

长乐海上风电场水动力影响数值模拟研究

张永强^{1,2},孙永福^{1,2},王恩康²,张莞君^{2*},胡泽建²

(1. 山东科技大学 地球科学与工程学院, 山东 青岛 266590; 2. 自然资源部 第一海洋研究所, 山东 青岛 266061)

摘要:运用平面二维数值模拟的方法,在长乐海上风电场B区建成之后对海域的影响进行了研究,将风电机基概化为边长为6.4 m的正六边形,采用网格嵌套、逐层加密的方式对研究区地形进行刻画,模型经过6个测点和1个临时潮位站实测资料的验证,表明模型结果良好,能够反映研究区潮流性质,并模拟风电场建成后对所在海域和风电机基附近的影响。模型计算结果表明,风电场建成后对所在海域的主要影响集中在桩基附近,对流场影响主要体现在流速的变化上,在桩基根部附近,流速会因为桩基之间的束水效应增大;在桩基周围因为其阻水效应,桩基背水面和迎水面流速均会减小,且背水面流速变化范围会大于迎水面。工程会对北部两排桩基周围的余流产生10%左右的影响,产生30%数值变化的范围仅在桩基根部。

关键词:数值模拟;长乐;风电机基;流速变化;余流

中图分类号:P731.21

文献标识码:A

文章编号:1002-3682(2019)04-0293-11

doi:10.3969/j.issn.1002-3682.2019.04.005

引用格式:ZHANG Y Q, SUN Y F, WANG E K, et al. Numerical simulation of hydrodynamic influence in the Changle offshore wind farm[J]. Coastal Engineering, 2019, 38(4): 293-303. 张永强, 孙永福, 王恩康, 等. 长乐海上风电场水动力影响数值模拟研究[J]. 海岸工程, 2019, 38(4): 293-303.

风力发电作为一种清洁能源,具有显著的环保和经济效益,在推动我国可再生能源和经济发展方面有着重要意义,截至2015年底,全国风电总装机容量已达到145 362 MW。福建省全省海域面积13.6万km²,海岸线总长约3 752 km,风能资源丰富,风能理论蕴藏量较大,开发海上风电具有得天独厚的条件。在福建长乐外海区域,准备开发容量为180万kW海上风电场装机项目,按照“一次规划、分期建设”原则实施。而风电场建成之后,由于风电机基在海中建设之后桩基自身的阻流作用,其周围流速必然会减小,又因为相邻风电机基之间减小了过水面积,形成束水效应,使得相邻桩基之间的流速又会增大,其次数十个桩基之间产生的影响会相互叠加,因此使得对风电机基对周边水动力产生的影响进行研究时常规手段难以奏效,而水动力影响机制的研究又是风电机基建设之后对所在海域其他方面影响研究的基础,因此风电场建成之后对于海域水动力的影响使用数值模拟方法进行研究有非常重要的意义。

长乐海上风电场所在海域属于东海海域,为中国大陆、中国台湾岛和日本九州岛、琉球群岛以及朝鲜半岛等围绕的边缘海;有关东海曾进行过环流结构^[1-4]、分潮的性质^[5-6]、潮流和潮汐的状况^[7]以及黑潮^[8]等方面的研究;而关于海上工程对所在海域环境的影响,数值模拟则是一个非常有效的方法,从胶州湾大桥建成前后对湾内水动力的影响、湾北部冬季结冰情况的影响^[9-12],港珠澳大桥对周边环境水动力的影响^[13-14],到海岸带工程对当地环境的影响^[15-16]等,数值模拟都是一个非常有效的方法。

本文使用MIKE21数值模型,对长乐海上风电场建设前后的水动力情况进行了模拟,由模型计算结果分析了风电机基对水动力的影响机制,给出了风电机基对潮流和余流的影响幅度和影响范围,研究结果可以为后续桩基对冲淤积变化、污染物扩散等方面的研究提供水动力基础,并且为今后相似海洋工程的规划和实施提供了借鉴和参考意义。

收稿日期:2019-05-10

作者简介:张永强(1983-),男,工程师,硕士,主要从事海洋水动力环境数值模拟方面研究. E-mail: zyqiang@fio.org.cn

* 通讯作者:张莞君(1990-),女,助理工程师,硕士,主要从事海洋水文学方面研究. E-mail: zhangwanjun@fio.org.cn

(王佳实 编辑)

1 研究区域与方法

长乐海上风电场位于福建省东部沿海、闽江口南岸,东濒台湾海峡,西与闽侯县毗邻,总装机容量为300 MW,风机采用桩基基础结构形式。

长乐海上风电场B区建成之后对于所在海域水动力的影响,本文采用平面二维潮流模型进行研究,模型经过大、中、小潮期的水位和流速、流向数据进行验证,实测值和计算值符合良好,表明模型可以用于数值模拟研究,模型以多层网格进行嵌套对研究区域地形进行刻画,将风电桩基概化为边长6.4 m的正六边形使用风电场建设之前和风电场建设之后两套模型对研究区域进行模拟,通过对比风电桩基建设前后桩基周围潮流场和余流场变化,来分析风电场建成后对拟建设海域的影响。研究区域(C1,C2,C3,C4,C5和C6)及项目位置(L1)见图1。

