

近 31 年中国近海潮位潮流数据库的建立及极值分析

赵建春^{1,2}, 赵生校^{1,2}, 赵朝志^{1,2}, 张 哲³, 时 健^{3*}, 童朝锋³

(1. 浙江省深远海风电技术研究重点实验室, 浙江 杭州 311122;

2. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311122;

3. 河海大学 港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098)

摘 要:基于 CFSR、CFSv2 再分析风场数据和 Jelesnianski 经验风场建立混合风场, 利用 TELEMAC2D 平面二维潮流模型对中国沿海进行了 31 a(1989—2019 年)数值计算, 将模型计算一般潮位过程和风暴潮过程与实测资料进行对比, 结果显示潮汐潮流模拟值与实测值吻合较好。中国沿海不同重现期高潮位在东海和南海北部较高, 由于风暴潮作用, 越靠近海岸高潮位越高。高潮位极值较大区域主要分布在东海沿岸, 尤其是台湾海峡较高, 另外北部湾的高潮位极值也较大; 低潮位较低区域也主要分布在东海沿岸, 台湾海峡及北部湾低潮位较低。流速极值较大区域主要分布在黄海近岸、台湾海峡、琼州海峡和北部湾湾口。

关键词:TELEMAC2D; 潮波模拟; 潮汐潮流数据库; 极值潮位潮流

中图分类号:P731.22

文献标志码:A

文章编号:1002-3682(2021)03-0165-13

doi:10.3969/j.issn.1002-3682.2021.03.001

引用格式:ZHAO J C, ZHAO S X, ZHAO C Z, et al. Database construction and extreme value analysis of tide level and tidal current in the coastal waters of China in the last 31 years[J]. Coastal Engineering, 2021, 40(3): 165-177.

赵建春, 赵生校, 赵朝志, 等. 近 31 年中国近海潮位潮流数据库的建立及极值分析[J]. 海岸工程, 2021, 40(3): 165-177.

在全面推进能源生产和消费革命, 构建清洁低碳、安全高效的能源体系的政策背景下, 我国的海上风电事业发展迅速, 海上风电场工程建设前期对潮位、潮流等海洋水文环境动力参数精细化评估成果的需求也呈现出逐步扩大趋势。潮位极值通常可以由观测数据加以分析得到^[1-3], 然而我国沿海的已建长期潮位站空间分布相对稀疏且一般分布在近岸区域, 海上风电建设区域的潮汐潮流长时间资料数据往往比较匮乏。虽然基于历史遥感资料和数值模拟手段是获取海洋水文历史资料的有效手段, 但由于遥感资料能够提供的水文资料种类有限(无法提供连续资料), 因此基于数值模拟进行历史水文资料的模拟, 并据此建立潮汐潮流数据库是十分必要的。Chiri 等^[4]以比斯开湾为例, 采用 ROMS 数值模型方法, 建立了 29 a(1985—2013 年)高精度的逐时潮位和潮流数据库; Fernández-Montblanc 等^[5]采用 SCHISM 数值模型, 计算了全欧洲近 40 a(1979—2018 年)的高精度风暴潮潮位数据。我国海洋科学工作者也对中国沿海海域的潮汐潮流特征作了大量研究和分析^[6-11]。庄圆^[12]计算了潮位潮位与余水位相互独立和潮位与余水位相关两种不同情况的极值水位, 通过对比得出联合概率法能够比极值法更充分地利用水位观测资料, 建立的风暴潮模型模拟了

收稿日期:2021-05-17

资助项目:国家重点研发项目——大型海上风电机组及关键部件优化设计及批量化制造、安装调试与运行关键技术—机组及部件智能运输、现场批量安装调试运行工艺技术和检测装备及技术验证(2018YFB1501305); 中央高校业务费——珊瑚礁海岸波浪破碎过程的非静压模拟研究(B200202064); 华东勘测设计研究院科技项目——深远海风电场勘测设计施工关键技术研究 and 示范应用(KY2018-ZD-03); 华东勘测设计研究院科技项目——大型海上风电机组及部件自适应运输调度决策平台模块开发及 10 万千瓦海上风电场设计研究(KY2020-XNY-01-06)

作者简介:赵建春(1985—), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事涉海工程海洋水文和海洋能开发利用方面研究. E-mail: zhao_jc2@ecidi.com

* **通信作者:**时 健(1987—), 男, 副教授, 博士, 主要从事波浪模拟方面研究. E-mail: jianshi@hhu.edu.cn

(王佳实 编辑)

1997—2017 年间对舟山附近海域影响较大的 21 场台风过程,利用耿贝尔分布计算了该区域多年一遇的极值水位和极值增水;卞建云^[13]采用 ADCIRC 风暴潮模型对 1997—2016 年共 42 场台风进行了计算,利用泊松—广义极值分布对江苏近海 20、50、100 和 200 a 的风暴潮增水极值进行了推算。根据前人研究,目前覆盖整个中国海域的潮位和潮流数极值研究仍然较少。因此,本研究利用平面二维潮流模型 TELEMAC2D 建立了中国沿近海的潮汐潮流数据库,利用实测资料对天文潮潮位和风暴潮潮位及潮流充分验证,并进一步分析了 1989—2019 年的潮位潮流极值分布情况。研究成果可为我国的海洋工程建设提供一定的参考。

1 台风混合风场的建立和验证

1.1 背景风场

CFSR(Climae Forecast System Reanalysis)资料是由美国环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)于 2010 年发布的全球性、高分辨率再分析资料,包含全球 1979 年 1 月至 2011 年 3 月逐时风速资料,数据空间分辨率为 0.312° 。2011 年 4 月以后美国环境预报中心的第二代气候预报系统(NCEP CFSv2)提高了风场空间分辨率,为 0.204° 。

1.2 Jelesnianski 台风风场经验计算公式

Jelesnianski 气压场模型^[14]为

$$\frac{P(r) - P_0}{P_\infty - P_0} = \begin{cases} \frac{1}{4} \left(\frac{r}{R} \right)^3 & 0 \leq r < R \\ 1 - \frac{3}{4} \left(\frac{R}{r} \right) & R \leq r < \infty \end{cases}, \quad (1)$$

