doi:10.3969/j.issn.1003-2029.2019.04.013

考虑溢流条件下的核电厂址风暴潮模拟与研究

杨万康,杨青莹,张 峰,宋泽坤
(自然资源部第二海洋研究所,浙江 杭州 310012)

摘 要:基于 ADCIRC 建立了三门湾风暴潮模型,模型模拟结果与实测数据吻合较好。以可能最大热带气旋参数为基础构建了多种假想台风路径来计算三门核电厂址处的可能最大风暴潮增水。结果表明,NW 向登陆且距离核电厂址左侧为 R(最大风速半径)时的假想台风使得三门核电厂址处的增水达到最大,风暴潮增水最大值为 4.58 m。将可能最大风暴潮增水叠加天文高潮位进行计算,厂址前沿处水位达到了 7.75 m,而三门湾顶附近的最高水位已经达到 9 m,超出了三门湾沿岸海堤高程。将三门湾沿岸陆地依照高程概化为计算区域进行漫堤计算,当天文高潮位叠加可能最大风暴潮水位时,三门湾沿岸会发生漫堤溢流现象,淹没范围最严重的区域出现在湾顶处,最大淹没面积达到了 120 km^2。此时厂址前沿最高潮位为 7.25 m,与不溢流相比下降了 0.50 m。本研究可为三门核电厂址的安全防护提供科学依据。

关键词:三门核电厂;假想路径;可能最大风暴潮增水;溢流
中图分类号:P753 **文献标志码**:A **文章编号**:1003-2029(2019)04-0079-06

三门湾地处浙江中部, 受台风灾害影响严重,近年来三门湾内建设了大量的围垦工程,岸线和水深地形有了显著改变,水动力特征和纳潮量相应的也发生了变化[1-3]。三门核电厂位于三门湾中部的猫头山附近,面临的主要海洋灾害为台风引起的风暴潮,核安全导则中规定滨海核电厂址需要评估极端洪水位来保证厂址的安全性。因此随着三门湾内水动力条件的改变,重新评估三门核电厂址处的极端洪水位具有重要的现实意义。

针对风暴潮极端灾害许多学者已经进行了大量研究。黄世昌等[4]对浙江沿海超强台风作用下的极端水位进行了数值计算,为海岸工程防护提供了依据。齐江辉等[5]以 7303 号台风为基础,通过设置多条虚拟台风路径,计算得到徐大堡核电站厂址的最大风暴增水情况。尹庆江等[6]利用风暴潮数值模式计算了镇海可能最大风暴潮增水(*PMSS*)。许多学者将海洋数值模型结果与地理信息系统 GIS 技术相结合,开展沿海地区的风暴潮风险灾害评估[7-9]。在极端情况下风暴潮水位叠加天文高潮位后会超越沿岸的海塘高程,出现严重的漫滩现象,淹没周边的城镇[10-11]。

之前对核电厂址极端洪水位的研究中很少考虑到溢流的影响。事实上在极端情况下,风暴潮水位叠加天文高潮位后会超越沿岸的海塘高程,出现严重的漫堤溢流现象。因此本研究首先基于 ADCIRC 数学模型建立三门湾最新岸线条件下的风暴潮模型,然后通过设置多种假想台风移动路径叠来推算三门核电厂址处的可能最大风暴潮水位,并分析叠加天文高潮位后漫堤溢流对厂址水位的降低响应,为三门核电厂址的防护提供更加准确的科学依据。

1 数学模型介绍

1.1 风暴潮模型

本文采用的数学模型为 ADCIRC 海洋模型

收稿日期:2018-09-26
基金项目:浙江省自然科学基金青年基金资助项目(LQ16D060007)
作者简介:杨万康(1987-),男,博士,工程师,主要从事近岸水动力数值模拟研究工作。E-mail:yangwankang@126.com

