the black circles represent outliers)

2.2 不同影响因子组合方案

将 4 个影响因子配置出 4 种组合方案, 即中心气压与月份(方案 1), 中心气压与纬度(方案 2), V_{max} 与月份(方案 3), V_{max} 与纬度(方案 4), 分别计算每种组合方案中两个影响因子在不同等级区间的 R_{max} 样本平均值作为对应的 R_{max} , 表 2 为方案 1 和方案 2 对应的 R_{max} , 表 3 为方案 3 和方案 4 对应的 R_{max} 。

可以看到, 相同月份类别或同一纬度等级中, 中心气压越大, R_{max} 越大; V_{max} 越大, R_{max} 越小。表 2 和表 3 中, 中心气压等级或 V_{max} 等级相同时, 6—10 月 R_{max} 较大。此外, 方案 1 和方案 2 中, 相同中心气压等级, 不同月份类别或不同纬度等级之间 R_{max} 相

不大(中心气压为(1000 hPa, 1015 hPa)除外); 方案 3 中, 相同 V_{max} 等级, 不同月份类别 R_{max} 相差不大。方案 4 中, 30°N 以南, R_{max} 随纬度增大而增大(V_{max} 在 $[12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}, 17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}]$ 除外)。

2.3 对比试验

使用台风妮妲(1604)影响期间 11 号浮标、台风海马(1622)影响期间 13 号浮标、台风玛莉亚(1808)影响期间 5 号和 10 号浮标、台风米娜(1918)影响期间 4 号浮标、台风巴威(2008)影响期间 2 号浮标的观测风速对上述 4 种影响因子组合方案进行对比试验。以台风玛莉亚(1808)为例, 首先利用其时间、纬度、中心气压和 V_{max} , 在表 2 和表 3 中查找 4 种方案对应的 R_{max} , 再将 R_{max} 带入 YM 风场模型计算浮标

表2 方案1和方案2对应的 R_{\max} (单位:km)
Table 2 R_{\max} based on Scheme 1 and Scheme 2(unit:km)

中心气压/hPa	台风发生月份			纬度			
	1,2,3,12	4,5,11	6-10	(3°N,20°N]	(20°N,25°N]	(25°N,30°N]	(30°N,50°N)
(875, 950]	27	29	32	29	32	37	35
(950, 970]	32	34	38	34	36	44	38
(970, 1000]	65	61	68	65	70	67	71
(1000, 1015)	72	80	93	87	86	83	69

表3 方案3和方案4对应的 R_{\max} (单位:km)
Table 3 R_{\max} based on Scheme 3 and Scheme 4(unit:km)

$V_{\max}/(m \cdot s^{-1})$	台风发生月份			纬度			
	1,2,3,12	4,5,11	6-10	(3°N,20°N]	(20°N,25°N]	(25°N,30°N]	(30°N,50°N)
(12,17]	72	78	82	79	85	80	82
(17,25]	66	62	70	65	69	74	78
(25,30]	41	43	53	45	53	57	58
(30,40]	37	36	41	37	41	43	42
(40,90)	27	30	33	29	32	41	36

站模拟风速。图3为当 $B=1.0$, $z_0=0.005$ m时,5号和10号浮标站模拟风速与观测风速对比(图中时间为北京时间,下同)。试验结果显示,在给定 B 和 z_0

后,方案4得到的6站次浮标站的模拟风速与观测风速更加接近,因此选择方案4为 R_{\max} 的组合方案。

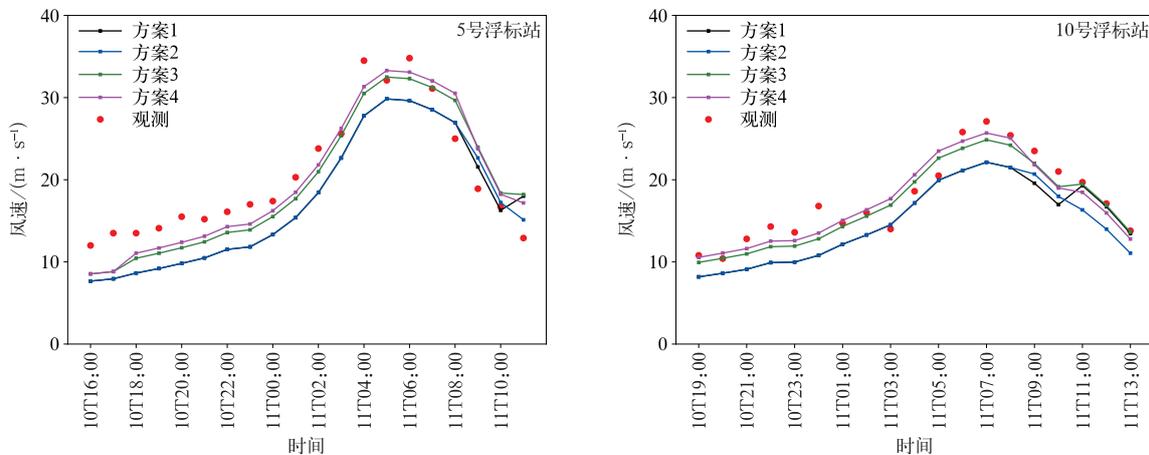


图3 2018年7月10—11日台风玛莉亚(1808)影响期间两个浮标站模拟风速与观测风速对比

Fig. 3 Comparison of simulated and observed wind speed at two buoy stations during the influence period of Typhoon Maria(1808) on 10-11 Jul 2018