式中: P_∞ 和 P_0 分别为台风外围气压和中心气压, r 为计算点到台风中心的距离, $P(r)$ 为模型风场气压随计算点到台风中心距离变化而变化的值, R 为台风最大风速半径。

梯度风速(W_1)计算公式为

$$W_1 = \sqrt{\frac{f^2 r^2}{4} + \frac{r}{\rho_a} \cdot \frac{\partial P(r)}{\partial r}} - \frac{fr}{2}, \quad (2)$$

式中: f 为科氏力参数, ρ_a 为空气密度, r 为计算点到台风中心的距离。

采用 Jelesnianski 公式获得热带气旋移行风场:

$$\vec{W}_2 = \begin{cases} \frac{r}{r+R} \begin{bmatrix} v_{cx} \\ v_{cy} \end{bmatrix} & 0 \leq r < R \\ \frac{R}{r+R} \begin{bmatrix} v_{cx} \\ v_{cy} \end{bmatrix} & R \leq r < \infty \end{cases}, \quad (3)$$

式中: $\vec{W}_2$ 为台风移行风场; v_{cx} 和 v_{cy} 分别为台风移行风场 x 和 y 两个方向的分量。

梯度风场与移行风场合成,可以得到台风风场:

$$\vec{W} = c_1 W_1 \begin{bmatrix} -\sin(\theta + \beta) \\ \cos(\theta + \beta) \end{bmatrix} + c_2 \vec{W}_2, \quad (4)$$

式中: $\vec{W}$ 为合成风场; θ 为计算点与台风中心的连线与 x 轴的夹角; β 为梯度风与海面风的夹角(流入角),统一取为 25° ; c_1 和 c_2 为订正系数。

1.3 混合风场叠加方法

在台风中心附近,经验模型可较好地反映台风大风区的风场特征,但一般仅限于几百公里的范围;在台

风外围,由于同时受到台风和其他天气系统的影响,风场一般与经验模型差别较大。为了改善风场模型的准确度,需要采用合适的方法将经验风场与再分析风场进行叠加。叠加方法一般有指数系数叠加法、优化半径叠加法、直接修正方法和最大风速半径叠加法。实际风场合成中发现,指数系数叠加法合成范围依赖 n 的取值,当最大风速半径较大时,合成区域过大,过渡带风速小于再分析风场,造成风速的不连续。优化半径叠加法难以准确确定优化半径。而直接修正法需要确定再分析风场的台风中心,这在合成过程中也难以确定。因此,本研究采用一个与最大风速半径相关的风场合成方法:

$$V_C = (1 - e)V_M + eV_Q, \quad (5)$$

$$e = \frac{1 + \tanh\left(\frac{r - R/0.23}{50\,000}\right)}{2}, \quad (6)$$

式中: V_C 为合成风场; V_M 为经验模型风场; V_Q 为背景风场(即再分析风场); e 为权重系数。

1.4 混合风场验证结果

为验证混合风场计算精度,将台风混合风场计算的台风风速、CFSR 再分析的风速、峙仔岛和滨海测风塔的风速数据进行了对比,测站位置如图 1 所示。

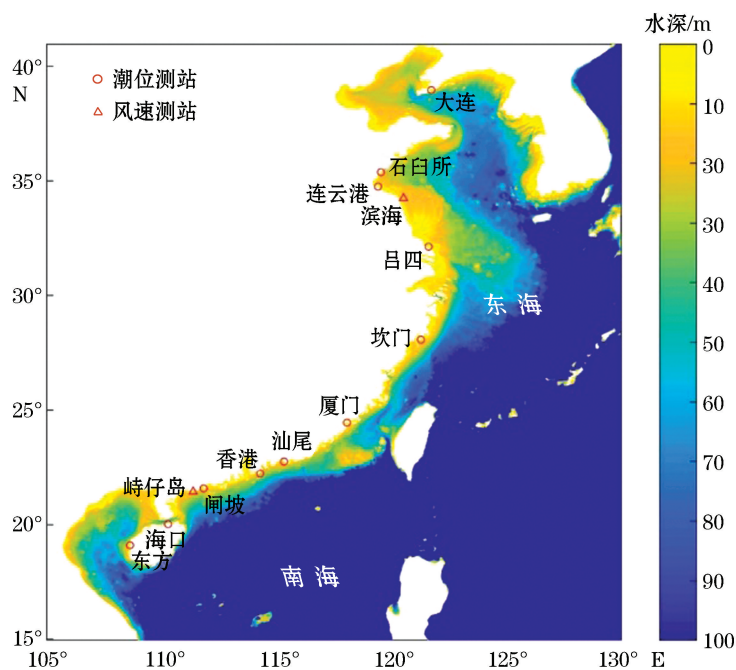


图 1 潮位和风速测站位置图

Fig.1 Location of the stations for the observations of tide level and wind speed

图 2 和图 3 分别为 2008 年 14 号台风黑格比和 2012 年 10 号达维台风期间的混合风速、CFSR 风速与实测风速对比图。结果显示,CFSR 再分析风场难以准确计算台风引起的风速急剧增大,存在台风期间风速偏小的情况,采用 Jelesnianski 台风风场经验公式计算得到的混合风场可以明显提高台风风速计算精度。

为了进一步量化 CFSR 再分析风速、混合风场计算风速和实测风速的差异,采用平均偏差、相对偏差、标准差这 3 个统计参数来定量分析不同风速的误差(表 1),计算公式如下:

$$MD = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{1i} - x_{2i}), \quad (7)$$

$$RMD = \frac{MD}{x} \times 100\%, \tag{8}$$

$$RSME = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{1i} - x_{2i})^2}, \tag{9}$$