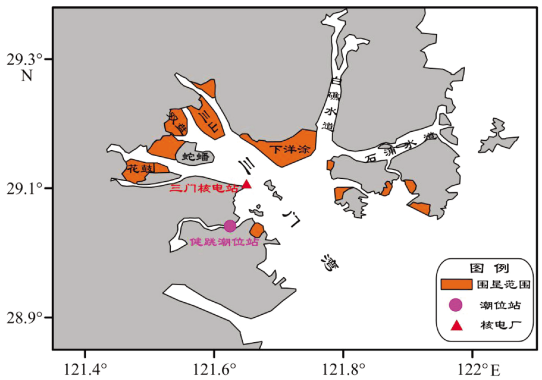

图 1 三门湾地理位置示意图

(Advanced Circulation Model)。ADCIRC 是一种非结构网格的有限元水文动力模式。非结构网格可以保证在水深变化剧烈、岸线复杂的地方有较高的分辨率,而在地形变化缓慢的地方分辨率则可以相对低一些,这样既可以满足计算的要求,又可以节省计算时间。该模式还具有计算效率高,计算稳定的特点,在国内外得到了广泛的应用[12-13]。

由于二维模型已经可以较好的模拟风暴潮特征,因此本文采用 ADCIRC 二维模型进行研究。在笛卡尔直角坐标系下,ADCIRC 模型采用沿水深积分的二维连续方程和动量方程如下:

$$\frac{\partial H}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}(UH)+\frac{\partial}{\partial y}(VH)=0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial U}{\partial t}+U\frac{\partial}{\partial x}U+V\frac{\partial}{\partial y}U-fV=-g\frac{\partial[\zeta+P_s/g\rho_0]}{\partial x}+\frac{\tau_{sx}-\tau_{bx}}{H\rho_0}-\frac{D_x}{H} \tag{2}$$

$$\frac{\partial V}{\partial t}+U\frac{\partial}{\partial x}V+V\frac{\partial}{\partial y}V+fU=-g\frac{\partial[\zeta+P_s/g\rho_0]}{\partial y}+\frac{\tau_{sy}-\tau_{by}}{H\rho_0}-\frac{D_y}{H} \tag{3}$$

式中:H 为总水深;ζ 为偏离平均海面的水位值;U 和 V 分别为 x 和 y 方向沿水深积分的平均流速;g 为重力加速度;ρ_0 为密度;f 为科氏力参数;P_s 为大气压强;τ_{sx} 和 τ_{sy} 分别为 x 和 y 方向上的风应力;τ_{bx} 和 τ_{by} 分别为 x 和 y 方向的底摩擦力分量;D_x 和 D_y 为 x 和 y 方向上的动量耗散项。风应力 τ_{sx} 和 τ_{sy} 计算公式如下:

$$\tau_{sx}=\rho_a C_d W_x\sqrt{W_x^2+W_y^2},\ \tau_{sy}=\rho_a C_d W_y\sqrt{W_x^2+W_y^2} \tag{4}$$

式中:ρ_a 为空气密度;W_x 和 W_y 为 x 和 y 方向的风速分量;C_d 为风应力拖拽系数,根据 Garratt (1977) 提出的公式,风应力拖曳系数通过式(5)得到:

$$C_d=0.001\times(0.75+0.067\sqrt{W_x^2+W_y^2}) \tag{5}$$

底摩擦力计算公式采用平均流速的二次方公式,具体如下:

$$\tau_{bx}=\rho_0 C_f U\sqrt{U^2+V^2},\ \tau_{by}=\rho_0 C_f V\sqrt{U^2+V^2} \tag{6}$$

式中:C_f 为底拖曳力系数,$C_f=g/C^2$,其中 C 为谢才系数,具体数值根据模型率定及验证结果确定最优值。

1.2 风场模型

风场模型对风暴潮的计算结果至关重要,本研究采用 Holland[14]提出的台风风场模型,气压方程和风场公式如下所示:

Holland 台风模型气压方程如下所示:

$$P_s(r)=P_c+(P_n-P_c)\cdot(-\frac{R_{\max}}{r})^B \tag{7}$$

根据气压公式和梯度风原理,风速计算公式如下所示:

$$W_g(r)=\sqrt{(P_n-P_c)\frac{B}{\rho_a}(\frac{R_{\max}}{r})^B\exp(-\frac{R_{\max}}{r})^B+(\frac{rf}{2})^2}-\frac{rf}{2} \tag{8}$$