3 B 和 z_0 取值试验

基于方案4查找对应的 R_{\max} ,结合不同的 B 和 z_0 取值进行台风风场模拟,通过与浮标站的观测风速进行对比,探讨 B 和 z_0 取值组合。

3.1 B 和 z_0 取值应满足的两种规则

计算中国近海50年一遇最大风速,重点在于计算历史台风过程的最大风速,因此确定 B 和 z_0 的取值范围时,应在同一 R_{\max} 影响因子组合方案的基础上,将 B 和 z_0 带入模型后求得模拟最大风速接近观

测最大风速,即站点最大风速偏差绝对值最小(规则1)。

当 $z_0=0.005$ m时,由图4可知,2017年8月22—23日台风天鸽(1713)影响期间, $B=0.8$ 时12号浮标站逐小时观测风速与模拟风速较接近。不同 B 值条件下 V_{\max} 模拟值与中央气象台发布的 V_{\max} (简称发布值)对比表明: $B=1.0$ 时,模拟值与发布值更接近。故 B 和 z_0 的取值还应使得 V_{\max} 模拟值与发布值之间的偏差绝对值最小,这里将偏差绝对值不大于 $5 m \cdot s^{-1}$ 作为 B 和 z_0 的规则2。

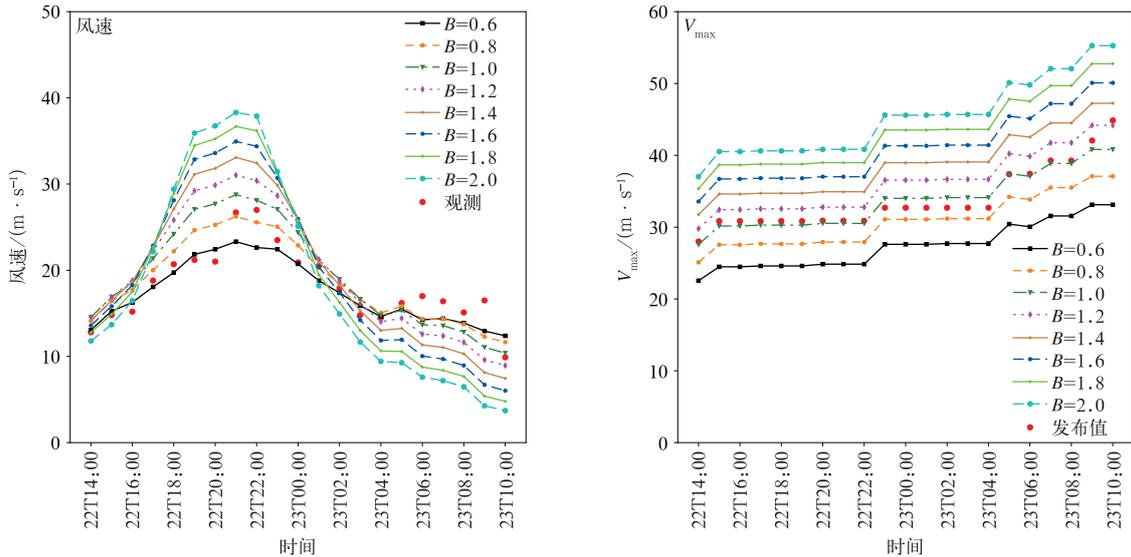


图 4 2017 年 8 月 22—23 日台风天鸽(1713)影响期间 12 号浮标站的风速和 V_{\max}
 Fig. 4 The wind speed of buoy station 12 and V_{\max} during the influence period of Typhoon Hato(1713) on 22—23 Aug 2017

3.2 B 和 z_0 的取值试验

基于 3.1 节中 B 和 z_0 的取值应同时满足的两种规则,将浮标站模拟最大风速与观测最大风速之差绝对值记为 v' , V_{\max} 模拟值与发布值之差的绝对值记为 v'_{\max} , z_0 分别取 0.001 m, 0.005 m, 0.01 m, 0.02 m, 设 B 的取值分别为 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0。

以表 4 中台风天鸽(1713)影响期间 12 号浮标站为例说明浮标站对应的 B 和 z_0 最优取值组合试验步骤:①当 z_0 取 0.001 m, B 分别取 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0 时,计算 12 号浮标站观

测时间内的 v'_{\max} , 得到满足 $v'_{\max} \leq 5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的 B 值为 1.0, 即满足规则 2 的 B 和 z_0 取值分别为 1.0 和 0.001 m;②利用 $z_0 = 0.001 \text{ m}$ 和 $B = 1.0$ 求得 12 号浮标站的 v' 为 $3.88 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (不满足规则 2 的 B 值无需计算 v')。同理计算 z_0 分别取 0.005 m, 0.01 m, 0.02 m 时满足规则 2 的 B, 并利用这些 B 和 z_0 的取值组合计算 12 号浮标站的所有 v' , 其中 v' 最小值为 $2.54 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 且对应的 $z_0 = 0.005 \text{ m}$ 和 $B = 1.0$ 为该浮标站同时满足规则 1 和规则 2 取值结合。由于 B 分别取 0.6, 0.8, 1.8, 2.0 时不满足规则 2, 故表 4 中未列出。

表 4 浮标站 v'
 Table 4 v' of buoy stations

台风	站号标识	z_0/m	$v'/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$			
			B=1.0	B=1.2	B=1.4	B=1.6
天鸽(1713)	12 号	0.020		3.03	5.08	
		0.010		4.10		
		0.005	2.54*	4.97		
		0.001	3.88			
天鸽(1713)	13 号	0.020		5.45	7.90	10.16
		0.010	4.17*	7.05	9.65	
		0.005	5.38	8.41		
		0.001	7.46	10.72		
帕卡(1714)	13 号	0.020	1.78*	2.95	3.83	
		0.010	2.78	4.04		
		0.005	3.63	4.97		
		0.001	5.08	6.57		
玛莉亚(1808)	5 号	0.020		3.2	2.49	2.25
		0.010		1.65	0.82	0.49
		0.005	1.70	0.27*	0.60	0.99
		0.001	0.57	2.19	3.23	