式中:MD 为平均偏差,RMD 为相对偏差,RSME 为均方差,n 为数据点的数量, x_{1i} 为模型计算值, x_{2i} 为测站实测值。

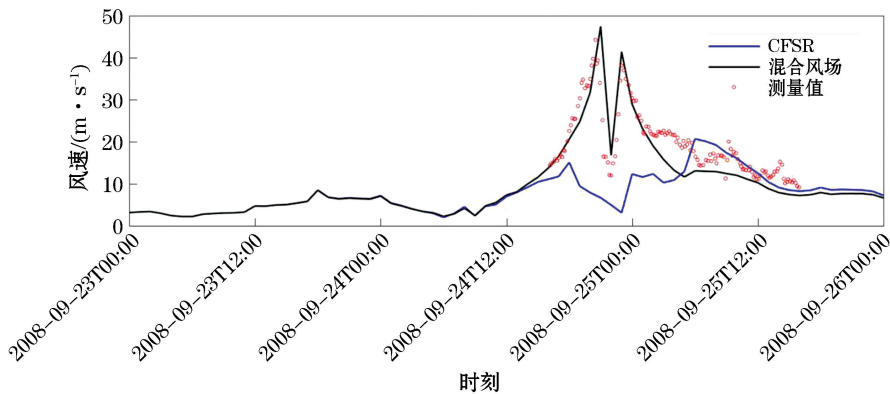


图 2 峙仔岛测站 2008 年 9 月 0814 号台风黑格比风速对比

Fig.2 Comparison of the wind speeds of Typhoon Hagupit (No. 0814) at the Zhizaidao station in September 2008

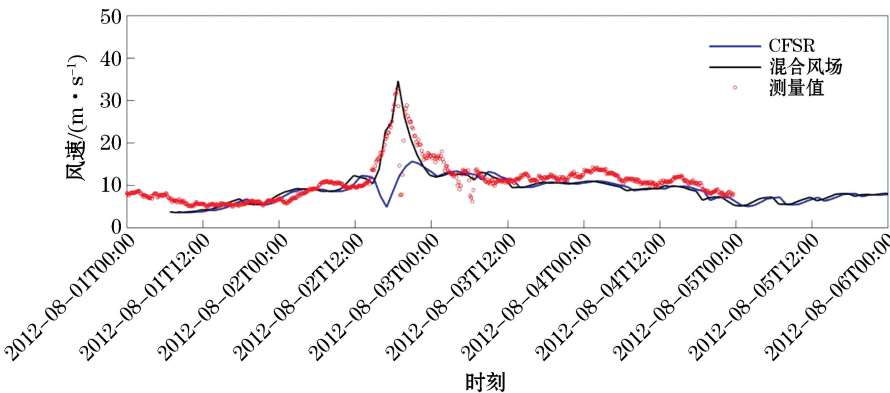


图 3 滨海测站 2012 年 8 月 1210 号达维台风风速对比

Fig.3 Comparison of the wind speeds of Typhoon Damrey (No. 1210) at the Binhai station in August 2012

表 1 误差统计参数表

Table 1 Statistical parameters of the error between calculated and observed wind speeds

台风算例	风场模型	平均偏差/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	相对偏差/%	标准差
黑格比	CFSR	-14.54	59.83	14.95
	Jelesnianski	-0.22	-1.31	4.09
达维	CFSR	-1.54	-13.99	4.42
	Jelesnianski	-0.87	-7.90	2.35

由表 1 可见,CFSR 再分析风速在台风期间误差较大,台风黑格比期间相对偏差近 60%,而 Jelesnianski 模型计算出的风速与实测风速值的误差最小,台风黑格比期间相对偏差仅为 -1.31%,台风达维期间相对偏

差为-7.9%,说明台风混合风场可以显著提高台风期间风速精度。

2 潮汐计算

2.1 模型建立

TELEMAC2D 模型是法国国家水力学与环境实验室(National Hydraulic and Environment Laboratory)开发的开源的河流、河口和海岸的二维水力学模型系统。模型基本方程如下:

①连续方程为

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial [(h + \zeta)u]}{\partial x} + \frac{\partial [(h + \zeta)v]}{\partial y} = 0; \quad (10)$$

②动量方程为

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - fv = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{\tau_x}{\rho(h + \zeta)} - \\ \frac{1}{\rho(h + \zeta)} \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right) - \frac{1}{\rho(h + \zeta)} \left(\frac{\partial R_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial R_{xy}}{\partial y} \right) + N_x \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right), \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + fu = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{\tau_y}{\rho(h + \zeta)} - \\ \frac{1}{\rho(h + \zeta)} \left(\frac{\partial S_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right) - \frac{1}{\rho(h + \zeta)} \left(\frac{\partial R_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial R_{yy}}{\partial y} \right) + N_y \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right). \end{aligned} \quad (12)$$

式(10)~(12)中: x 和 y 分为直角坐标系坐标; u 和 v 分别为 x 和 y 方向的流速分量; g 为重力加速度; ρ 为海水密度; N_x 、 N_y 分别为 x 、 y 方向的水平涡动粘性系数; t 为时间; f 为柯氏参数; ζ 为相对 xy 平面的水面起伏; h 为静水深; S_{xx} 、 S_{xy} 、 S_{yx} 和 S_{yy} 为辐射应力张量的4个分量; R_{xx} 、 R_{xy} 、 R_{yx} 和 R_{yy} 为波浪破碎产生的切应力; τ_x 和 τ_y 分别为波浪、潮流共同作用下的底部剪切应力矢量 $\vec{\tau}$ ($|\vec{\tau}| = \sqrt{\tau_x^2 + \tau_y^2}$)沿 x 、 y 方向的分量。

平面二维潮流模型网格示意图如图4所示,模型采用经纬度坐标系,共850101个网格单元和432516个节点。模型最大网格间距约 0.5° ,中国近岸研究区域网格较密,间隔约 0.01° 。共设置3条开边界:第1条为南面开边界,设置在印度尼西亚卡里马塔海峡;第2条设置在日本—菲律宾—印度尼西亚海域;第3条为北面开边界,设置在对马海峡和朝鲜海峡。

2.2 模型验证

2.2.1 天文潮验证

对中国近海长期潮位站的 M_2 和 K_1 分潮调和常数做了验证,验证点位置见图1, M_2 和 K_1 调和常数验证结果如表2所示,分潮振幅基本在 $[-10, 10]$ cm以内,分潮迟角基本在 $[-10, 10]^\circ$ 以内,模型验证结果良好。此外,还对福建平潭实测潮位和潮流数据(L1~L6)进行

