

# 江苏射阳风电场电缆敷设引起悬沙扩散影响预测

李 晓 燕<sup>1</sup>, 章 宏 伟<sup>2</sup>, 倪 玮<sup>1</sup>

(1. 国家海洋局第二海洋研究所 工程海洋学重点实验室, 浙江 杭州 310012; 2. 浙江省水利水电勘测设计研究院, 浙江 杭州 310002)

**摘要:**江苏射阳 300 MW 海上风电场的海底电缆铺设工程, 将引起海底悬浮物增量重新分布, 可能对周边环境产生不利影响。采用 Mike21 HD 嵌套模型构建了潮流场, 并叠加风电场风机基础, 建立了悬沙扩散模型, 分析了电缆敷设施工过程中产生的悬浮物扩散情况。结果表明, 电缆敷设后, 风电场区 35 kV 电缆以及连接陆上集控中心的 220 kV 电缆施工时产生的悬浮物, 将对电缆沿线以及江苏盐城湿地珍禽国家级自然保护区北二实验区海水水质有一定的影响; 考虑到悬浮物浓度可在较短时间内迅速降低, 实际影响范围远小于预测范围, 电缆敷设施工对海水水质影响较小。

**关 键 词:**风电场; 悬沙扩散; 数学模型; 海底电缆铺设

中图法分类号: TV735

文献标志码: A

DOI:10.16232/j.cnki.1001-4179.2015.18.010

江苏射阳 300 MW 海上风电场特许权项目, 位于江苏北部射阳河口至双阳河口之间的东侧海域, 离岸最近距离约 30 km, 海底地形变化较小, 风能资源较丰富; 且地处电力负荷中心, 无地下线缆和海底矿藏等制约因素, 非常适合发展大规模的海上风电场<sup>[1-2]</sup>。该项目建设包括 100 台风力发电机组、风机之间敷设的 35 kV 电缆, 以及在风电场区海上升压站至陆上集控中心之间敷设的 220 kV 电缆。风电场共设置 12 回 35 kV 集电线路, 35 kV 海底电缆路由长约 139.1 km, 220 kV 海底电缆路由长约 30.348 km<sup>[3]</sup>。

本文通过建立二维潮流数学模型, 分析了工程区潮流水动力特征, 并利用叠加风电场风机基础后的悬浮物扩散模型, 预测了电缆沟槽开挖施工过程中引起的海水悬浮物浓度增量分布, 分析了对江苏盐城湿地珍禽国家级自然保护区的影响。

## 1 水动力数值模拟

### 1.1 计算区域及网格划分

利用 Mike21 的水动力模块 (HD) 进行潮流场计算, 基本方程选用沿水深积分的二维浅水潮波方程, 包

括一个连续方程和两个动量守恒方程。

$$\text{连续方程 } \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial Hu}{\partial x} + \frac{\partial Hv}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\text{运动方程 } \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} - fv + g \cdot \frac{u \sqrt{u^2 + v^2}}{C^2 H} = 0$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial y} + fu + g \frac{v \sqrt{u^2 + v^2}}{C^2 H} = 0 \quad (2)$$

式中,  $\eta$  为水位;  $H$  为水深,  $H = h + \eta$ ,  $h$  为海底到静止海面的距离;  $u$ 、 $v$  为沿  $x$ 、 $y$  方向的垂线平均流速分量;  $f$  为柯氏力系数,  $f = 2\omega \sin \phi$ ,  $\omega$  为地转角速度,  $\phi$  为地理纬度;  $C$  为谢才系数, 与曼宁系数  $M$  的关系为  $C = Mh^{1/6}$ ;  $t$  为时间;  $g$  为重力加速度。

数学模型计算范围东起 121°40'E, 西至江苏沿岸, 东西宽约 81 km; 北起连云港 (120°E, 34°25'N), 南至斗龙港口 (120°40'E, 33°28'N), 南北长约 118.8 km, 模型范围约  $9.6 \times 10^3 \text{ km}^2$  (见图 1)。计算域内剖分成 3 组大中小网格, M1 大网格边长 270 m,  $300 \times$