续表 4

台风	站号标识	z_0/m	$v'/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$			
			$B=1.0$	$B=1.2$	$B=1.4$	$B=1.6$
玛莉亚(1808)	8号	0.020		5.01	7.66	10.08
		0.010		6.52	9.32	11.88
		0.005	4.55*	7.78	10.72	13.41
		0.001	6.47	9.95	13.11	
玛莉亚(1808)	10号	0.020		2.72	2.49	2.75
		0.010		1.53	1.25	1.45
		0.005	1.41	0.48	0.15*	0.34
		0.001	0.31	1.39	1.84	
米娜(1918)	4号	0.020	6.10	4.87	4.07	3.71
		0.010	5.07	3.74	2.89	2.46
		0.005	4.19	2.76	1.85	
		0.001	2.68	1.08*		
巴威(2008)	1号	0.020		1.14	1.22	1.76
		0.010		0.07*	0.12	0.65
		0.005	0.32	0.86	0.84	
		0.001	1.85	2.52	2.58	
巴威(2008)	2号	0.020		1.90	0.12*	1.31
		0.010		0.47	1.41	2.95
		0.005	1.63	0.76	2.73	4.38
		0.001	0.24	2.85	5.06	
美莎克(2009)	2号	0.020			5.95	6.31
		0.010		4.75	4.56	4.90
		0.005		3.59	3.38	3.69
		0.001	2.46	1.49	1.17*	

注: *表示浮标站 v' 同时满足规则 1 和规则 2。

由表 4 可知,10 站次浮标站同时满足规则 1 和规则 2 时, B 和 z_0 取值组合有 9 种,计算这 9 种取值组合在 10 站次浮标站中的取值次数和每种 B, z_0 取值组合下 v' 在 10 站次浮标站中的平均值,计算结果见表 5。 $B=1.0$ 和 $z_0=0.005 \text{ m}$ 同时满足规则 1 和规则 2 出现 2 次,且对应的 v' 平均值最小,即当 $B=1.0$ 和 $z_0=0.005 \text{ m}$ 时,浮标站模拟风速与观测风速较为接近。此外,满足规则 2 后,所有浮标站出现次数较多的 B 和 z_0 组合共有 7 对: $B=1.0, z_0=0.005 \text{ m}; B=1.0, z_0=0.001 \text{ m}; B=1.2, z_0=$

$0.02 \text{ m}; B=1.2, z_0=0.01 \text{ m}; B=1.2, z_0=0.005 \text{ m}; B=1.2, z_0=0.001 \text{ m}; B=1.4, z_0=0.02 \text{ m}$ 。7 对组合在所有浮标站中对应 v' 平均值最小时, $B=1.0, z_0=0.005 \text{ m}$ 。

B 和 z_0 的取值范围试验结果表明:基于方案 4 查找对应的 R_{\max} ,当浮标站 $z_0=0.005 \text{ m}, B=1.0$ 时,浮标站模拟风速较接近观测风速。同时,浮标站 z_0 增大时,满足规则 2 的 B 值集合中的最大值也增大,说明 B 和 z_0 同时增大时, V_{\max} 模拟值与发布值偏差绝对值较小。

表 5 9 种 B 和 z_0 取值组合次数及 v' 平均值
Table 5 The frequency of nine combinations of values of B and z_0 and the average value of v'

B 和 z_0 取值组合	次数	v' 平均值/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
$B=1.0, z_0=0.005 \text{ m}$	2	2.81
$B=1.4, z_0=0.001 \text{ m}$	1	4.50
$B=1.4, z_0=0.005 \text{ m}$	1	2.90
$B=1.4, z_0=0.020 \text{ m}$	1	4.08
$B=1.0, z_0=0.010 \text{ m}$	1	4.01
$B=1.0, z_0=0.020 \text{ m}$	1	3.94
$B=1.2, z_0=0.005 \text{ m}$	1	3.49
$B=1.2, z_0=0.001 \text{ m}$	1	4.31
$B=1.2, z_0=0.010 \text{ m}$	1	3.39

4 YM 模型模拟效果检验

4.1 V_{\max} 模拟精度检验

基于 YM 风场模型,利用方案 4 查找对应的 R_{\max} ,取 $B=1.0, z_0=0.005 \text{ m}$,对第 3 章用于参数试验之外的 9 个台风过程进行模拟,图 5 为 V_{\max} 模

拟值与发布值对比。由图 5 可知,当 V_{\max} 发布值低于 $40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,9 个台风的 V_{\max} 模拟值较接近发布值;当 V_{\max} 发布值不低于(含) $40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,台风灿鸿(1509)和台风莎莉嘉(1621) V_{\max} 模拟值略低于发布值。 B 分别取 1.2,1.4 和 1.6 进行试验,发现 $B=1.4, z_0=0.005 \text{ m}$ 时,两个台风的 V_{\max} 模拟值更接近发布值,即当 V_{\max} 不低于 $40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, $B=1.4$ 。