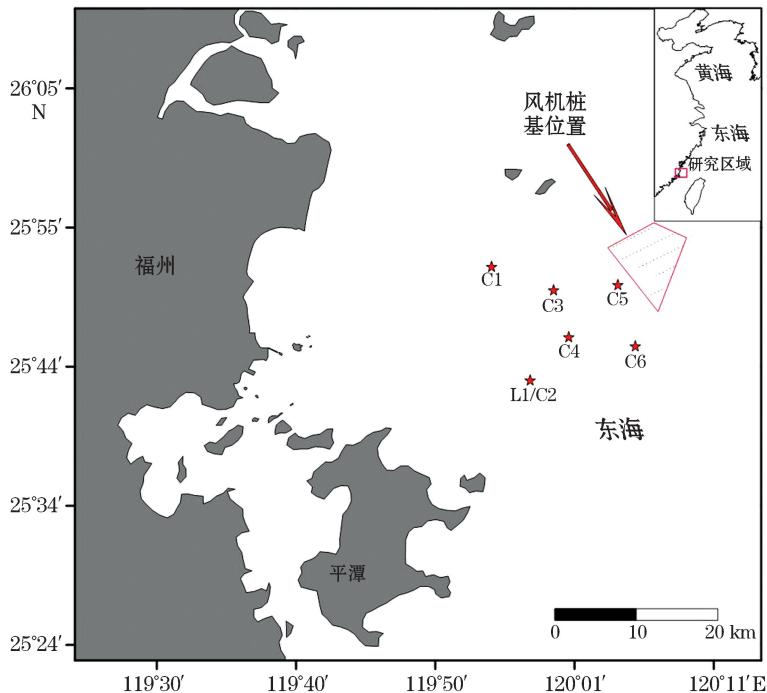


图1 研究区域和项目位置

Fig.1 Location of the study area and the project

2 模型和计算网格

本文采用MIKE21模式的Flow Model_FM HD模块搭建平面二维潮流数学模型,该模型潮流控制方程为垂向平均的二维浅水方程:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}}{\partial y} = hS, \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial h\bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}\bar{u}}{\partial y} &= f\bar{v}h - gh\frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{h}{\rho_0}\frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{gh^2}{2\rho_0}\frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} - \\ &\frac{1}{\rho_0}\left(\frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial x}(hT_{xx}) + \frac{\partial}{\partial x}(hT_{xy}) + hu_s S, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{\partial h\bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}^2}{\partial y} = -f\bar{u}h - gh\frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{h}{\rho_0}\frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{gh^2}{2\rho_0}\frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0} -$$

$$\frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial s_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{yy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (h T_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y} (h T_{yy}) + h v_s S , \quad (3)$$

式中, t 为时间; x, y 为笛卡尔坐标系; η 为水位; h 为总水深, $h = \eta + d$, 其中 d 为静水深; \bar{u}, \bar{v} 分别为沿水深平均的 x 和 y 方向上的速度分量, $\bar{u} = \frac{1}{h} \int_{-d}^{\eta} u dz$, $\bar{v} = \frac{1}{h} \int_{-d}^{\eta} v dz$; f 为科氏力参数, $f = 2\Omega \sin \phi$, 其中, Ω 为地球自转角速率, $\Omega = 0.729 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$; ϕ 为地理纬度; g 为地球重力加速度; ρ 为水密度; ρ_0 为水的参考密度; τ_{sx}, τ_{sy} 为风应力分量; τ_{bx}, τ_{by} 为底部应力分量; $s_{xx}, s_{xy}, s_{yx}, s_{yy}$ 为辐射应力分量; p_a 为当地大气压; S 为源汇项; u_s, v_s 为源汇项的水流速度分量; T_{xx}, T_{xy}, T_{yx} 和 T_{yy} 为横向应力分量, $T_{xx} = 2A \frac{\partial \bar{u}}{\partial x}$, $T_{xy} = T_{yx} = A \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right)$, $T_{yy} = 2A \frac{\partial \bar{v}}{\partial y}$, 其中, A 为水平涡流黏度系数。

模型计算范围为 $119^{\circ}27' \sim 120^{\circ}49'E$, $25^{\circ}06' \sim 26^{\circ}22'N$, 南北长约 141 km, 东西宽约 138 km, 模型范围约 $5.7 \times 10^4 \text{ km}^2$, 以平均海平面为水深基准。为了能够真实刻画研究区域内的海底地形特征, 模型采用 3 层嵌套网格, 逐层加密, 研究区域外网格较大, 空间步长约 9 000 m, 工程区网格较密, 空间步长约 300 m, 在桩基周围, 为了有效模拟风电桩基的阻水效应, 根据桩基的实际阻水面积, 采用局部网格加密法, 将风机桩基概化为边长为 6.4 m 的正六边形。模型网格节点数为 26 577 个, 单元总数为 46 788 个, 计算范围、网格划分及地形见图 2, 模型水深外海约 80 m, 在工程附近为 45 m, 因此平面二维水动力模型可以满足研究需求, 能够客观反映研究区域水动力情况。

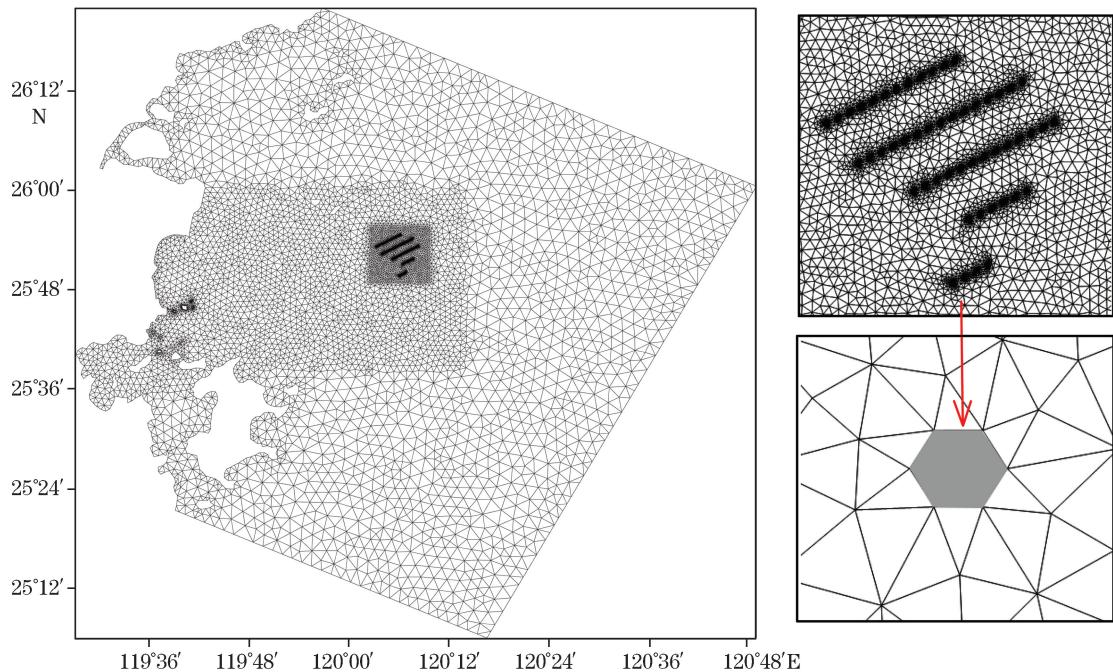


图 2 计算范围、网格划分及地形图

Fig.2 Calculation range, grid division and topographic map

3 边界条件和糙率

模型中包括外海北边界、东边界、南边界三个外海开边界。由 MIKE21 全球潮汐模型得到模型开边界调和常数, 然后根据得到的调和常数预报开边界水位, 预报公式为

$$\zeta = A_0 + \sum_{i=1}^{11} H_i F_i \cos[\sigma_i t - (\nu_0 + u)_i + g_i] \quad (4)$$