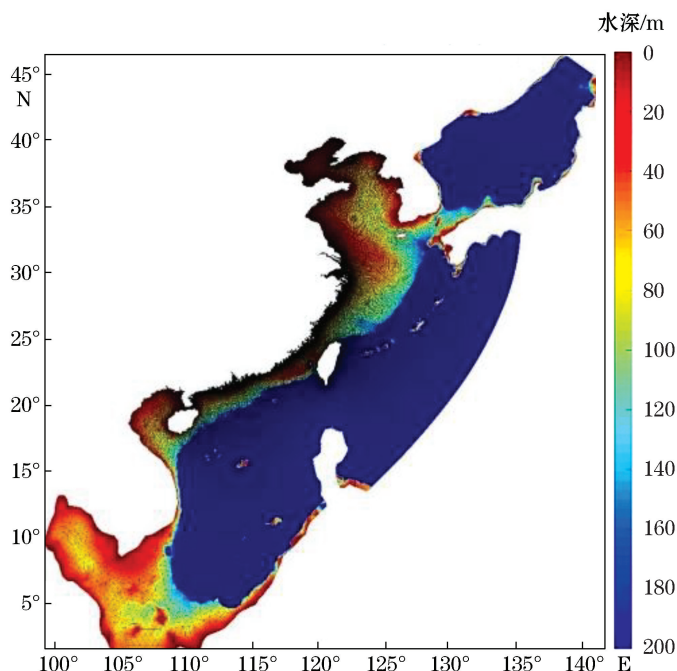


图4 模型计算区域和网格图

Fig.4 The domain and grids for the model computation

了验证(图 5 和图 6),验证结果显示模型能够较好地预测涨落潮流速流向,最大潮流误差为 0.06 m/s(表 3)。

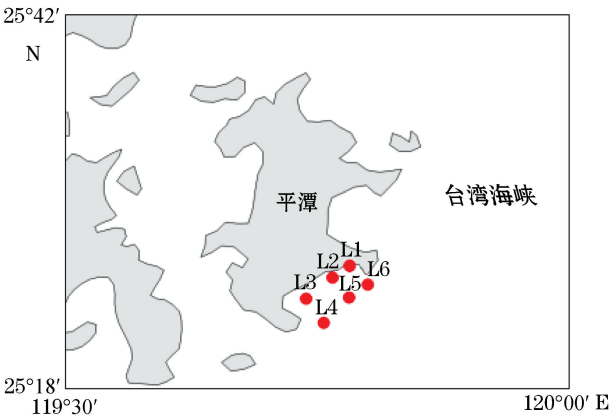


图 5 2016 年 7 月流速测站分布

Fig.5 Distribution of the stations for the observations of tidal current velocity in July 2016

表 2 中国近海模型 M₂ 和 K₁ 调和常数验证

Table 2 Verifications of harmonic constants of models M₂ and K₁ in the coastal waters of China

点 号	站 名	位 置	M ₂						K ₁					
			振幅/cm			迟角/(°)			振幅/cm			迟角/(°)		
			实测	计算	相差	实测	计算	相差	实测	计算	相差	实测	计算	相差
1	大连	121°40′26″E, 38°57′36″N	93	106	13	56	47	−9	21	24	3	221	221	0
2	石臼所	119°55′00″E, 35°22′48″N	150	156	6	290	292	2	31	26	−5	222	230	7
3	连云港	119°25′12″E, 34°45′00″N	172	182	10	308	306	−2	34	28	−6	229	236	7
4	吕四	121°37′12″E, 32°07′48″N	174	169	−5	120	130	10	19	20	2	10	17	7
5	坎门	121°17′24″E, 28°42′00″N	189	201	12	21	29	8	25	28	3	81	77	−4
6	厦门	118°42′00″E, 24°27′00″N	186	195	9	121	130	9	28	25	−3	142	134	−8
7	汕尾	115°19′48″E, 22°45′00″N	29	32	3	29	25	−3	42	38	−4	176	165	−11
8	香港	114°17′24″E, 22°13′48″N	42	43	1	6	11	5	29	40	11	159	149	−10
9	闸坡	111°49′48″E, 21°34′48″N	68	76	8	58	59	1	53	48	−5	176	173	−3
10	海口	110°16′48″E, 20°01′12″N	29	40	11	23	27	4	53	53	0	326	322	−4
11	东方	108°37′12″E, 19°06′00″N	22	29	8	190	192	3	71	61	−10	298	292	−6

表 3 平潭半潮平均流速误差参数(m·s^{−1})

Table 3 Statistical parameters of the error between simulated and observed mean current velocities of half tide at the Pingtan station (m·s^{−1})

测 站	涨 潮			落 潮		
	实测	计算	误差	实测	计算	误差
L2	0.31	0.28	−0.03	0.27	0.26	−0.01
L3	0.16	0.20	0.04	0.28	0.22	−0.06
L4	0.64	0.58	−0.06	0.53	0.54	0.01
L5	0.3	0.35	0.05	0.39	0.42	0.03
L6	0.56	0.52	−0.04	0.43	0.45	0.02