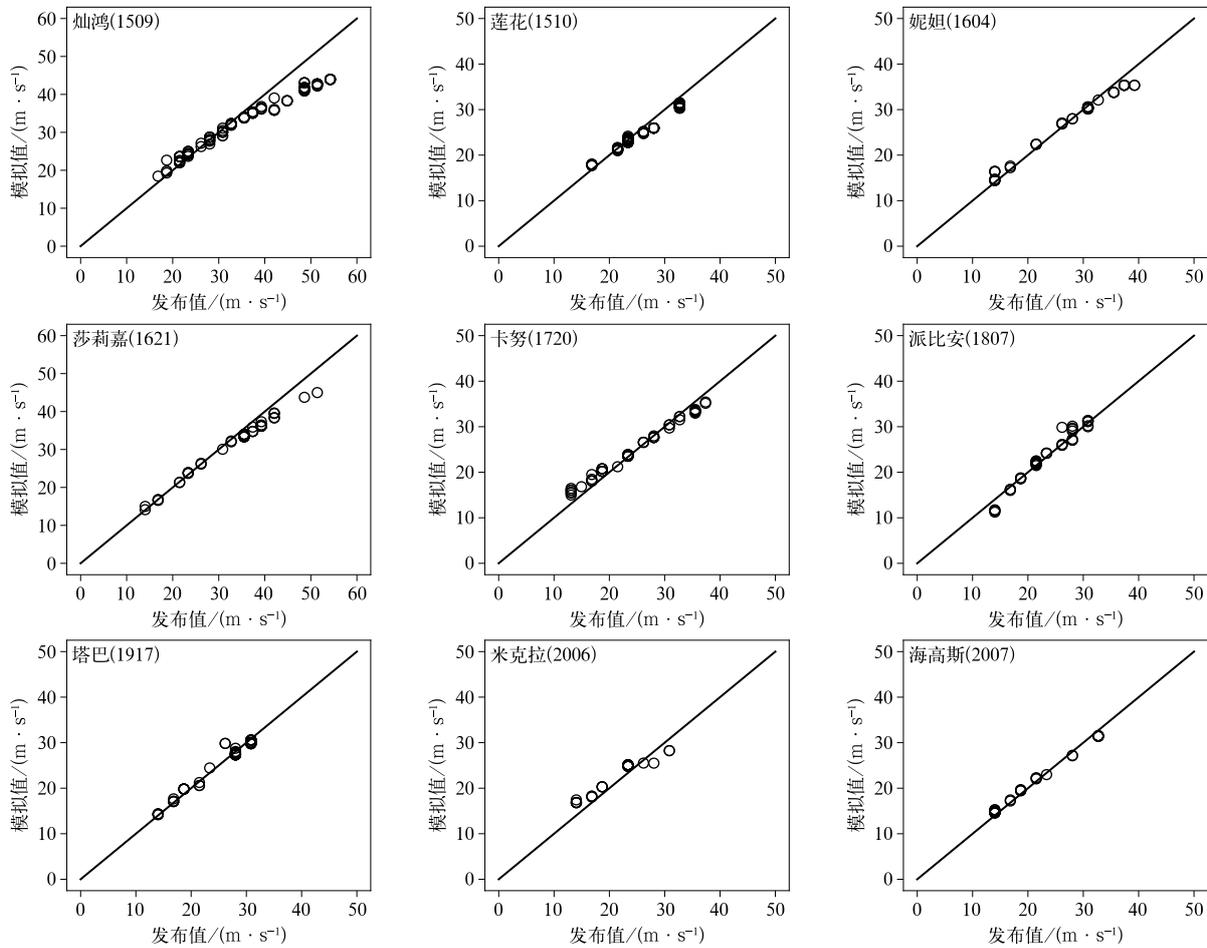


图 5 V_{\max} 模拟值与发布值对比

Fig. 5 Comparison of simulated and published values of maximum wind speed

4.2 台风风场模拟效果检验

2018 年 7 月 4 日 20:00 台风玛莉亚(1808)在 $12.4^{\circ}\text{N}, 146.2^{\circ}\text{E}$ 生成,加强西行,11 日 09:10 在福建连江黄岐镇登陆,按照 V_{\max} 发布值不低于 $40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}, B=1.4; V_{\max}$ 发布值小于 $40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}, B=1.0, z_0=0.005 \text{ m}$,模拟台风玛莉亚(1808)全过程 V_{\max} ,采用参数取值试验之外的 5 个浮标站进行模拟风场检验。由图 6 可知,7 月 5 日 20:00 台风玛莉亚(1808) V_{\max} 达到 $33 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,7 月 6 日 02:00 开始,

V_{\max} 超过 $40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,7 月 9 日 08:00 台风中心位于 $(133.6^{\circ}\text{E}, 21.8^{\circ}\text{N})$ 且达到最强, V_{\max} 为 $56 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,模拟值为 $55 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。之后台风逐渐西移,强度有所减弱,7 月 10 日 23:00—7 月 11 日 08:00, V_{\max} 发布值均为 $45 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}, B=1.4$ 时模拟值约为 $46 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,即最强风速区的 V_{\max} 模拟值接近发布值, $B=1.0$ 时 V_{\max} 模拟值约为 $40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,明显小于发布值。期间 5 个浮标站均在台风大风圈内,表 6 为各浮标站逐时观测风速和 $B=1.0$ 时的模拟风速。7

月 11 日 01:00 至 07:00, 由 $B=1.0$ 时的模拟风场可知, 台风中心几乎穿过 6 号、7 号浮标站, 2 个站的风速观测值均能显示出台风中心经过前后风速的 M 型变化特征, 尽管模拟的浮标站风速最大值出现在台风中心经过的时刻, 但未能模拟出风速的 M 型

变化特征, 模拟风速最大值略大于对应时刻观测风速, 台风中心经过前后的风速模拟值与观测值比较接近。位于台风路径北侧且距离较远的 3 号和 4 号浮标站及位于台风路径南侧的 9 号浮标站风速模拟值与观测值比较接近。