式中, A_0 为平均海面; F_i , $(\nu_0 + u)_i$ 为天文要素; σ_i 为角频率; H_i , g_i 为某分潮调和常数; 采用 11 个分潮 (M_2 , S_2 , N_2 , K_2 , K_1 , O_1 , P_1 , Q_1 , MF , M_4 和 MS_4) 进行潮位预报, 然后将水位插值到各个开边界点上, 根据模型验证结果, 可对外海边界进行适当人为调整。计算海域的糙率是综合影响因素, 是数值计算中十分重要的参数, 与当地的水深、床面形态及植被条件等因素有关, 本模型糙率选用曼宁系数, 根据本海域的特点, 结合潮位和流速流向的验证情况进行调整, 岸边潮间带取 0.025 左右, 外海取 0.016 左右, 本文风电场工程区域内曼宁系数取 0.016。模型计算的时间步长为 0.01~60 s, 根据 CFL 条件进行动态调整, 以确定模型计算稳定进行。

4 模型验证

在风电场区及其周边海域进行了 6 个海流测点和 1 个临时潮位站的海洋水文测验, 以检验模型的正确性。验证时间为: 大潮时段为 2017-11-06T12:00—11-07T14:00, 中潮时段为 2017-11-09T08:00—11-10T10:00, 小潮时段为 2017-11-12T11:00—11-13T13:00, 具体点位见图 1。在 L1 站大、中、小潮潮期进行潮位验证, 验证结果见图 3。大、中、小潮期间流速流向验证在 C1~C6 站进行, 表 1 给出了各站位计算值和实测值流速误差统计, 为节省篇幅, 本文仅展示大潮期验证结果(图 4 和图 5)。

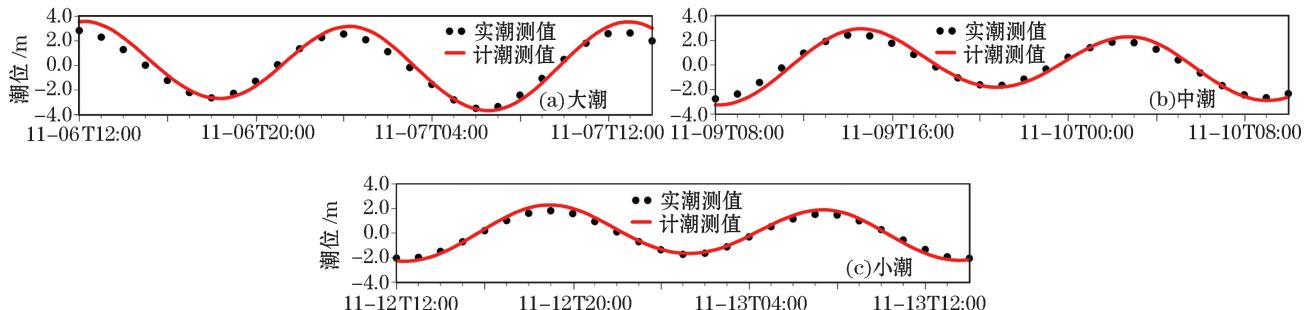


图 3 2017 年 L1 站潮位验证结果
Fig.3 The tidal level verified at Station L1 in 2017

表 1 流速误差统计表

Table 1 Error statistics of the current velocity

测 点	大潮			中潮			小潮		
	实测均值 /(m·s ⁻¹)	计算均值 /(m·s ⁻¹)	相对误差 /%	实测均值 /(m·s ⁻¹)	计算均值 /(m·s ⁻¹)	相对误差 /%	实测均值 /(m·s ⁻¹)	计算均值 /(m·s ⁻¹)	相对误差 /%
1#	0.48	0.47	-2	0.35	0.36	3	0.24	0.28	15
2#	0.56	0.54	-3	0.42	0.41	-1	0.27	0.30	12
3#	0.50	0.48	-5	0.37	0.37	-1	0.24	0.28	15
4#	0.53	0.51	-4	0.39	0.39	-1	0.26	0.29	14
5#	0.57	0.51	-11	0.42	0.39	-7	0.27	0.29	8
6#	0.59	0.53	-9	0.44	0.41	-7	0.29	0.30	4

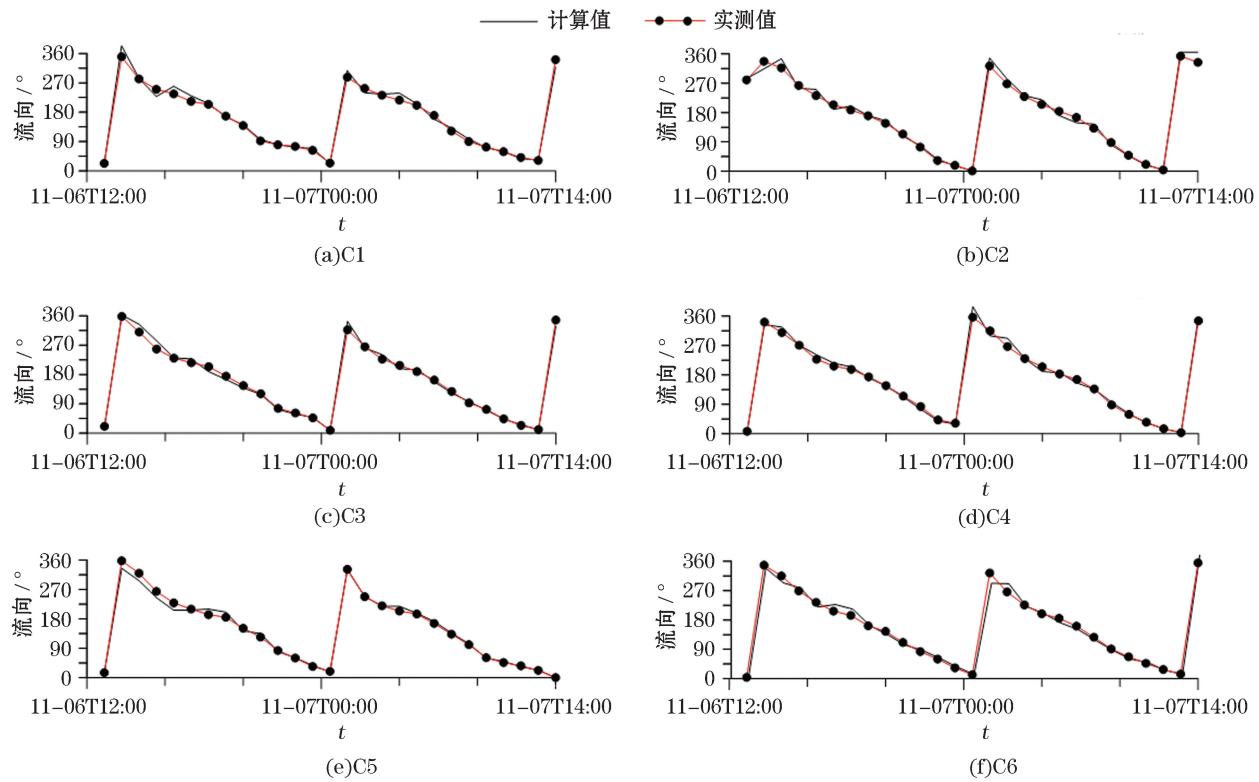


图4 2017年C1~C6站大潮期流向验证结果

Fig.4 Directions of the tidal currents verified at stations C1-C6 during spring tides in 2017