式中:ρ_a 为空气密度;r 表示模型中任意点与台风中心的距离;P_n 为外围参考气压;P_c 为台风中心气压;$R_{\max}$ 为最大风速半径;B 为 Holland 参数,其值决定了风场的轮廓形状。B 的数值越大,$R_{\max}$ 处的最大风速就越大,而远处的风速则越小。其范围一般在 1~2.5,本研究 B 参数计算采用如式(9)[15]:

$$B=1.5+(980-P_c)/120 \tag{9}$$

最大风速半径采用 Willoughby[16]提出的计算公式:

$$R_{\max}=51.6\exp(-0.0223V_{\max}+0.0281\varphi) \tag{10}$$

式中:φ 为地理纬度;$V_{\max}$ 为最大风速;台风中心位置坐标、中心气压值、最大风速等参数选用中国台风网的路径数据集资料[17]。

1.3 模型设置

风暴潮模型计算区域对结果影响较大,计算域较小,则不能表现远海波动的传播,而计算区域过大,则影响计算效率。为了提高风暴潮模型的计算精度兼顾计算效率,本次计算区域包含整个渤海、黄海、东海,在三门湾内对网格进行了加密,网格分辨率最低可达 100 m,然后向外海分辨率逐渐降低,在开边界附近网格分辨率为 10 km 左右,网格划分如图 2 所示。三门湾内水深采用高分辨率的海图数据进行插值,外海水深采用 GEBCO 全球水深数据 (https://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data/),分辨率为 30″×30″,潮位边界采用从 OTIS 数据集提取的潮汐调和常数(http://volkov.oce.orst.edu/tides/),包含了 M_2,S_2,N_2,K_2,K_1,O_1,P_1,

Q_1,M_4 等 9 个分潮，台风风场则基于中国台风网台风路径集的数据代入 Holland 风场模型中计算得到,然后将气压和风速结果插值到对应的模型网格点上。模型采用冷启动,初始水位和初始流场设为 0,浅滩地区采用动边界干湿网格技术,通过设置干湿网格判别值,当网格计算点的水位结果小于该判别值时,就被认为是干网格,该计算点就会停止参与计算,本次计算中,干湿判别值设为 0.04 m。由于三门湾内无径流流入,因此本模型中不考虑径流的影响。

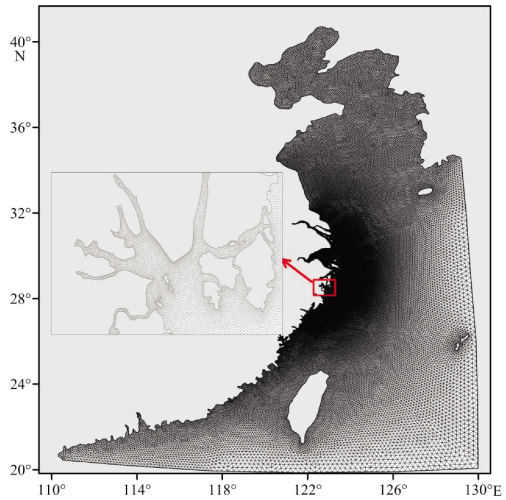

图 2　计算区域与网格划分示意图

2　模型验证

选取历史上对三门湾影响较为严重的 9711 号、0414 号以及 0515 号台风风暴潮过程进行模拟计算,对模型的准确性进行率定。3 个典型台风路径如图 3 所示,由图可知,造成三门湾内严重增水的

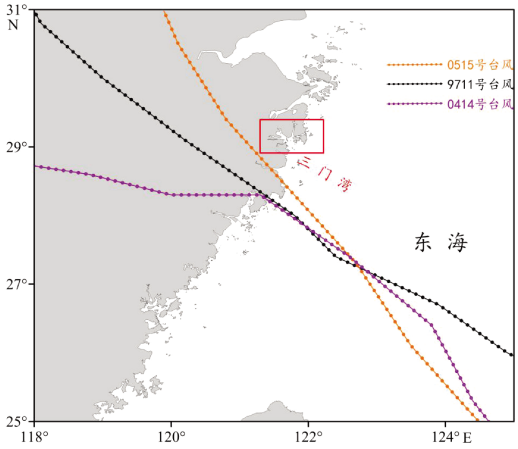

图 3　三门湾内典型强台风路径

路径为西北向登陆台风，登陆地点位于三门湾以南,此时三门湾正好位于台风风场的右半圆,湾口走向与台风路径平行,在强东南风的作用下,外海海水快速涌入三门湾,海水堆积从而抬高水位。