440;M2 中网格边长 90 m,661 × 535;M3 小网格边长 30 m,661 × 535。计算时间步长为 6 s。

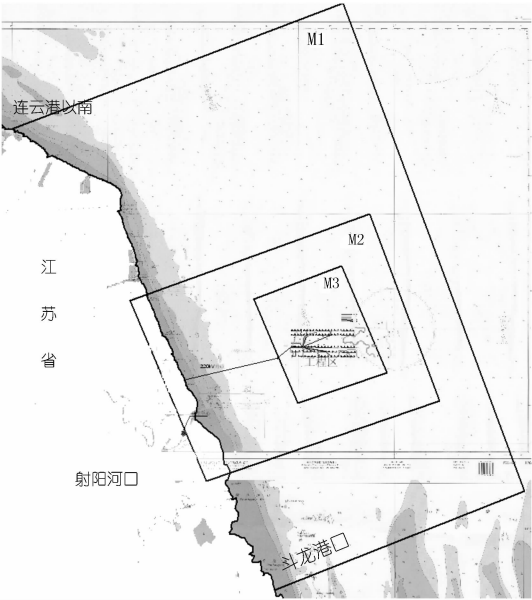


图 1 风电场位置及嵌套模型范围

1.2 边界条件

工程二维潮流模型西边界为陆边界,北边界、东边界和南边界为水边界。计算域的潮流场主要受南黄海旋转潮波系统控制,为了使计算域的潮流场能够准确反映实际的潮流运动,模型的水边界根据 Mike21 全球潮汐模型提供的调和常数,生成外海潮位过程。

1.3 风机基础处理

局部建筑物如风电场的风机基础、桩基、桥墩等,对水流会造成一定的影响,模型中需要加以特别的考虑。由于桩基直径一般不超过 5 m,如直接在网格中设置为不透水单元将过度放大对水流的影响。现有的处理方法主要有加密网格法、附加糙率法和附加阻力法,本文在 Mike21 模型中采用附加阻力法。

根据流体力学原理,水流对所绕物体的总阻力可表示为

$$F = \frac{1}{2} \rho C_d A_d v^2 \tag{3}$$

式中,  $C_d$  绕流阻力系数;  $A_d$  为与流速方向垂直的迎流投影面积;  $\rho$  为水的密度;  $v$  为来流速度。绕流阻力系数  $C_d$  与墩柱形状、淹没程度、相对水深、墩柱群的横向及遮流影响等因素有关。

1.4 水动力计算结果

模型验证江苏风电长期潮位 1 号站、工程区临时潮位站(2、3 号)的同步实测潮位;以及工程区 6 个临时潮流测点的同步潮流资料。实测站点的位置见图 2。

模型验证时间:小潮期 2010 年 8 月 5 日 16:00 至 2010 年 8 月 6 日 17:00;中潮期 2010 年 8 月 8 日 08:00 至 2010 年 8 月 9 日 09:00;大潮期 2010 年 8 月 12 日 12:00 至 2010 年 8 月 13 日 13:00。