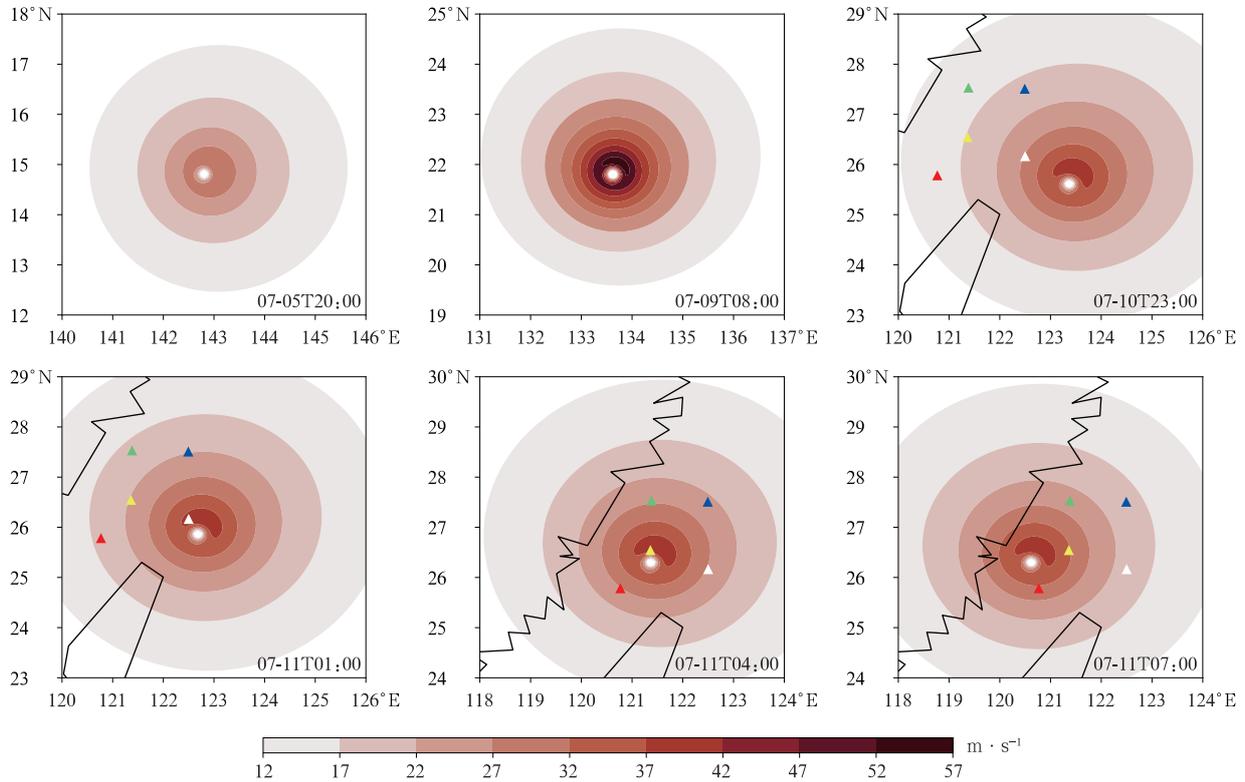


图 6 2018 年 7 月 5—11 日台风玛莉亚(1808)不同时刻模拟风场
(蓝、绿、黄、白、红色三角分别代表 3 号、4 号、6 号、7 号和 9 号浮标站)

Fig. 6 Simulation diagram of wind field at different times of Typhoon Maria(1808) on 5—11 Jul 2018
(blue, green, yellow, white and red triangles represent buoy station 3, 4, 6, 7 and 9, respectively)

表 6 2018 年 7 月 10 日 23:00—11 日 09:00 台风玛莉亚(1808)影响期间
参数取值试验之外的浮标站风速观测值及模拟值

Table 6 Observed and simulated wind speed of buoy stations test during the influence period
of Typhoon Maria(1808) from 2300 BT 10 Jul 2018 to 0900 BT 11 Jul 2018

时间	浮标站站号标识	观测风速/($m \cdot s^{-1}$)	模拟风速/($m \cdot s^{-1}$)
2018-07-10T23:00	3 号	20.7	18.3
	4 号	16.2	14.7
	6 号	19.5	17.0
	7 号	29.0	26.9
	9 号	15.7	14.6
2018-07-11T00:00	3 号	22.3	20.3
	4 号	17.4	16.3
	6 号	19.9	19.1
	7 号	32.4	32.0
	9 号	12.5	15.9

续表 6

时间	浮标站站号标识	观测风速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	模拟风速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
2018-07-11T01:00	3号	22.9	21.9
	4号	17.9	18.3
	6号	23.6	22.3
	7号	27.6	38.5
	9号	17.4	18.0
2018-07-11T02:00	3号	20.6	24.4
	4号	19.1	21.3
	6号	30.6	27.0
	7号	26.3	37.0
	9号	19.2	20.1
2018-07-11T03:00	3号	25.4	25.5
	4号	20.9	24.7
	6号	32.7	33.7
	7号	36.7	33.7
	9号	24.1	22.2
2018-07-11T04:00	3号	24.2	23.1
	4号	27.8	26.2
	6号	27.5	39.8
	7号	34.9	27.0
	9号	27.1	26.7
2018-07-11T05:00	3号	21.8	20.6
	4号	26.7	25.5
	6号	30.0	38.5
	7号	26.6	22.9
	9号	28.8	30.3
2018-07-11T06:00	3号	19.2	19.5
	4号	23.1	24.9
	6号	35.7	35.3
	7号	20.6	21.3
	9号	30.1	31.2
2018-07-11T07:00	3号	18.9	18.5
	4号	21.8	24.0
	6号	29.5	32.1
	7号	18.8	19.8
	9号	30.7	31.3
2018-07-11T08:00	3号	16.1	17.4
	4号	15.5	23.3
	6号	22.9	28.0
	7号	18.2	17.8
	9号	25.5	28.3
2018-07-11T09:00	3号	16.4	13.9
	4号	15.4	18.9
	6号	19.3	21.3
	7号		14.0
	9号	21.9	22.7