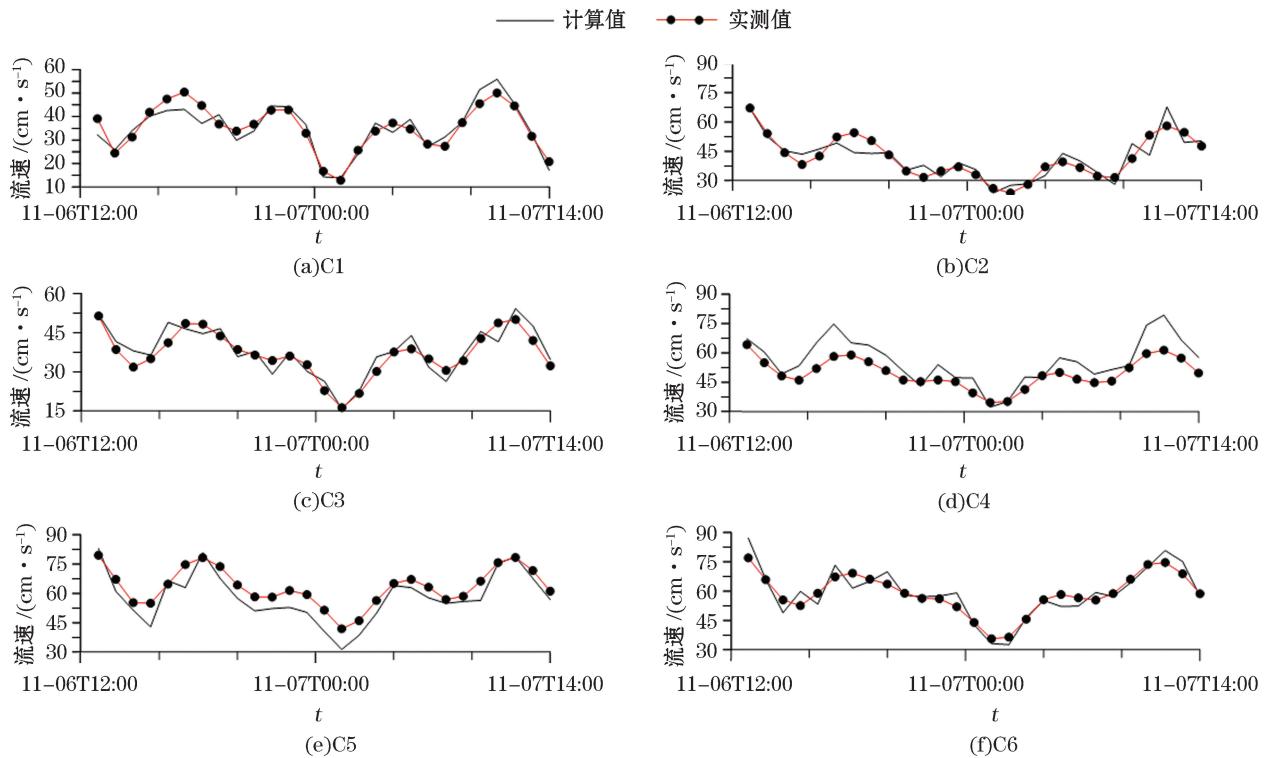


图5 2017年C1~C6站大潮期流速验证结果

Fig.5 Velocity verified at stations C1-C6 during spring tides in 2017

表 1 中的实测均值为垂向平均海流,一般定义为

$$\bar{V} = \frac{1}{H} \int_0^H f(h) dh, \quad (5)$$

式中, \bar{V} 为垂向平均流速; H 为水深; $f(h)$ 为随深度变化的流速函数。由于 $f(h)$ 的具体形式无法知道, 没有确切的函数形式, 故采用近似法用实测的海流数据来对垂向平均流速进行计算, 采用范东华^[17]方法, \bar{V} 计算公式为^[17]

$$\bar{V} = \frac{1}{10} [v_0 + 2(v_1 + v_2 + v_3 + v_4) + v_5], \quad (6)$$

式中, v_i 为各层流速值。验证结果表明, 大、中、小潮各潮位站实测值与计算值基本一致; 模型的高、低潮位出现的时间与实测高、低潮位出现的时间都吻合的较好, 潮位平均偏差约为 ± 0.02 m, 偏差小于 10%; 流速、流向验证结果显示, 大、中、小潮各测点流速、流向模拟值与实测值吻合较好, 相对偏差较小, 流速过程与实测值基本一致, 平均流速大小计算值与实测值偏差约为 10%, 平均流向小于 10°, 流速流向与模型验证良好。

总的来说, 6 个验证站位的潮位、流向和流速, 其本模型模拟值与实测值基本一致, 而目标海域潮流性质和运动方式是相似的。因此, 可以认为本模型模拟得出的结果是合理的, 模拟的流场基本反映了工程区域所在海域的潮流运动特征。

5 水动力结果分析

5.1 大范围流场情况

待模型运行完成之后, 得到风电场建成前后工程所在海域的流场情况, 计算结果表明, 在涨潮时, 水体从东北流向西南; 落潮时, 水体从西南流向东北。工程场区离岸较远, 潮流总体平顺, 大潮涨急时刻, 流速约为 0.72 m/s, 大潮落急时刻, 流速约 0.81 m/s; 在小潮涨急时刻, 流速约 0.29 m/s, 小潮落急时刻, 流速约 0.24 m/s。工程建设后, 由于桩基的存在, 会导致局部流态的改变, 但因为桩基尺度较小, 阻水效应很有限, 与工程建设前相比, 大、小潮流态并没有发生明显变化, 即工程建设对大范围流场影响不大, 对流场的影响仅局限于桩基局部范围内。由篇幅所限, 本文仅给出工程前大潮涨急时刻流场图(图 6)和工程后大潮落急流场图(图 7)。