模型结果与三门湾内的健跳潮位站实测结果进行对比如图 4 所示。由图可知,模拟结果与实测增水较为吻合,尤其是峰值水位误差较小,而且风暴潮极值增水出现的时间也比较匹配。总体而言,本模型对 3 个台风个例的风暴潮极值水位模拟较为准确,模型精度能够满足下一步计算的要求。

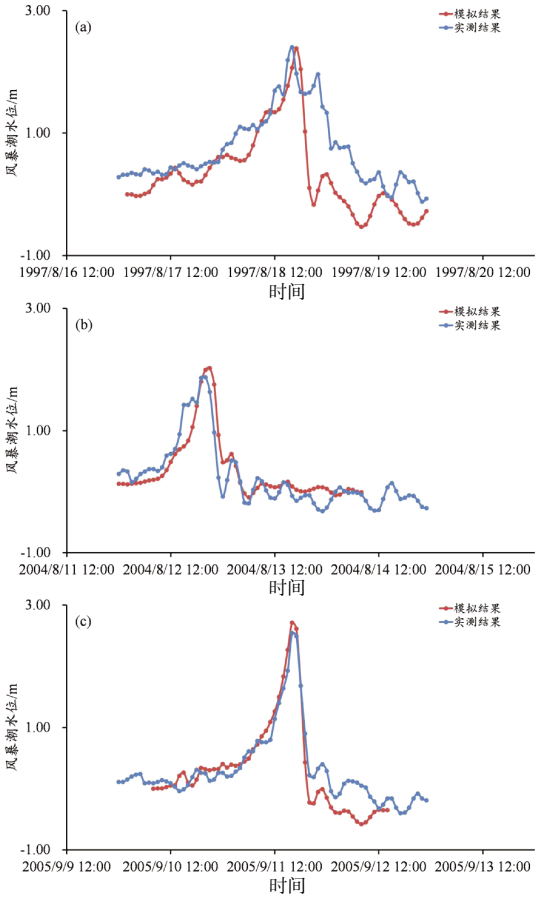

图 4　9711 号、0414 号和 0515 号台风期间健跳站风暴潮实测值与模拟值对比

3　考虑溢流条件下的核电厂址风暴潮水位计算

由于三门核电站的存在,根据核安全导则的要求可能最大风暴潮潮位的计算等级需要能抵御千年一遇,因此首先需要确定三门湾内千年一遇的可能最大热带气旋参数,选取 1949–2018 年进入三门湾 400 km 范围内的台风参数作为统计样本(图 5),

筛选出进入研究半径内台风的年气压最低值然后采用概率论方法进行千年一遇重现期低气压计算，概率论方法采用常见的耿贝尔分布曲线进行推算，最低中心气压根据分布曲线结果取 890 hPa。

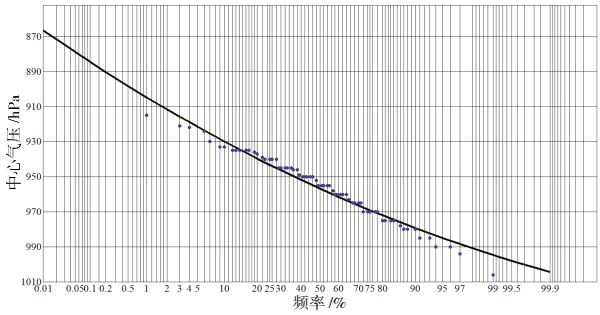

图 5 三门湾低气压年极值耿贝尔分布曲线

关于最大风速半径的计算方法前文中已有所述，但是经验公式是根据多年测风数据拟合而来，并不能包含所有极端情况，尤其是超强台风的情形，因此必须结合实际观测资料进行分析。根据美国在太平洋飞机探空资料可知：中心气压越低，台风强度越大，则最大风速半径越小。本文着重选取了飞机探空资料中强台风中心气压及风速半径的观测结果列于表 1。由表可知：当探空资料中心气压低于 900 hPa 时，风速半径不超过 30 km，因此从保守角度考虑，采用 30 km 作为假想台风最大风速半径。

表 1 台风中心气压与最大风速半径观测资料

年份	1961	1963	1964	1964	1967	1969	1970
P_c/hPa	902	898	894	903	908	891	901
R_{max}/km	43	30	15	9	17	30	30