此外对西行进入南海的台风尤特(1311)、台风威马逊(1409)、台风山竹(1822)、台风海马(1622)4个台风,登陆台湾岛进入台湾海峡的台风纳沙(1709),进入东湖北上的台风苏力(1819)、台风玲玲(1913)2个台风,进入东海在浙江登陆的台风利奇马(1909)、台风黑格比(2004)2个台风进行模拟,这

些台风过程 V_{\max} 模拟值与发布值基本一致,且每个台风分别有 1~2 个浮标站位于其大风范围内,非最强风速区浮标站模拟风速与观测风速比较接近(图略)。

以上 19 个台风过程的模拟检验表明:基于 YM 模型,利用方案 4 的 R_{\max} , V_{\max} 发布值低于 $40 \text{ m} \cdot$

s^{-1} 时,采用 $B=1.0, z_0=0.005\text{ m}$ 模拟的台风风场最强区的 V_{\max} 接近于发布值,非最强风速区的模拟风速与浮标站观测风速拟合较好。 V_{\max} 发布值不低于 $40\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,采用 $B=1.4, z_0=0.005\text{ m}$ 模拟的最强风速区 V_{\max} 模拟值与发布值拟合更好,非最强风速区的模拟风速在 $B=1.0, z_0=0.005\text{ m}$ 时更合理。在长年代台风风场重建时将根据台风强度使用不同的参数取值。

5 结论和讨论

本文选用 YM 台风风场模型,对影响风场模拟的 R_{\max}, B 和 z_0 3 个参数进行组合和估算,验证 YM 模型以及 3 个参数估算方案的适用性。基于该风场模型和参数估算方案,可重建 1951—2020 年西北太平洋历史台风风场,主要结论如下:

1) 根据 JTWC 数据集 9790 条台风路径样本的 R_{\max} 与 V_{\max} 、中心气压、台风所处纬度、月份和海温进行组合、筛选,采用 6 个浮标观测的 5 个台风影响期间观测风速和模拟风速进行对比,表明 V_{\max} 和台风所处纬度的组合方案对应的 R_{\max} 更合理。

2) 基于历史台风最大风速重建的需要,规定 B 和 z_0 取值应同时满足的两条规则:① 站点模拟最大风速与观测最大风速的偏差绝对值最小,② V_{\max} 模拟值与发布值的偏差绝对值不超过 $5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。计算 6 个台风过程中 10 站次浮标站模拟最大风速与观测最大风速的偏差绝对值,得到浮标站在 $z_0=0.005\text{ m}, B=1.0$ 时符合规则。

3) 使用参数取值试验之外的 9 个台风过程,利用 $B=1.0, z_0=0.005\text{ m}$ 进行 V_{\max} 模拟试验,结果表明 V_{\max} 发布值低于 $40\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, V_{\max} 模拟值与发布值拟合很好; V_{\max} 的发布值不低于 $40\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,取 $B=1.4, z_0=0.005\text{ m}$ 更合理。

4) 利用 V_{\max} 和纬度组合方案对应的 $R_{\max}, B=1.0$ (或 1.4), $z_0=0.005\text{ m}$ 模拟超强台风玛莉亚 (1808) 影响期间的每小时风场,以参数取值试验之外 5 个浮标站观测风速进行验证。4 种台风路径的 9 个台风风场模拟均表现出相同的参数取值规律。说明 YM 台风风场模型和本文所得参数方案可较好模拟台风风场非对称性,适合西北太平洋历史台风风场重建。

本文经过多层比选确定 YM 台风风场模型参数 R_{\max}, B 和 z_0 的合理组合,但在历史台风风场重建过程中可能遇到各种情况,其他参数组合也可试

用。除这些参数外,尚有其他影响风场模拟效果的因素未考虑,因此该模型存在一定局限性,有待在重建历史台风风场时对特殊问题进行研究,并对比每个台风过程的 V_{\max} 模拟值与发布值,较大偏差单独处理,进而优化模型关键参数取值。