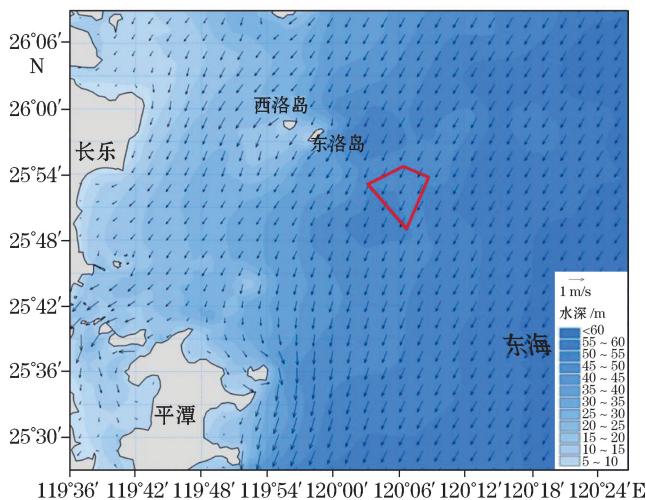


图 6 工程前大潮涨急流场

Fig.6 High tide jet field before the project

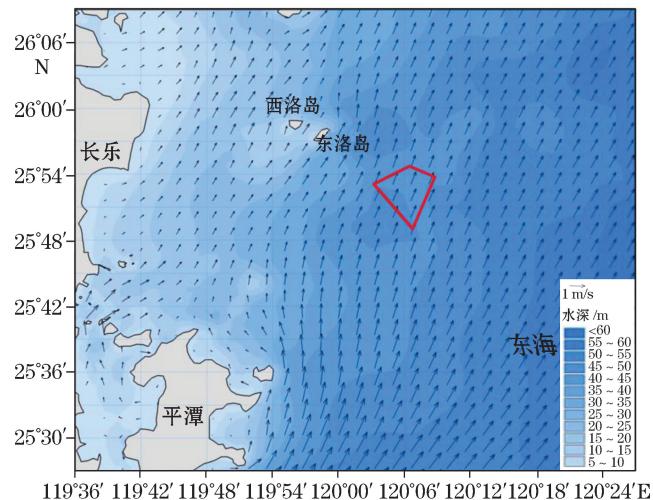


图 7 工程后大潮落急流场

Fig.7 High tide falling flow field after the project

5.2 工程区域附近流场情况

由于桩基的存在,在风电场工程建设后,桩基周围的流速会发生变化。模型计算结果表明,由于桩基的阻水作用,桩基周围均出现了一定的流速减小区域,并且桩基背流面的流速减小值大于迎流面流速减小值,图8为工程建设前后大潮涨急时刻桩基附近流速等值线图。

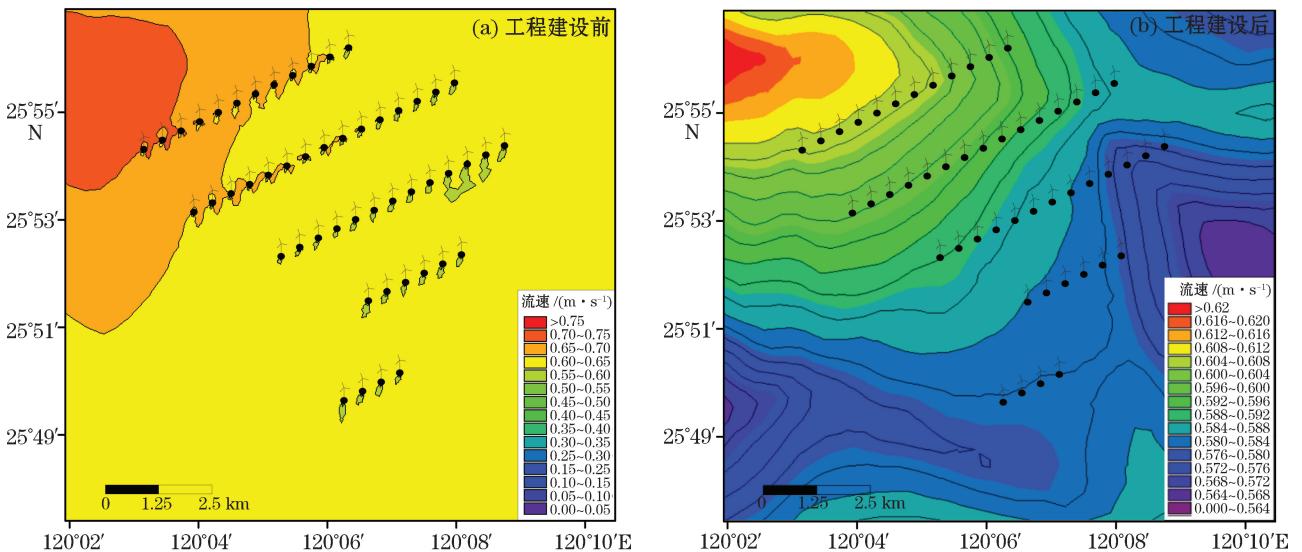


图8 风电桩基建设前后大潮涨急时刻流速等值线图

Fig.8 Contour map of the current velocity at the high tide jet before and after wind power pile foundations construction

在大潮期,由于桩基的阻水效应,会造成桩基周围不同程度的流速减小:迎水面为桩基前0~80 m;流速减幅大于0.03 m/s的范围,而背水面桩基的阻水效应更明显,在桩基背水面0~180 m的范围内,流速减幅大于0.03 m/s。在工程区域,桩基不但有阻水效应,同时因为桩基的存在,桩基之间的过水断面会相应缩小,产生束水效应,使得部分区域的流速增大。束水效应取决于海流的方向和桩基的分布,由于工程海域潮流性质为旋转流,工程后流速增加不明显,且流速增大的范围要比流速减小的范围小很多,流速增大最大值约0.03 m/s,主要集中于桩基附近;在小潮段,流场变化情况和大潮期相似,但变化范围和变化幅度有所减小,流速减幅大于0.03 m/s的范围,迎水面为桩前0~20 m范围,背水面为桩后0~40 m范围。同样工程后流速增加不明显,且流速增大的范围比流速减小的范围小很多,流速增大最大值约0.02 m/s,主要集中在桩基附近,王卫远等^[18]关于风电桩基对流场的影响和本文的结果相似。因此,风电桩基建设前后,因为桩基的阻水效应和束水效应,工程区域流场的改变主要集中在桩基的周围,且桩基背水面的流速变化范围大于桩基迎水面的流速变化范围,工程后流速增加不明显,且流速增大的范围比流速减小的范围小很多。

5.3 工程区域附近流场改变值

为了进一步说明风电场建设对研究海域水动力的影响程度,本文对桩基建设后和桩基建设前涨急和落急时刻潮流场的流速值进行作差,求出桩基建设后相对于建设前的流速变化值,以及相对于建设前流速值的变化百分比,来定量描述桩基建设的具体影响,如图9,10,11和12所示。