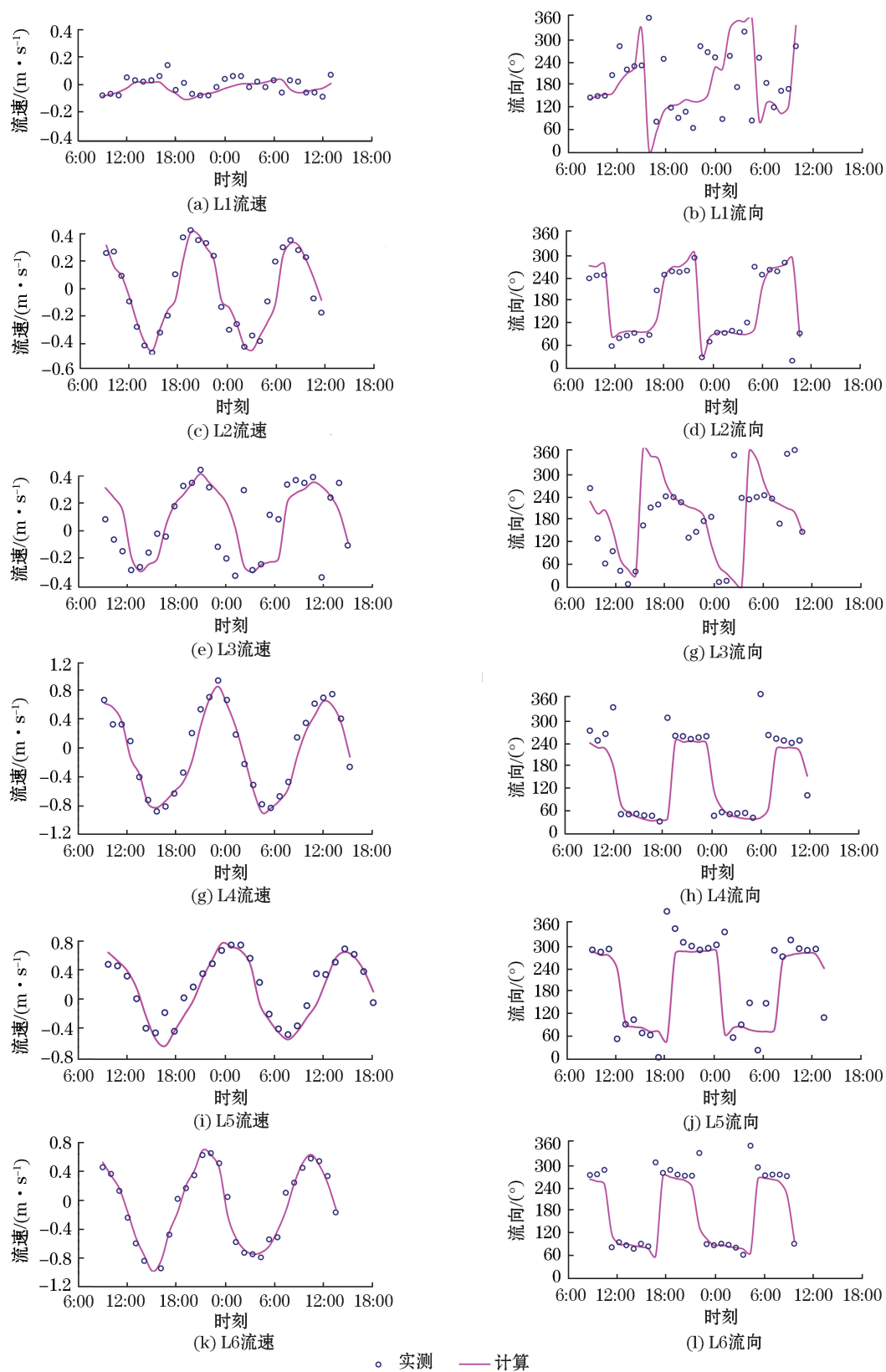


图6 2016年7月流速流向验证

Fig.6 Validation of tidal current velocity and direction in July 2016

2.2.2 风暴潮验证

对盐田和惠州在“0915”和“1319”台风影响下的风暴潮位进行了验证,测站位置见图 7。图 8 和图 9 分别为 2 次台风过程的风暴潮位验证,图中水位为相当于 1985 高程的水位值。结果显示,高低潮位误差在 18 cm 以内,验证结果相对较好(表 4)。



图 7 潮位验证点位置

Fig.7 Location of the stations for tidal level validation

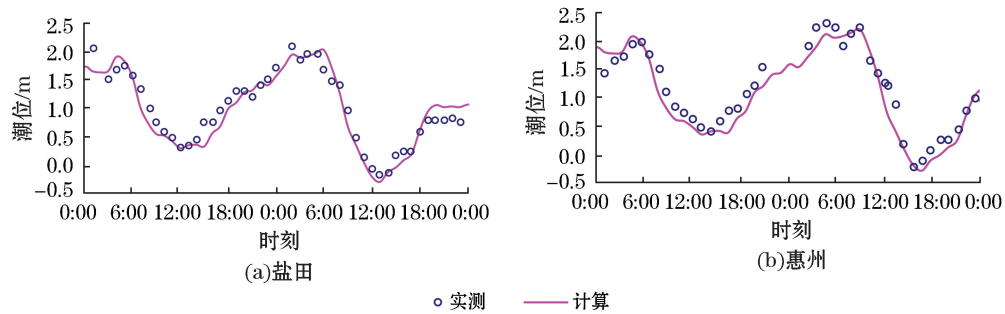


图 8 “0915”台风期间潮位过程对比

Fig.8 Comparison of the tidal level processes during Typhoon No. 0915

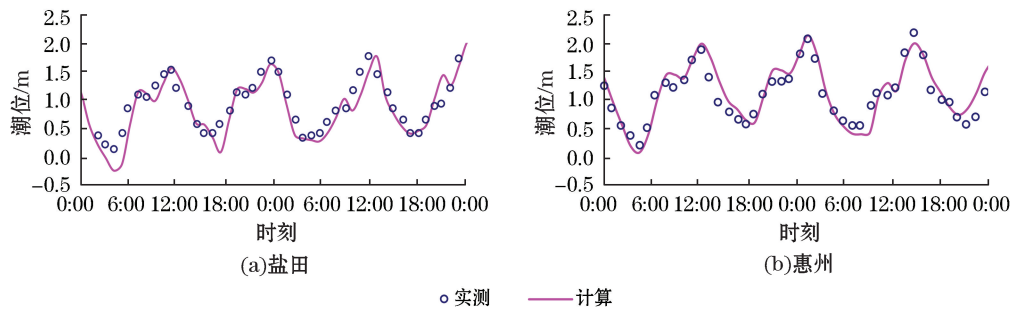


图 9 “1319”台风期间潮位过程对比

Fig.9 Comparison of the tidal level processes during Typhoon No. 1319

表 4 “0915”和“1319”台风风暴潮高潮位误差参数(m)

Table 4 Statistical parameters of the error between simulated and observed high tide levels of the storm surges during Typhoon No. 0915 and No. 1319 (m)

站 点	“0915”台风			“1319”台风		
	实测	计算	误差	实测	计算	误差
盐田	2.11	2.04	−0.07	2.22	2.06	−0.16
惠州	2.13	2.03	−0.10	2.67	2.49	−0.18