对进入三门湾 400 km 半径范围内的台风样本移速进行了统计（图 6），根据统计结果得知，台风移速范围在 10~35 km/h 之间，因此选取平均值 25 km/h 作为假想台风移速。

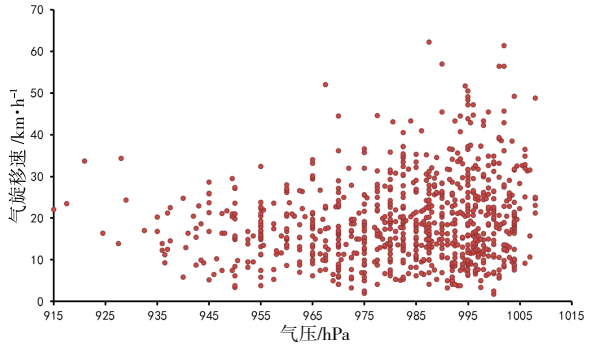

图 6 三门湾区域台风移动速度统计图

根据历史记录，影响三门核电厂址的台风登陆方向集中在北向与西向之间，因此选取 W，WNW，NW，NNW，N 方向作为强台风登陆方向，并且每个方向以核电厂址为中心，距离分别为 2 R，1.5 R，R，0.5 R，0 R，–0.5 R，–R，–1.5 R，–2 R 设置 9 条假想路径，R 为台风最大风速半径，其中正值代表假想路径在厂址的右侧，负值代表路径在厂址的左侧。具体假想台风路径见图 7。

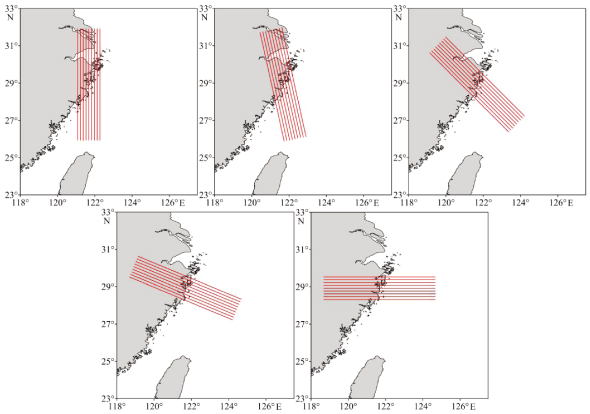

图 7 可能最大风暴潮计算假想台风路径示意图

经过计算，NW 向距离核电厂址左侧为 R 的登陆台风使得三门核电厂址处的可能最大风暴潮增水（*PMSS*）达到最大，增水最大值为 4.58 m。

根据核安全导则要求，需要考虑 *PMSS* 叠加天文潮高潮位的极端风暴潮情况，因此需要进行 10% 超越天文潮高潮位与 *PMSS* 的叠加计算。通过三门湾核电厂址处的实测潮位进行调和分析后，并对未来 19 a 的潮位进行预报，统计得到了 10%超越天文潮位为 3.86 m。

首先只添加风应力，确定最不利路径下假想台风在厂址引起最大增水的时刻，然后调整开边界潮位，使得 10%超越天文潮位在相同时刻出现，进行耦合计算。最终计算结果如图 8 所示，当天文高潮位遭遇可能最大风暴增水时，三门湾海域的水位由湾口向湾内逐步增加，厂址前沿处水位达到了 7.75 m，

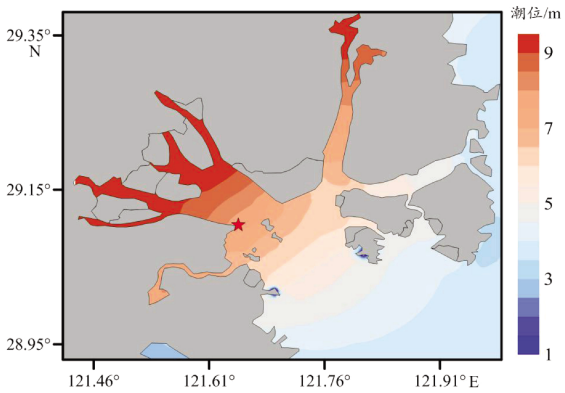

图 8 三门核电厂址极端风暴潮水位分布

而三门湾湾顶附近最高水位已经达到 9 m，已经大大超出了三门湾沿岸海堤高程。

在之前核电厂址设计水位研究中,普遍把沿岸边界当做刚性边界,不考虑漫堤溢流,这与实际有所不符,因此本研究将重点分析漫堤溢流对厂址处风暴潮水位的影响。为了准确模拟漫堤效果,本文采用了 SRTM 陆地高程数据,分辨率为 30 m,然后根据三门县和宁海县堤防现状资料搜集了三门湾各段海堤的设计高程,将以上数据输入耦合模型进行漫堤溢流计算。