从图9和图10中可见,在风电桩基建设之后,涨急时刻流速增大0.005 m/s范围主要分布在桩基根部40 m范围内以及风电场北侧5.8 km范围内;在涨急时刻流速相对减小区域则位于风电桩基周围,顺潮流方向形成包络线,其中0.02 m/s流速值减小区分布在桩基1.6 km范围内,0.05 m/s流速值减小区分布在桩基0.75 km范围内,0.1 m/s流速值减小区分布在桩基0.1 km范围内,从图10也可以看出,桩基建设使得流速

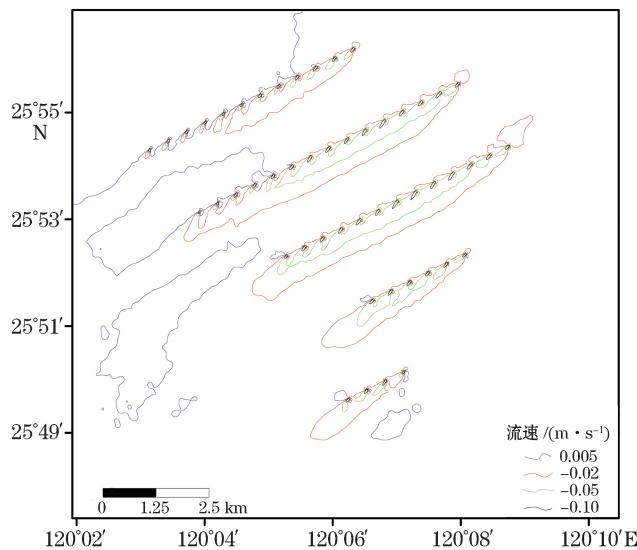


图 9 风电桩基建成之后大潮涨急时刻流速变化值等值线

Fig.9 Contour map of the current velocity at the high tide jet after the completion of wind power pile foundations

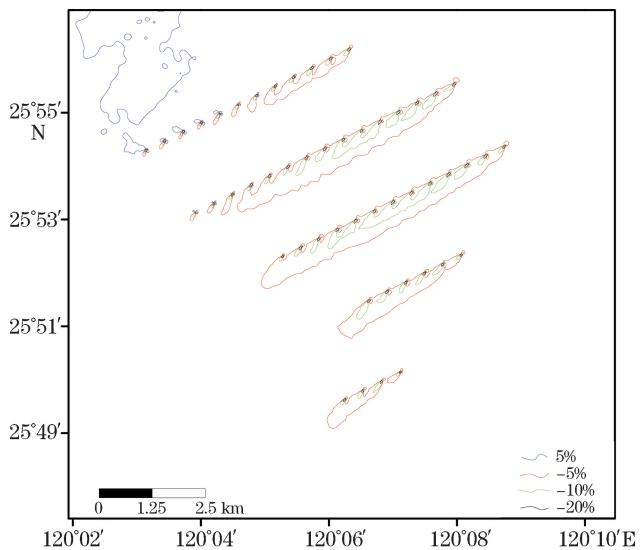


图 10 风电桩基建设之后大潮涨急时刻流速变化百分比等值线

Fig.10 Contour map of the percentage of current velocity variations at the high tide jet after the completion of wind power pile foundations

减小 10% 以上的范围仅在桩基周围，并且在顺涨潮流方向影响范围较大，最远影响距离为 0.52 km。落急时刻潮流流速变化规律和涨急时刻相似，但是主要影响区域在桩基顺落潮流方向一侧，流速相对增大 0.005 m/s 主要影响区域也和涨急时刻位置相对，在工程东南处，流速相对减小 5% 影响范围大于涨急时刻，最远影响距离 2.2 km，但流速相对减小 10% 和 20% 影响范围则小于涨急时刻，其中流速减小 10% 影响范围距离桩基最远约为 0.2 km，流速减小 20% 影响范围距离桩基最远约为 0.07 km(图 11 和图 12)。

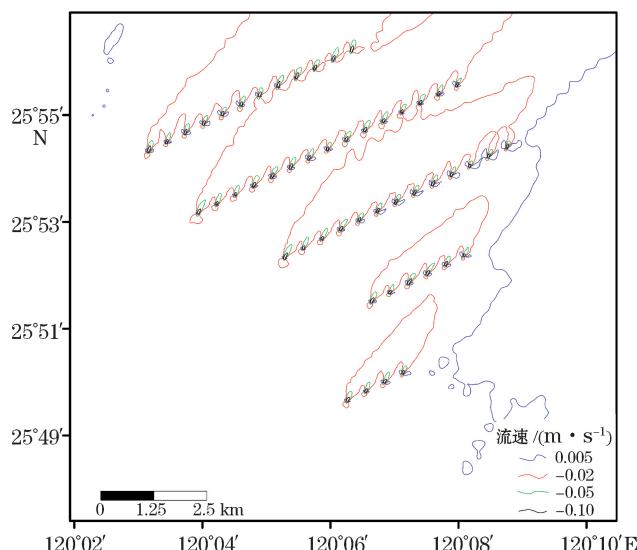


图 11 风电桩基建设之后大潮落急时刻流速变化值等值线

Fig.11 Contour map of the current velocity variations at the high tide falling flow after the completion of wind power pile foundations

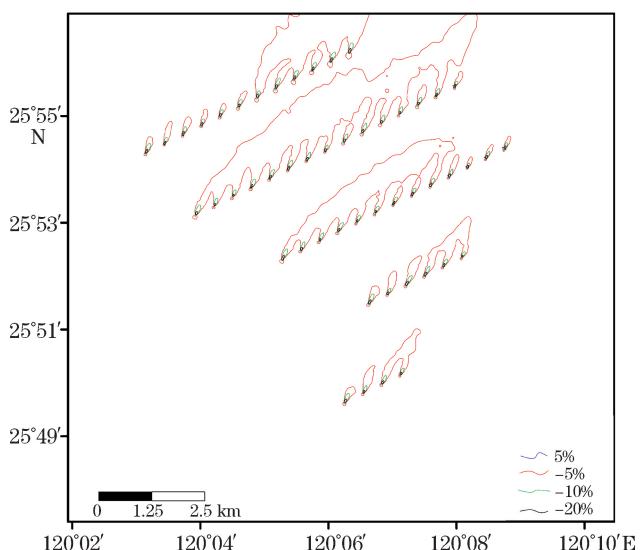


图 12 风电桩基建设之后大潮落急时刻流速变化百分比等值线

Fig.12 Contour map of the percentage of current velocity variations at the high tide falling flow after the completion of wind power pile foundations