3 潮位及潮流极值分布

利用 TELEMAC2D 模型研究了中国沿海 1989—2019 年期间的逐时潮位、潮流过程。基于各地平均海平面计算得到潮位及潮流结果,提取每年的最高、最低潮位和最大流速,采用耿贝尔分布法对极值数据进行分析。

3.1 高潮位极值分布

图 10 为中国沿海高潮位重现期分布,中国沿海不同重现期高潮位极值主要分布在东海和南海北部,越靠近海岸高潮位越高。2 a 一遇高潮位,浙江、福建近海多在 2~3 m,南海远海区域略大于 1 m,广东、广西近海在 1.5 m 左右,台湾海峡区域为 3~4 m,江苏辐射沙洲区域略大于 3 m。100 a 一遇高潮位,浙江、福建近海在 3~4 m,南海远海区域在 1~2 m,台湾海峡和北部湾顶部局部超过 4 m,江苏辐射沙洲区域约为 3.5 m,渤海老黄河口、秦皇岛、黄海山东半岛及中部海域则相对较低。

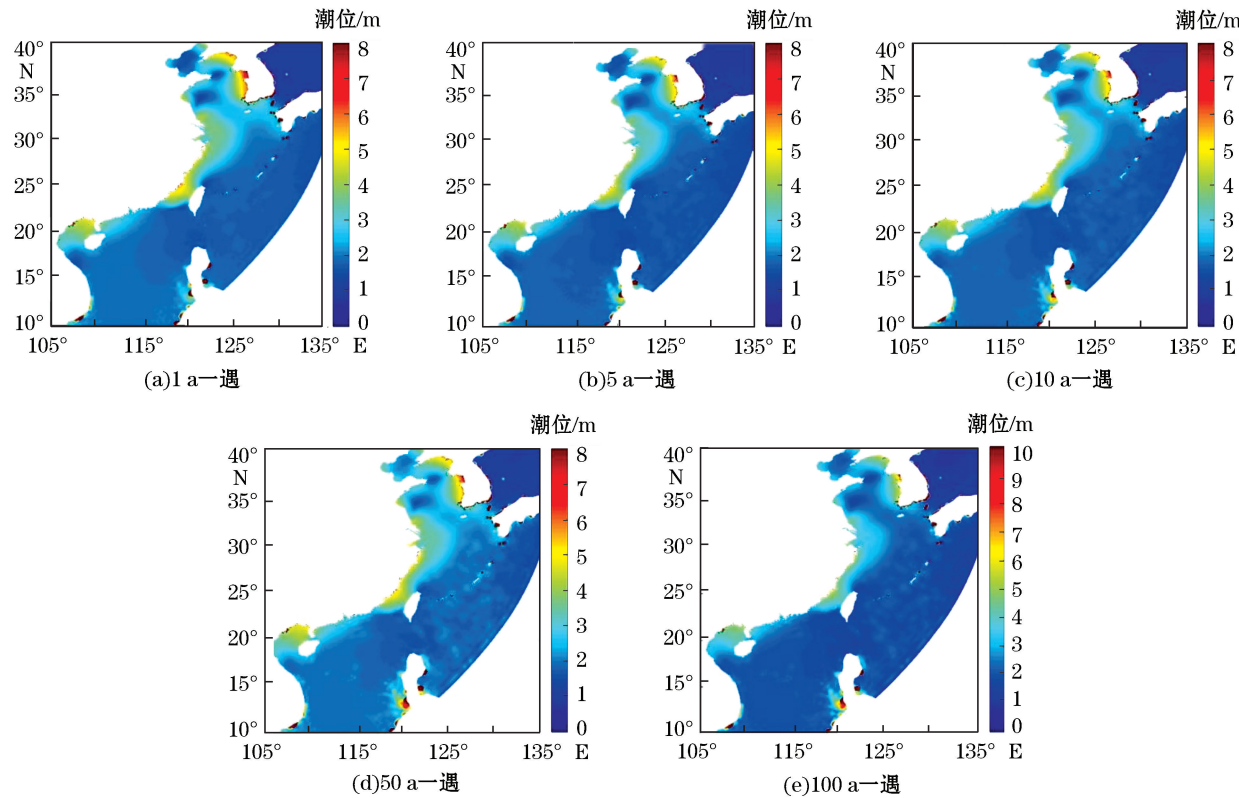


图 10 中国沿海不同重现期高潮位分布

Fig.10 Distributions of the high tide levels with different recurrence periods in the coastal waters of China

3.2 低潮位极值分布

图 11 为中国沿海低潮位重现期分布,中国沿海不同重现期低潮位极值主要分布在东海和南海北部。2 a 一遇低潮位,浙江、福建近海区域多在 -2.8 m 左右,台湾海峡约 -4 m,浙江、福建近海区域约 -3.1 m,台湾海峡区域约 -4.5 m,渤海老黄河口、秦皇岛、黄海山东半岛及中部海域则相对较高。