参考文献

- [1] 蔡则怡,徐良炎,徐元太. 我国热带气旋灾害的分析研究. 大气科学, 1994, 18(增刊 D): 826-836.
Cai Z Y, Xu L Y, Xu Y T. A study on the tropical cyclone disasters in China. *Chinese J Atmos Sci*, 1994, 18(Suppl D): 826-836.
- [2] 高拴柱,张胜军,吕心艳,等. 南海台风生成前 48 h 环流特征及热力与动力条件. 应用气象学报, 2021, 32(3): 272-288.
Gao S Z, Zhang S J, Lü X Y, et al. Circulation characteristics and thermal and dynamic conditions 48 hours before typhoon formation in South China Sea. *J Appl Meteor Sci*, 2021, 32(3): 272-288.
- [3] 刘东海,宋丽莉,李国平,等. 强台风“黑格比”实测海上风电机组极端风况特征参数分析和讨论. 热带气象学报, 2011, 27(3): 317-326.
Liu D H, Song L L, Li G P, et al. Analysis of the extreme loads on offshore wind turbines by strong Typhoon Hagupit. *J Trop Meteor*, 2011, 27(3): 317-326.
- [4] 严嘉明,赵兵科,张帅,等. 边界层风廓线雷达对登陆台风观测适用性评估. 应用气象学报, 2021, 20(3): 332-346.
Yan J M, Zhao B K, Zhang S, et al. Observation analysis and application evaluation of wind profile radar to diagnosing the boundary layer of landing typhoon. *J Appl Meteor Sci*, 2021, 32(3): 332-346.
- [5] 施丽娟,许小峰,李柏,等. 雷达资料在登陆台风“桑美”数值模拟中的应用. 应用气象学报, 2009, 20(3): 257-266.
Shi L J, Xu X F, Li B, et al. Application of Doppler radar data to the landfalling Typhoon Saomai simulation. *J Appl Meteor Sci*, 2009, 20(3): 257-266.
- [6] 潘裕山. 东亚区域再分析资料在西北太平洋热带气旋模拟中的应用研究. 湛江: 广东海洋大学, 2020.
Pan Y S. Application Research of East Asian Regional Reanalysis to Tropical Cyclone Simulation in the North Pacific. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2020.
- [7] 张容焱,徐宗焕,游立军,等. 福建热带气旋风雨空间分布特征及风险评估. 应用气象学报, 2012, 23(6): 672-682.
Zhang R Y, Xu Z H, You L J, et al. Wind and rainfall features and risk assessment of tropical cyclone in Fujian. *J Appl Meteor Sci*, 2012, 23(6): 672-682.
- [8] 陈燕,张宁. 江苏沿海近地层风阵性及台风对其影响. 应用气象学报, 2019, 30(2): 177-190.
Chen Y, Zhang N. The wind turbulence of the near-surface layer of Jiangsu coastal area and its response to typhoon. *J Appl Meteor Sci*, 2019, 32(2): 177-190.
- [9] 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.

- Chen L S. The evolution on research and operational forecasting techniques of tropical cyclones. *J Appl Meteor Sci*, 2006, 17(6):672-681.
- [10] Shapiro L J. The asymmetric boundary layer flow under a translating hurricane. *J Atmos*, 1983, 40(8):1984-1998.
- [11] Cardone V J, Greenwood C V, Greenwood J A, et al. Unified Program for the Specification of Hurricane Boundary Layer Winds over Surfaces of Specified Roughness. Washington DC: US Army Corps of Engineers, 1992:12-35.
- [12] Meng Y, Matsui M, Hibi K. An analytical model for simulation of the wind field in a typhoon boundary layer. *J Wind Eng Ind Aerod*, 1995, 56(2/3):291-310.
- [13] 郭云霞, 侯一筠, 齐鹏. Monte-Carlo 模拟与经验路径模型预测台风极值风速的对比. *海洋学报*, 2020, 42(7):64-77.
- Guo Y X, Hou Y J, Qi P. Comparison of extreme wind speeds predicted by Monte-Carlo simulation and empirical track model. *Acta Oceanol Sinica*, 2020, 42(7):64-77.
- [14] 赵林, 葛耀君, 项海帆. 台风风场随机参数敏感性分析. *同济大学学报(自然科学版)*, 2005, 33(6):727-731.
- Zhao L, Ge Y J, Xiang H F. Stochastic parameter sensitivity analysis of typhoon wind field. *J Tongji Univ(Nat Sci Ed)*, 2005, 33(6):727-731.
- [15] 谢汝强, 吴韬, 王艳华. 台风风场模型适应性研究. *合肥学院学报(自然科学版)*, 2014, 24(2):84-88.
- Xie R Q, Wu T, Wang Y H. Adaptability research on typhoon wind-field model. *J Hefei Univ(Nat Sci Ed)*, 2014, 24(2):84-88.
- [16] 陈联寿, 丁一汇. 西太平洋台风概论. 北京: 科学出版社, 1979.
- Chen L S, Ding Y H. Introduction to Typhoons in the Western Pacific. Beijing: Science Press, 1979.
- [17] 雷小途, 陈联寿. 热带气旋风场模型构造及特征参数估算. *地球物理学报*, 2005, 48(1):25-31.
- Lei X T, Chen L S. A method to construct tropical cyclone wind distribution models and estimate its characteristic parameters. *Chinese J Geophys*, 2005, 48(1):25-31.
- [18] Vickery P J, Wadhera D. Statistical models of Holland pressure profile parameter and radius to maximum winds of hurricanes from flight-level pressure and H*Wind Data. *J Appl Meteorol Climatol*, 2008, 47(10):2497-2517.
- [19] Fang G S, Zhao L, Cao S Y, et al. A novel analytical model for wind field simulation under typhoon boundary layer considering multi-field correlation and height-dependency. *J Wind Eng Ind Aerod*, 2018, 175:77-89.
- [20] 江志辉, 华锋, 曲平. 一个新的热带气旋参数调整方案. *海洋科学进展*, 2008, 26(1):1-7.
- Jiang Z H, Hua F, Qu P. A new scheme for adjusting the tropical cyclone parameters. *Adv Mar Sci*, 2008, 26(1):1-7.
- [21] 李瑞龙. 基于改进的台风关键参数的台风极值风速预测. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
- Li R L. Prediction of Typhoon Extreme Wind Speeds Based on Improved Typhoon Key Parameters. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007.
- [22] 胡邦辉, 谭言科, 王举. 热带气旋海面最大风速半径的计算. *应用气象学报*, 2004, 15(4):427-435.
- Hu B H, Tan Y K, Wang J. Calculation of maximum wind velocity radius of tropical cyclone on sea surface. *J Appl Meteor Sci*, 2004, 15(4):427-435.
- [23] 陈德文, 董剑, 袁方超. 基于 QuickSCAT 卫星遥感风场的台风最大风速半径反演及个例分析. *海洋通报*, 2012, 31(4):376-383.
- Chen D W, Dong J, Yuan F C. Retrieving the radius of maximum wind of typhoon from QuickSCAT wind fields and case analysis. *Mar Sci Bull*, 2012, 31(4):376-383.
- [24] Powell M, Soukup G, Cocke S, et al. State of Florida hurricane loss projection model: Atmospheric science component. *J Wind Eng Ind Aerod*, 2005, 93(8):651-674.
- [25] Jakobsen F, Madsen H. Comparison and further development of parametric tropical cyclone models for storm surge modeling. *J Wind Eng Ind Aerod*, 2004, 92(5):375-391.
- [26] Hubbert G D, Holland G J, Leslie L M, et al. A real-time system for forecasting tropical cyclone storm surges. *Wea Forecasting*, 1991, 6(1):86-97.
- [27] Xiao Y F, Duan Z D, Xiao Y Q, et al. Typhoon wind hazard analysis for southeast China coastal regions. *Struct Saf*, 2011, 33(4/5):286-295.
- [28] Guo Y X, Hou Y J, Qi P. Analysis of typhoon wind hazard in Shenzhen City by Monte-Carlo simulation. *J Oceanol Limnol*, 2019, 37(6):1994-2013.
- [29] Zeng Z H, Wang Y Q, Duan Y H, et al. On sea surface roughness parameterization and its effect on tropical cyclone structure and intensity. *Adv Atmos Sci*, 2010, 27(2):337-355.
- [30] 闫俊岳, 黄爱芬. 黄海西部海洋工程风、浪设计参数的分析和计算. *应用气象学报*, 1990, 1(3):317-323.
- Yan J Y, Huang A F. Analysis and calculation of extreme wind speed and wave height for the design of marine engineering. *J Appl Meteor Sci*, 1990, 1(3):317-323.
- [31] 张容焱, 张秀芝, 蔡连娃. 沿海风工程设计风速中泊松-耿贝尔法的应用. *应用气象学报*, 2010, 21(2):237-242.
- Zhang R Y, Zhang X Z, Cai L W. Application of poisson-gumbel distribution to wind speed calculation for the southeast coastland of China. *J Appl Meteor Sci*, 2010, 21(2):237-242.
- [32] 闫俊岳, 陈乾金, 张秀芝, 等. 中国近海气候. 北京: 科学出版社, 1993.
- Yan J Y, Chen Q J, Zhang X Z, et al. Offshore Climate of China. Beijing: Science Press, 1993.
- [33] 赵永平, 张必成, 陈永利, 等. 不同时距平均风速换算关系的研究. *海岸工程*, 1988, 7(3):62-66.
- Zhao Y P, Zhang B C, Chen Y L, et al. The conversion coefficients between the average wind velocity in the different periods. *Coast Eng*, 1988, 7(3):62-66.