5.4 余流场变化

风电桩基建设之后,对于所在海域的流场会产生不可避免的影响,前文分析了对于潮流场的影响。为了探究风电场建成之后,风电桩基对于所在海域范围内余流场的影响,本文对桩基建成前后的余流场进行计算^[19]。

$$u_{\text{Euler}} = \frac{1}{T} \int_T u \, dt , \quad (7)$$

式中, u_{Euler} 为欧拉余流的速度, T 为计算潮周期, u 表示某一时刻潮流速度。计算得到桩基建设前后余流场变化值(图13)及变化范围等值线(图14)。总体来说,余流变化范围相对于潮流变化范围较大,因为余流是潮流场在时间上的平均值,会将潮流的变化进行积累,因此更能反映桩基对水动力的影响。由图13可见,余流流速在北部变化范围较大,而在南部较小,在北部余流流速相对桩基建设之前有所减小,在南部则相对增加。由图14可见,流速减小10%的影响范围较大,流速减小30%只在风机桩基根部产生少量影响,在北部区域两排桩基附近流速减小10%影响范围明显大于南部区域,这是由于落急时流速变化值在北部区域较大。由图14还可看出,余流流速变化在5%影响范围较小,10%和30%影响范围略大,其中,余流流速减小10%的影响范围距离桩基最远约为3.2 km,减小30%的影响范围距离桩基最远约为0.15 km。

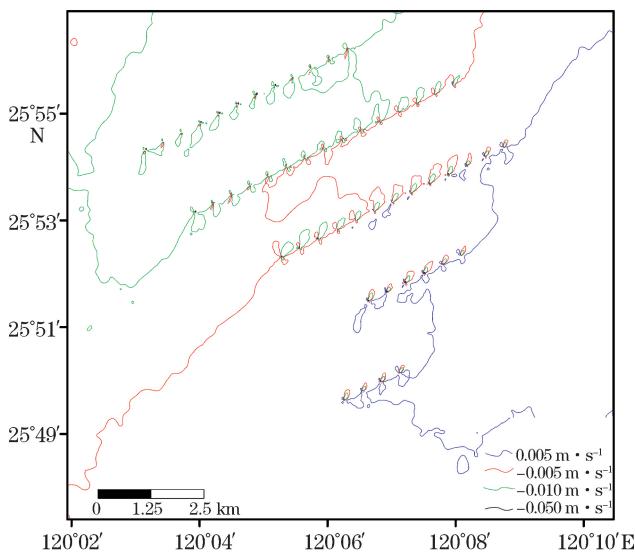


图13 桩基建设后余流场变化值

Fig.13 Variations of the residual current field after the completion of wind power pile foundations

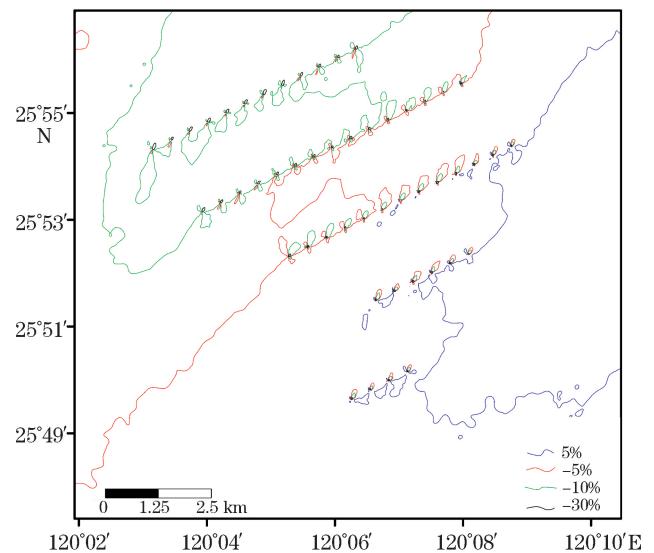


图14 桩基建设后余流场变化百分比

Fig.14 Percentage of the variations of residual current field after the completion of wind power pile foundations

6 结 论

本文对长乐海上风电场建设的水动力影响进行了数值研究,以经过实测数据验证的平面二维数值模型对研究区域进行模拟,其中对风电桩基用正六边形进行概化。根据模型模拟结果,对研究区域余流进行了计算,对比桩基建设前后潮流和余流的差异,定性和定量的研究了桩基建设后对周边海域的影响,具体结论如下:

1)工程海域在大潮涨急时刻,流速约0.72 m/s;大潮落急时刻,流速约0.81 m/s;小潮涨急时刻,流速约0.29 m/s;小潮落急时刻,流速约0.24 m/s。涨潮时水体从东北流向西南;落潮时,水体从西南流向东北。工程场区离岸较远,潮流总体平顺。