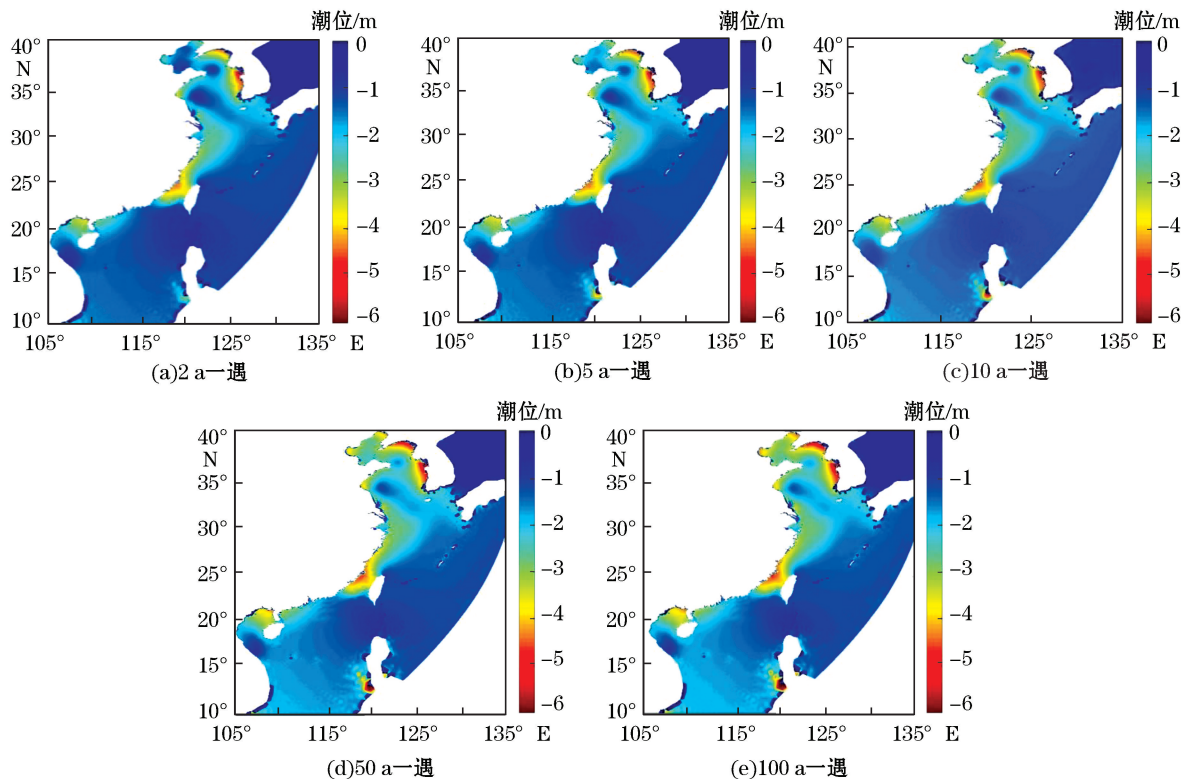


图 11 中国沿海不同重现期低潮位分布

Fig.11 Distributions of the low tide levels with different recurrence periods in the coastal waters of China

3.3 潮流流速极值分布

图 12 为中国沿海不同重现期流速大小,流速极值主要分布在潮差较大或水深较浅的区域。2 a 一遇流速,黄海近岸海域多在 1.2 m/s 左右,浙江沿海多在 1.0 m/s 以下,台湾海峡南侧台湾浅滩海域局部可达 2.5 m/s,南海区域多在 1.0 m/s 以下,北部湾口和琼州海峡流速则相对较大。100 a 一遇流速,黄海近岸海域多在 1.5 m/s 左右,浙江沿海多在 $1.0 \sim 2.0$ m/s,台湾海峡南侧台湾浅滩海域局部可达 3.0 m/s 以上,南海近岸海域一般可达 $1 \sim 2$ m/s,北部湾口和琼州海峡流速亦相对较大。

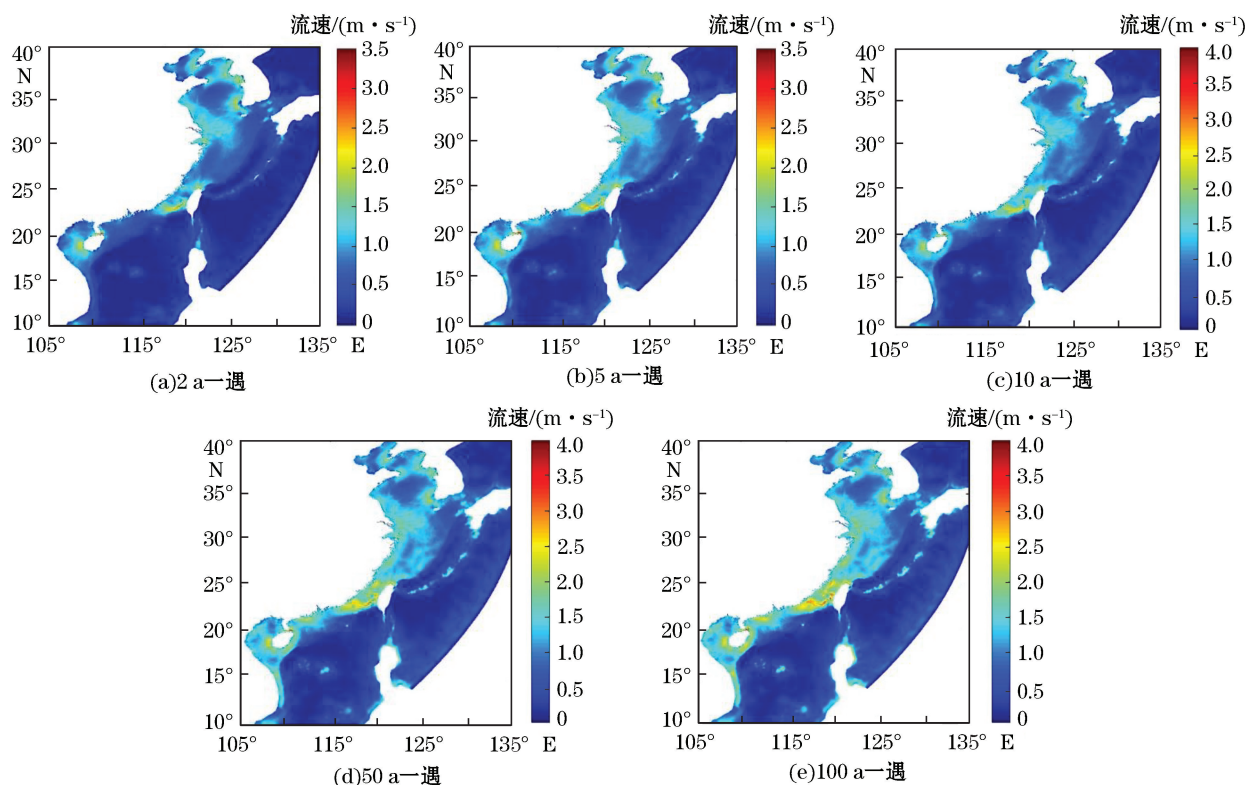


图 12 中国沿海不同重现期流速分布

Fig.12 Distributions of the tidal current velocities with different recurrence periods in the coastal waters of China