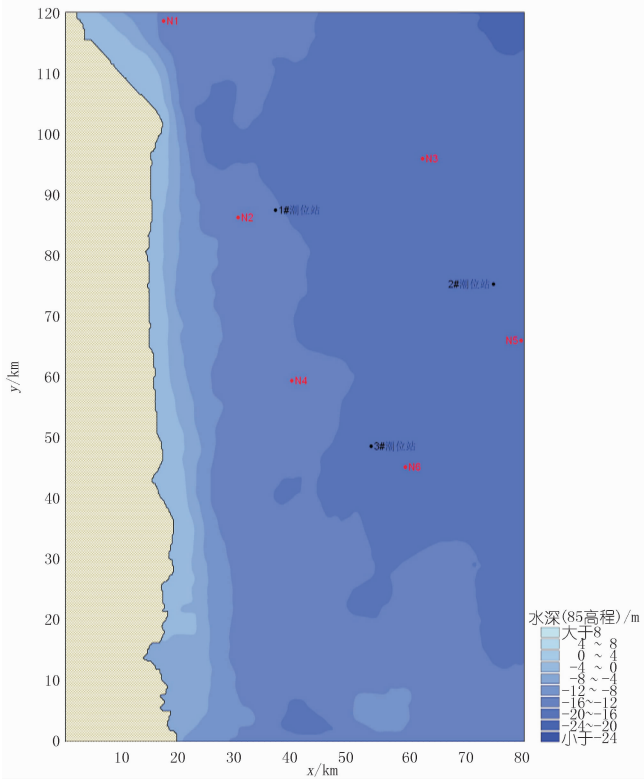


图 2 实测站点

验证结果表明,计算值与实测值吻合较好,所建立的风电场二维潮流数学模型计算结果较为合理,可用于预测风电场工程附近海域的水动力条件及其变化。

工程区地形平坦开阔,潮波主要由山东半岛反射而产生的旋转潮波系统控制,波峰线由西北向东南推进,而南部东南向西北传播的潮波对测区影响不大。工程水域潮波基本具有前进波性质,具体表现为最大流速出现在高平或低平附近,转流发生在半潮面附近。从涨落潮流运动性质看,整个海域总体上呈现往复流性质。涨潮时,潮流自西北向东南;落潮流则反之,由东南往西北。大潮涨急时风电场海域平均流速为 1.61 m/s,落急流速为 1.35 m/s;小潮涨急时风电场海域平均流速为 0.87 m/s,落急流速为 0.70 m/s。经过验证的流场模型叠加风电场风机基础后的大小潮涨急、落急流速矢量见图 3。

2 悬沙扩散模拟

2.1 预测模型

在前述叠加了风电场风机基础上,建立悬沙模型用于预测悬浮物浓度分布,悬浮物扩散模型方程如下

$$\frac{\partial(HP)}{\partial t} + \frac{\partial(HPu)}{\partial x} + \frac{\partial(HPv)}{\partial y} = K_x \frac{\partial^2(HP)}{\partial x^2} + K_y \cdot \frac{\partial^2(HP)}{\partial y^2} + Q_L C_L - HS$$

(4)

式中,  $P$  为污染物浓度;  $K_x$ 、 $K_y$  为  $x$ 、 $y$  方向的扩散系数;  $K_x = 5.93\sqrt{g^{1/3}u^{1/2}H/C}$ ;  $K_y = 5.93\sqrt{g^{1/3}v^{1/2}H/C}$ ;  $Q_L$  为水平扩散项;  $C_L$  为源强浓度;  $S$  为沉积、侵蚀项。

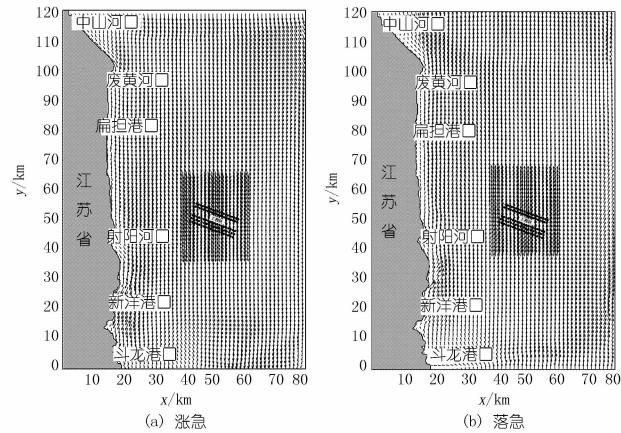


图 3 风电场施工后大潮涨急、落急流速矢量

2.2 悬沙源强

风机桩基和升压站桩基通过液压震动锤振动下沉,会导致部分海底泥沙再悬浮,引起水体浑浊,一般来说打桩悬浮物浓度不高,引起周围海域悬浮物浓度增加 ( $>10\text{ g/m}^3$ ) 范围一般在半径 100 m 内,影响范围较小。该工程的电缆敷设包括 35 kV 和 220 kV 输出电缆两部分,根据施工组织规划,电缆敷设深度不小于 2.0 m,沟槽底宽 0.5 ~ 1 m,沟上顶宽 2 m,开挖沟剖面为倒梯形,沟槽开挖将引起较大范围的海底泥沙再悬浮。本文仅预测电缆敷设施工时设悬沙扩散影响。