经过计算,当天文高潮位叠加 PMSS 水位时,三门湾沿岸就会发生溢流漫堤现象,最大淹没范围如图 9 所示,由于三门湾湾顶处的水位最高,因此淹没范围最严重的区域出现在湾顶处的蛇蟠、双盘三山围垦区,下洋涂的西侧也出现了小范围的溢流漫堤,白礁水道两侧由于地势较低,溢流现象也较为明显。此外,在健跳水道也出现了零星的漫堤溢流过程,三门湾其他区域溢流漫堤现象则不明显。经过统计,最大淹没面积达到了 120 km^2。

图 10 是厂址前沿考虑溢流与无溢流时的潮位过程对比图，当风暴潮水位超过周边堤坝高程时，会发生漫堤溢流过程,淹没低洼浅滩区域,此时厂址前沿最高潮位为 7.25 m，与不溢流相比下降了 0.50 m。由此可见,当考虑溢流过程时风暴潮潮位有所下降,这也更加真实地反映了三门湾内的潮位波动过程。

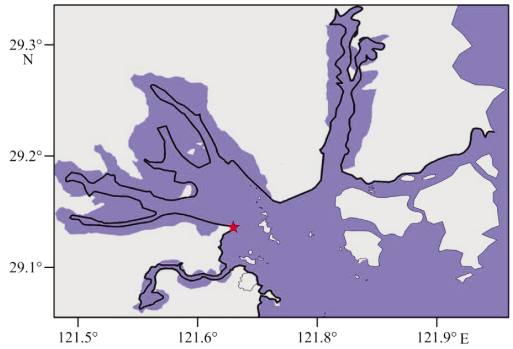

图 9　三门湾最大淹没范围示意图

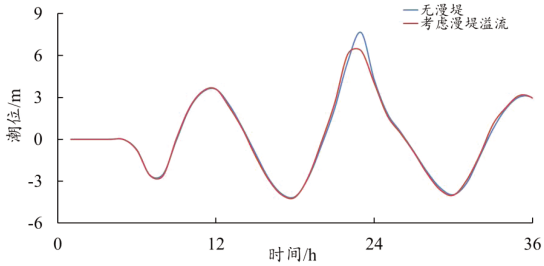

图 10　考虑溢流和未考虑溢流的厂址处风暴潮潮位过程对比

4　结 论

基于 ADCIRC 建立了三门湾风暴潮模型,采用历史上增水较为显著的台风个例对模型进行了率定,保证了模型的准确性,并计算分析了三门核电厂址处的 PMSS 及溢流淹没范围。本文得出主要结论如下:

(1) 以可能最大热带气旋参数为基础构建了多种假想台风路径来计算厂址处的 *PMSS*,结果表明,NW 向登陆且距离核电厂址左侧为 *R* 时的假想台风使得三门核电厂址处的 *PMSS* 达到最大，风暴潮增水最大值为 4.58 m。

(2) 将可能最大风暴潮增水叠加天文高潮位进行计算，三门湾海域的水位由湾口向湾内逐步增加,厂址前沿处水位达到了 7.75 m,而三门湾湾顶附近最高水位已经达到 9 m，已经大大超出了三门湾沿岸海堤高程。

(3) 将三门湾沿岸陆地依照高程概化为计算区域,当天文高潮位叠加 *PMSS* 水位时,三门湾沿岸会发生溢流漫堤现象,淹没范围最严重的区域出现在三门湾湾顶处的蛇蟠,双盘三山围垦区,最大淹没面积达到了 120 km^2。此时厂址前沿最高潮位为 7.25 m,与不溢流相比下降了 0.50 m。考虑了溢流现象之后,计算结果与实际情况更加吻合,可为核电站厂址的安全运行提供重要的科学依据。

参考文献:

[1] 黄潘阳,陈培雄,来向华,等. 三门湾 2003—2013 年间围涂工程对水动力环境的影响研究[J].中国海洋大学学报, 2017, 47(10): 91–98.