2)工程附近海域由于桩基的阻水效应,桩基周围流场会发生变化,在涨急时刻,桩基根部流速变化约

20%，沿桩基周围包络线区域流速变化约5%；落急时刻流速变化5%区域比涨急时刻大，流速变化为10%，20%区域只在桩基根部数倍于桩基直径区域。

3)海上风电场建成之后，风电机组都所在海域的影响主要集中在桩基周围水域，离工程场区较远的地方，几乎不受影响。

4)风电场对于对整个研究区域余流影响在10%以上区域主要集中于北部两排桩基，影响超过30%的区域在桩基根部数倍于桩基直径区域范围内。

参考文献(References)：

- [1] LIU G M, SUN W X, LEI K, et al. A numerical study of circulation in the Huanghai Sea and East China Sea III: numerical simulation of barotropic circulation[J]. Journal of Ocean University of Qingdao (Natural Sciences), 2002(1): 1-8. 刘桂梅, 孙文心, 雷坤, 等. 黄、东海环流的数值研究Ⅲ——正压环流的数值模拟[J]. 青岛海洋大学学报(自然科学版), 2002(1): 1-8.
- [2] ZHU J R, DING P X, ZHU S X. Numerical simulation of the circulation in the Huanghai Sea and the East China Sea in summertime[J]. Haiyang Xuebao, 2002, 24(1): 123-133. 朱建荣, 丁平兴, 朱首贤. 黄海、东海夏季环流的数值模拟[J]. 海洋学报, 2002, 24(1): 123-133.
- [3] DENG J, HUANG L W, WU G X, et al. 3D Fine-resolution modeling of China Yellow East Sea's circulation with complete forcing in winter[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2003, 27(2): 161-165. 邓健, 黄立文, 吴国雄, 等. 完全强迫下冬季黄东海环流三维高分辨数值模拟[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2003, 27(2): 161-165.
- [4] WU B Q, WANG D, CHEN B, et al. Numerical model of the wintertime circulation in Bohai, Yellow Sea and East China Sea[J]. Hydrograph IC Surveying and Charting, 2007, 27(5): 74-77. 吴宝勤, 王丹, 陈标, 等. 渤海、黄海、东海冬季环流的数值模拟[J]. 海洋测绘, 2007, 27(5): 74-77.
- [5] ZHANG H, ZHU J R, WU H. Numerical simulation of eight main tidal constituents in the East China Sea, Yellow Sea and Bohai Sea[J]. Journal of East China Normal University (Natural Sciences), 2005(3): 71-77. 张衡, 朱建荣, 吴辉. 东海黄海渤海8个主要分潮的数值模拟[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2005(3): 71-77.
- [6] LI P L, ZUO C J, WU D X, et al. Numerical simulation of semidiurnal constituents in the Bohai Sea, the Yellow Sea and the East China Sea with assimilating TOPEX/POSEIDON data[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2005, 36(1): 24-30. 李培良, 左军成, 吴德星, 等. 渤、黄、东海同化TOPEX/POSEIDON高度计资料的半日分潮数值模拟[J]. 海洋与湖沼, 2005, 36(1): 24-30.
- [7] ZHU X M, BAO X W, SONG D H, et al. Numerical study on the tides and tidal currents in Bohai Sea, Yellow Sea and East China Sea [J]. 2012, 43(3): 1103-1113. 朱学明, 鲍献文, 宋德海, 等. 渤、黄、东海潮汐、潮流的数值模拟与研究[J]. 海洋与湖沼, 2012, 43(6): 1103-1113.
- [8] FAN X P, HUANG D J, ZHANG B Z. Numerical simulation of climate state of kuroshio in the East China Sea[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2006, 40(5): 916-920. 樊孝鹏, 黄大吉, 章本照. 东海黑潮的气候态数值模拟[J]. 浙江大学学报(工学版), 2006, 40(5): 916-920.
- [9] LI P, LI G X, QIAO L L, et al. Modeling the tidal dynamic changes induced by the bridge in Jiaozhou Bay, Qingdao, China[J]. Continental Shelf Research, 2014, 84: 43-53.
- [10] ZHAO K, QIAO L L, SHI J, et al. Evolution of sedimentary dynamic environment in the western Jiaozhou Bay, Qingdao, China in the last 30 years[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2015, 163: 244-253.
- [11] ZHANG W J, CHI W Q, HU Z J, et al. Numerical study on the effect of the Jiaozhou Bay bridge construction on the hydrodynamic conditions in the surrounding sea area[J]. Coastal Engineering, 2015, 34(2): 45-50. 张莞君, 迟万清, 胡泽建, 等. 青岛胶州湾大桥建设对周边海域水动力环境影响的数值研究[J]. 海岸工程, 2015, 34(2): 40-50.
- [12] SHI X Y, ZHANG R D, ZHANG W J, et al. Impact of Jiaozhou bay cross-sea bridge on winter ice formation in northern Jiaozhou bay [J]. Marine Science Bulletin, 2018, 37(6): 633-642. 石晓雨, 张日东, 张文静, 等. 跨海大桥建设对胶州湾北部冬季结冰现象的影响[J]. 海洋通报, 2018, 37(6): 633-642.
- [13] WANG C Y, LI M G, LI W D. Research on two dimensional tidal flow mathematical model of the Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge engineering[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2010, 31(3): 187-194. 王晨阳, 李孟国, 李文丹. 港珠澳大桥工程二维潮流数学模型研究[J]. 水道港口, 2010, 31(3): 187-194.
- [14] HE J, XIN W J, JIA Y S. Numerical simulation of hydrodynamic impact of Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge on Pearl River estuary[J]. Hydro-science and Engineering, 2012(2): 84-90. 何杰, 辛文杰, 贾雨少. 港珠澳大桥对珠江口水域水动力影响的数值模拟[J]. 水利水

- 运工程学报, 2012(2): 84-90.
- [15] AN Y N, WU J Z, ZHUL H, et al. Response of erosion-deposition pattern to artificial islands construction in Longkou Bay[J]. Marine Geology Letters, 2010, 26(10): 24-30. 安永宁, 吴建政, 朱龙海, 等. 龙口湾冲淤特性对人工岛群建设的响应[J]. 海洋地质动态, 2010, 26(10): 24-30.
- [16] XUAN D K, LI G, WANG D S, et al. Numerical simulation of effects of land reclamation on water exchange capability of Bohai Bay[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2015, 48(7): 605-613. 袁德奎, 李广, 王道生, 等. 围填海工程对渤海湾水交换能力影响的数值模拟[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术), 2015, 48(7): 605-613.
- [17] FAN D H. Research on computing vertically-averaged current velocity and direction[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2014, 35(4): 464-465. 范东华. 垂线平均流速流向计算方法探讨[J]. 水道港口, 2014, 35(4): 464-465.
- [18] WANG W Y, CHEN X, HE Q Q, et al. The analysis of the effect of offshore wind farm project in the Laizhou Bay on the local tidal current field[J]. Bulletin of Science and Technology, 2017, 33(3): 60-61. 王卫远, 陈显, 张洪生, 等. 莱州湾海上风力场工程对局部潮流场的影响分析[J]. 科技通报, 2017, 33(3): 60-61.
- [19] RODRÍGUEZ P A, CARBAJAL N, RODRÍGUEZ J H G. Lagrangian trajectories, residual currents and rectification process in the northern Gulf of California[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2017, 194: 263-275.

Numerical Simulation of Hydrodynamic Influence in the Changle Offshore Wind Farm

ZHANG Yong-qiang^{1,2}, SUN Yong-fu^{1,2}, WANG En-kang², ZHANG Wan-jun², HU Ze-jian²

(1. College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

2. First Institute of Oceanography, MNR, Qingdao 266061, China)

Abstract: The influence of Area B of the Changle offshore wind farm on sea area after completion is studied by means of plane two-dimensional numerical simulation. The wind power pile foundation is generalized to a regular hexagon with a side length of 6.4 m and the terrain in the study area is characterized by grid nesting and layer-by-layer encrypting. The model has been verified by the data measured at 6 stations and one temporary tide station. The results from the model calculation show that the influence of the wind farm on the sea area after completion is mainly concentrated near the pile foundations, and the influence on the current field is mainly reflected in the change of current velocity: Near the root of the pile foundations the current velocity increases due to the flow constriction effect between the pile foundations; surrounding the pile foundations the current velocity decreases both at the facing water side and the back water side of the pile foundations due to the water-blocking effect there, of which the current velocity at the back water side has a larger variation range than that at the facing water side. After the completion of the wind farm the wind power pile foundations may cause 10% of the impact on the velocity of the residual current surrounding the two rows of pile foundations in the north and 30% of the impact only at the root of the pile foundations.

Key words: numerical simulation; Changle; wind power pile foundation; velocity variation; residual current

Received: May 10, 2019