工程区沉积物密度为  $744.06\text{ kg/m}^3$ ,正常铺设速度为  $1\text{ m/min}$ ,起砂率按 20% 计,电缆敷设时悬浮沙的产生速率约为  $7.16\text{ kg/s}$ 。由于电缆铺设为线性工程,受地形和潮流条件影响,不同点位施工产生的悬浮物影响范围不同,35 kV 电缆敷设选取主要的 5 条纵向施工线路作为预测点位,220 kV 电缆选取整条施工线路作为预测点;计算时间选取涨落潮全潮,预测在不同潮期电缆敷设施工产生悬浮物的扩散范围和浓度,并统计全潮期悬浮物的最大影响范围。出于计算时间以及保守预测考虑,电缆预测点上的悬沙源强为同时释放。

2.3 影响预测

电缆预测点位见图 4,预测结果见图 5。从图可知,射阳风电场区 35 kV 电缆施工时悬浮物浓度增量大于  $10\text{ g/m}^3$  的影响范围最大约  $111.384\text{ km}^2$ ;220

kV 电缆施工时悬浮物浓度增量大于  $10\text{ g/m}^3$  的影响范围最大约  $45.89\text{ km}^2$ ,近岸由于扩散潮动力较弱,存在小范围高浓度区域,浓度增量大于  $50\text{ g/m}^3$  的最大影响范围约  $2.74\text{ km}^2$ ,浓度增量大于  $100\text{ g/m}^3$  的最大影响范围约  $0.67\text{ km}^2$ ,浓度增量大于  $150\text{ g/m}^3$  的最大影响范围约  $0.60\text{ km}^2$ 。

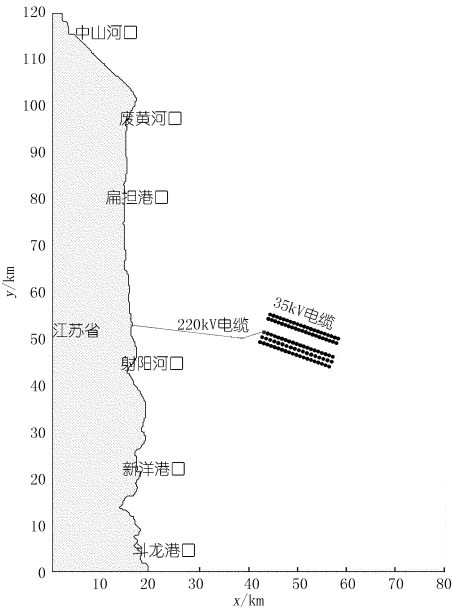


图 4 射阳风电场电缆铺设悬浮物预测点位

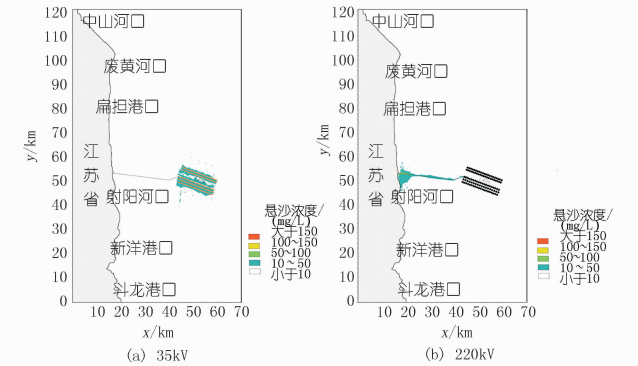


图 5 射阳风电场电缆铺设悬沙最大包络范围

2.4 影响评价

由预测结果可知,35 kV 和 220 kV 电缆敷设时工程区附近悬浮物增量均超一类、二类海水水质标准 ( $>10\text{ g/m}^3$ ),将对周围海水水质产生一定的影响。