[2] 陈晓英,张杰,马毅,等. 近 40 a 来三门湾海岸线时空变化遥感监测与分析[J].海洋科学, 2015, 39(2):43–49.

[3] 宋文杰,禹丝思,陈梅花,等. 近 30 年三门湾海岸线时空变化及人为干扰度分析[J].浙江师范大学学报, 2017, 40(3):343–349.

[4] 黄世昌,李玉成,赵鑫,等.浙江沿海超强台风作用下风暴潮增水数值分析[J].海洋工程,2008, 26(3):58-64.
[5] 齐江辉,郑亚雄,梁双令,等. 葫芦岛核电站可能最大风暴潮(PMSS)数值模拟研究[J].海岸工程, 2018, 37(2):41-49.
[6] 尹庆江,王喜年.镇海可能最大台风增水的计算[J].海洋学报,1995,17(6):21-27.
[7] 于良巨,施平,侯西勇,等.风暴潮灾害风险的精细化评估研究[J].自然灾害学报,2017,1:43-49.
[8] 滕骏华,吴玮,孙美仙,等.基于 GIS 的风暴潮减灾辅助决策信息系统[J].自然灾害学报,2007, 16(2):16-21.
[9] 梁海燕,邹欣庆.海口湾沿岸风暴潮风险评估[J].海洋学报,2005,27(5):22-29.
[10] 吴玮,傅赐福,于福江,等.温州近岸围堤对风暴潮漫滩影响的数值研究[J].海洋学研究,2012,30(2):36-42.
[11] 朱军政,于普兵.钱塘江河口杭州湾风暴潮溢流计算方法研究[J].水科学进展,2009,20(2):269-274.
[12] Bertin X, Oliveira A, Fortunato A B. Simulating morph dynamics with unstructured grids: Description and validation of a modeling system for coastal applications[J]. Ocean Modelling, 2009, 28(1):75-87.
[13] Weisberg R H, Zheng L. Hurricane storm surge simulations for Tampa Bay[J]. Estuaries and Coasts, 2006, 29(6): 899-913.
[14] Holland G J. An analytic model of the wind and pressure profiles in hurricanes[J]. Monthly weather review, 1980, 108(8): 1212-1218.
[15] Hubbert G D, Holland G J, Leslie L M, et al J. A real-time system for forecasting tropical cyclone storm surges [J]. Weather and Forecasting, 1991, 6(1): 86-97.
[16] Willoughby H E, Rahn M E. Parametric representation of the primary Hurricane vortex. Part I: observations and evaluation of the Holland (1980) model[J]. Monthly Weather Review, 2004, 134(4):1102-1120.
[17] Ying M, Zhang W, Yu H, et al. An overview of the China meteorological administration tropical cyclone database [J]. Journal of Atmospheric & Oceanic Technology, 2014, 31(2):287-301.

Simulation of the Storm Surge Level at the Nuclear Power Plant Considering Overflow

YANG Wan-kang, YANG Qing-ying, ZHANG Feng, SONG Ze-kun
Second Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Hangzhou 310012, *Zhejiang Province, China*

Abstract: A storm surge model for the Sanmen Bay was established based on ADCIRC and the model simulation results were in good agreement with the practically measured results. A variety of hypothetical typhoon paths using possible maximum tropical cyclone parameters were built to calculate the possible maximum storm surge at the plant site. The results show that the north-west landfalling path to the left of site by the maximum wind speed radius caused the maximum storm surge level by 4.58 m at the site of the Sanmen nuclear power plant. When the possible maximum storm surge was added to high tidal level, the total level reached 7.75 m at the front of the nuclear plant site and 9.0 m near the top of the Sanmen Bay which exceeds the seawall height along the Sanmen Bay. The land area was generalized to overflow calculation. The water overflowed the dam when the *PMSS* met high tidal level and the most serious inundation happened at the top of the bay. The maximum inundation area reached 120 km^2. The extreme sea level at the front of the plant site was 7.25 m, which was 0.50 m lower than that without overflow. The results could provide a scientific basis for the protection of the Sanmen nuclear power plant.

Key words: Sanmen nuclear power plant; hypothetical typhoon paths; possible maximum storm surge; overflow