Sensitive Experiments on Reconstruction Model of Historical Typhoon Wind Field in the Northwest Pacific Ocean

Kong Lisha Zhang Xiuzhi

(National Climate Center, Beijing 100081)

Abstract

In order to reconstruct the historical typhoon wind field in the Northwest Pacific Ocean and calculate the maximum wind speed in 50 years of the Northwest Pacific Ocean, Yan Meng wind field model is used to simulate the wind field. There are 3 important parameters for wind field simulation in Yan Meng wind field model: The radius of maximum wind, pressure distribution constant B , and roughness z_0 . Therefore, it is necessary to test and reasonably optimize the value of the three parameters by measured data of the buoy stations during the typhoon in the Northwest Pacific Ocean.

First, based on the JTWC (Joint Typhoon Warning Center) dataset, the relationship between the radius of maximum wind and its impact factors is discussed and four combinations scheme of calculating the radius of maximum wind are proposed, and then the best combination scheme is selected through the measured data. Second, the values of B and z_0 are estimated with the observed wind speed of buoy stations during different typhoons. Finally, the simulation effect of the typhoon wind field at sea is evaluated with 19 typhoon processes, and the applicability of the model and estimation scheme of three parameters are verified.

The results show that it is more reasonable to find the radius of maximum wind by combination scheme of V_{\max} (the maximum wind speed of typhoon center) and the latitude of typhoon. In the parameter value test, the wind speed simulation effect of sea surface (buoy stations) is better given z_0 being 0.005 m and B being 1.0, according to the absolute deviation between the simulated and the measured maximum wind speed at 10 buoy stations during 6 typhoons. Except for the parameter test, 19 other typhoon processes landing in northern Fujian and Zhejiang, heading north to the East China Sea, moving west to the South China Sea, and crossing Taiwan Island into the Taiwan Strait are selected to test the simulation effect, which illustrates that when the V_{\max} published by Central Meteorological Observatory is below $40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, the simulated V_{\max} is close to the published V_{\max} if B is equal to 1.0 and z_0 is equal to 0.005 m, and the simulated wind speed in the non-maximum wind speed region is well fitted with the observed wind speed of the buoy stations. In addition, When V_{\max} published is greater than or equal to $40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, the simulated V_{\max} is close to the published V_{\max} if B is equal to 1.4 and z_0 is equal to 0.005 m, and the simulated wind speed of non-maximum wind speed region is more reasonable when B is equal to 1.0 and z_0 is equal to 0.005 m.

Key words: typhoon; wind field model; sensitive experiments; simulation verification