江苏盐城湿地珍禽国家级自然保护区(见图 6)位于风电场陆上集控中心附近,连接陆上集控中心的 220 kV 电缆段将穿过北二实验区,该段电缆施工时产生的悬浮物将覆盖北二实验区。施工结束后,悬浮颗粒可在较短时间沉降,对北二实验区的影响也随之结束。此外,风电场区桩基和场区内 35 kV 电缆距离保护区较远,且场区附近的流场大致为平行岸线的南北向往复流,所以其产生的悬浮物对北二实验区基本无

影响。鉴于保守考虑,且敷设完毕的电缆段区域悬浮物浓度可在较短时间内降低,电缆敷设实际影响范围远小于预测范围。总体上看,电缆敷设施工对海水水质影响有限。

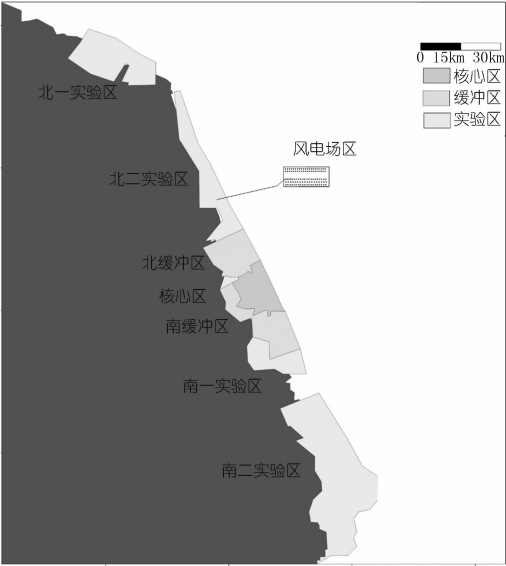


图 6 射阳风电场周边环境保护目标

3 结论与建议

Mike21HD 粗细网格嵌套模型能够较好地模拟射阳风电场区的水动力环境,采用附加阻力法,模拟风机桩基对水流的绕流影响较合理,在此基础上建立悬浮泥沙扩散模型。计算结果表明:连接陆上集控中心的 220 kV 电缆段将穿过北二实验区,该段电缆施工时产生的悬浮物将覆盖北二实验区,但施工结束后,悬浮颗粒可在较短时间沉降,对北二实验区的影响也随之结束。总体上,电缆敷设施工对海水水质影响有限。

参考文献:

[1] 朱兆瑞,冯守忠. 风电场选址技术研究[J]. 风力发电,1993,(4).  
[2] 王承煦,张源. 风力发电[M]. 北京:中国地理出版社,2003.  
[3] 中国水电顾问集团华东勘测设计研究院. 江苏射阳海上风电场 300MW 风电特许权项目可行性研究报告[R]. 杭州:中国水电顾问集团华东勘测设计研究院,2012.

(编辑:李 慧)

Prediction of impact of submarine cable laying on suspended sediment diffusion at Sheyang Wind Farm in Jiangsu Province

LI Xiaoyan<sup>1</sup>, ZHANG Hongwei<sup>2</sup>, NI Wei<sup>1</sup>

(1. Engineering Laboratory of Oceanography, The Second Institute of Oceanography, SOA, Hangzhou 310012, China; 2. Zhejiang Design Institute of Water Conservancy and Hydro-Electric Power, Hangzhou 310002, China)

**Abstract:** The submarine cable laying project of 300MW Sheyang Wind Farm in Jiangsu Province would lead to the redistribution of suspended sediment increment, which may cause negative impact on the surrounding environment. Based on the tidal current field established by Mike21 HD nested model and considering wind turbine foundation, the impact of cable laying project on the suspended sediment diffusion is analyzed. The result shows that the suspended load caused by the cable laying construction of 35 kV cables and 220 kV cables connected to the land centralized control center, will impact the sea area along the cable line and the second north experimental area in Jiangsu Yancheng Wetland National Nature Reserve (Rare Birds). Considering that the suspended load concentration will decrease rapidly in a short time, the practical impact area would be far less than the forecast area; the impact of cable laying on water quality is slight.

**Key words:** wind farm; suspended sediment diffusion; mathematical model; submarine cable laying