4 结 语

采用 TELEMAC2D 模型,在基于 CFSR 和 CFSv2 再分析风场数据及经验风场建立混合风场的基础上,计算了中国近海 1989—2019 年的水位和流速数据,建立了中国近海高精度长时间序列的潮汐数据库。模型计算结果和实测值的误差分析显示,分潮振幅误差在 $[-10, 10]$ cm 以内,分潮迟角在 $[-10, 10]^\circ$ 以内,最大潮流误差为 0.06 m/s,模型验证结果良好。

通过模型计算建立的潮汐潮流数据库,推求得到了中国近海不同重现期的高低潮位和流速极值。结果表明,中国沿海不同重现期高潮位在东海和南海北部较高,由于风暴潮作用,越靠近海岸高潮位越高,高潮位极值较大区域主要分布在东海沿岸,尤其是台湾海峡较高,另外北部湾的高潮位极值也较大;低潮位较低区域也主要分布在东海沿岸,台湾海峡及北部湾低潮位较低。流速极值较大区域主要分布在黄海近岸、台湾海峡、琼州海峡和北部湾湾口。

本研究可用于中国沿海海岸工程设计水位和流速值的确定,为海岸风险评估和防灾减灾提供基础水文信息。

参考文献(References):

- [1] HAIGH I D, WADEY M P, WAHL T, et al. Spatial and temporal analysis of extreme sea level and storm surge events around the coastline of the UK[J]. Scientific Data, 2016, 3(1): 1-14.
- [2] MENÉNDEZ M, WOODWORTH P L. Changes in extreme high water levels based on a quasi-global tide-gauge data set[J/OL]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2010, 115(C1001): p15.

- [3] TSIMPLIS M N, BLACKMAN D. Extreme sea-level distribution and return periods in the Aegean and Ionian Seas[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1997, 44(1): 79-89.
- [4] CHIRI H, CID A, ABASCAL A J, et al. A high-resolution hindcast of sea level and 3D currents for marine renewable energy applications: a case study in the Bay of Biscay[J]. *Renewable Energy*, 2019, 134: 783-795.
- [5] FERNÁNDEZ-MONTBLANC T, VOUSDOKAS M I, MENTASCHI L, et al. A Pan-European high resolution storm surge hindcast [J]. *Environment international*, 2020, 135: 105367.
- [6] WANG K, FENG S Z. A 3-D numerical simulation of M_2 tides and tidal currents in the Bohai Sea, the Huanghai Sea and the East China Sea[J]. *Haiyang Xuebao*, 1999, 21(4): 1-13. 王凯, 冯士. 渤海, 黄海, 东海 M_2 潮汐潮流的三维数值模拟[J]. *海洋学报*, 1999, 21(4): 1-13.
- [7] FANG G H, CAO D M, HUANG Q Z. Numerical simulation of tidal current in the South China Sea[J]. *Haiyang Xuebao*, 1994, 16(4): 1-12. 方国洪, 曹德明, 黄企洲. 南海潮汐潮流的数值模拟[J]. *海洋学报*, 1994, 16(4): 1-12.
- [8] WU H, GU J, ZHU P. Winter counter-wind transport in the inner southwestern Yellow Sea[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2018, 123(1): 411-436.
- [9] XUAN J, YANG Z, HUANG D, et al. Tidal residual current and its role in the mean flow on the Changjiang Bank[J]. *Journal of Marine Systems*, 2016, 154: 66-81.
- [10] ZHONG L, LI M, FOREMAN M G G. Resonance and sea level variability in Chesapeake Bay[J]. *Continental Shelf Research*, 2008, 28(18): 2565-2573.
- [11] HOLLEMAN R C, STACEY M T. Coupling of sea level rise, tidal amplification, and inundation[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2014, 44(5): 1439-1455.
- [12] ZHUANG Y. Research on the algorithm of return period water level and its spatial distribution in the coastal area of China[D]. Zhoushan: Zhejiang Ocean University. 庄圆. 中国沿海重现期水位算法研究及空间分布[D]. 舟山: 浙江海洋大学, 2020.
- [13] BIAN J Y. Numerical simulation and statistical analysis of typhoon storm surge along Jiangsu Province[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2019. 卞建云. 江苏沿海台风风暴潮数值模拟与增水极值分析[D]. 扬州: 扬州大学, 2019.
- [14] JELESNIANSKI C P. Numerical computation of storm surge induced by a tropical storm impinging on a continental shelf[J]. *Monthly Weather Review*, 1965, 93(16): 343-358.

Database Construction and Extreme Value Analysis of Tide Level and Tidal Current in the Coastal Waters of China in the Last 31 Years

ZHAO Jian-chun^{1,2}, ZHAO Sheng-xiao^{1,2}, ZHAO Chao-zhi^{1,2},
ZHANG Zhe³, SHI Jian³, TONG Chao-feng³

(1. *Key Laboratory of Far-shore Wind Power Technology of Zhejiang Province*, Hangzhou 311122, China;

2. *Power China Huadong Engineering Corporation Limited*, Hangzhou 311122, China;

3. *College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University*, Nanjing 210098, China)

Abstract: A mixed wind field is established based on the wind field data reanalyzed using CFSR and CFSv2 and the empirical wind field of Jelesnianski, and the data collected from the coastal waters of China in the last 31 years (from 1989 to 2019) are calculated numerically by using a plane two-dimensional tidal current model TELEMAC2D. The general tide level processes and the storm surge processes calculated by the model are compared with the measured data, showing a good agreement. The high values of the high tide levels with different recurrence periods occur mostly in the East China Sea and the northern South China Sea. And due to the action of storm surge, the closer to the coast, the higher the tide level. The high extreme values of the high tide level are mostly distributed in the coastal waters of the East China Sea, especially in the Taiwan Strait as well as in the Beibu Gulf of the South China Sea. Also in these areas, the values of the low tide level are mostly lower. The high extreme values of the tidal current velocity are mostly distributed in the coastal waters of the Yellow Sea as well as in the Taiwan Strait, the Qiongzhou Strait and the mouth of the Beibu Gulf.

Key words: TELEMAC2D; tide simulation; tide level and current database; extreme of tide level and tidal current velocity

Received: May 17, 2021