

张 华,吴佳辰,何 平. 海上风电工程运营初期海洋环境影响初步研究[J]. 渔业研究,2020,42(3):223-233.

海上风电工程运营初期海洋环境影响初步研究 ——以福清兴化湾海上风电场一期（样机试验风场）项目为例

张 华, 吴佳辰, 何 平

（福清海峡发电有限公司，福建 福州 350003）

摘要：针对福清兴化湾海上风电场一期（样机试验风场）项目，在进行运营期海洋环境跟踪监测和收集建设前海洋环境质量调查资料的基础上，分析和探讨海上风电场营运对周边海域的水质、沉积物、生态、渔业资源等环境因素可能产生的影响及影响程度，认为一期项目营运对海洋环境生态的影响处于预测范围内，部分指标和程度优于影响预测。

关键词：兴化湾；海上风电；环境生态影响；运营期

中图分类号：X828 **文献标识码：**A **文章编号：**1006-5601(2020)03-0223-11

风力发电是可再生能源中最具有经济开发价值的清洁能源，风资源的开发利用是我国能源发展战略和调整电力结构的重要举措之一。随着国内外风电技术的不断发展，我国风电项目的总装机容量实现了持续增长^[1-4]。与陆上风电项目相比，海上风电场在发电效率等方面的优势更为明显，且对于周边海洋环境的影响较小，但在项目的施工、运行过程中，还是不可避免地对周边海洋环境造成一定的影响，很大程度上制约了海上风电的进一步发展。关于海上风电场建设对环境影响的评估工作，已有些报道，Fielding等^[5]对荷兰 Hollandurke 715MW 风电场进行了鸟类伤害研究，结果表明鸟类因该风电场的存在每年死亡数量约为36~438只，风电场配置对鸟类迁徙活动、生活习性也会产生一定的影响^[6-7]；Wahlberg等^[8]发现鳕鱼和大西洋鲑鱼能够监测到距风电场区7~13 km和0.4~0.5 km的噪声，并改变其迁徙路线。张玮等^[9]通过建立长江口、杭州湾及其附近海域潮流数值模拟发现，风机实

施的影响范围及程度与工程海域的潮流特性、风机布置形式等有关，对附近海域影响较小。

受台湾海峡“狭管效应”的影响，福清兴化湾风能资源丰富，建设条件良好，风电开发经济性优越。兴化湾海上风电场一期项目位于福清沙埔镇牛头尾村和三山镇前薛村之间海域，拟通过样机实验风场建设获取适合福建海域的样机厂家和桩基基础形式。样机风场共布置14台风电机组，包括GE 3台6 MW风机、金风2台6.7 MW风机、海装2台5 MW风机、太重2台5 MW风机、明阳2台5 MW风机以及东气1台5 MW风机，湘电1台5 MW风机和上气1台6 MW风机，总装机容量为77.4 MW，年上网电量 $18\,710.8 \times 10^4 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。风场中心距岸线约5.7 km，水深-20.7~-4.9 m（理基），外缘面积约6.9 km²，其布局沿NW-SE方向布置3排机组，每排风机数量4~5台，行内间距约500 m，排内间距1 000~1 500 m（图1），风机轮毂高度85~100 m，风机直径128~154 m，风机基础采用高桩承台、导管架、单管桩3种基础。风场

收稿日期：2019-10-29

基金项目：兴化湾海上风电场项目海洋环境跟踪监测课题。

作者简介：张 华（1984-），男，工程师，硕士，现主要从事海上风电前期论证工作。Tel: 18105092924.
E-mail: 877892128@qq.com

配套铺设 35 kV 海缆接入北侧陆域 110 kV 升压变电站,并以一回 110 kV 线路并入省电网。

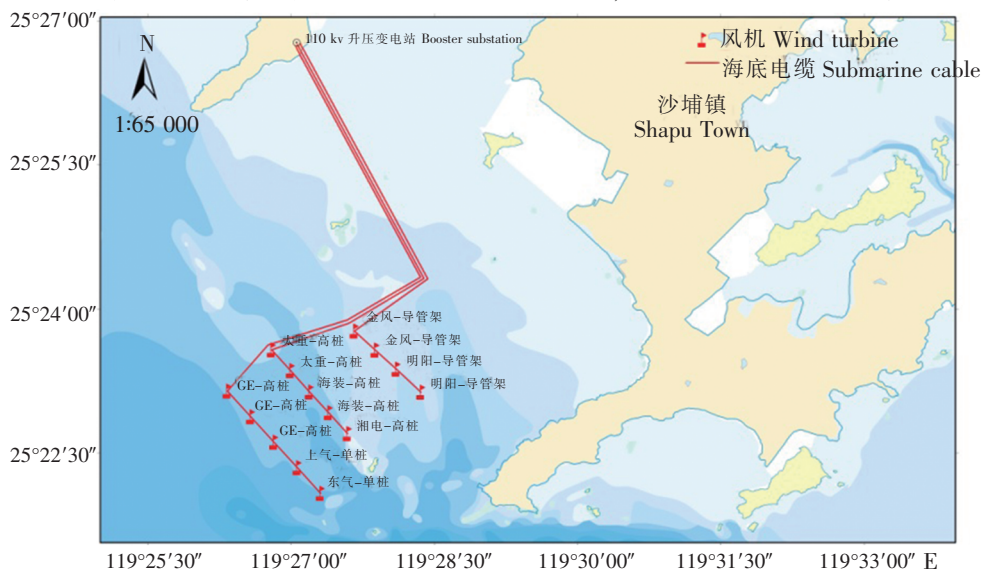


图1 样机试验风场平面布置图
Fig.1 Layout chart of the experimental offshore wind farm

本文选择福清兴化湾海上风电场一期(样机试验风场)项目建设前海洋环境要素实测数据与运营期海洋环境跟踪监测数据作对比分析,了解海上风电项目营运对海洋水质、海洋沉积物、海洋生态及渔业资源的影响,评估其影响的范围和程度,获得的结果将对福建省海上风电场建设、完善海洋环境跟踪监测方案、完善海洋环境保护措施、促进海洋环境保护和海洋风能资源的可持续利用具有一定的参考价值。

1 材料与方法

1.1 调查与采样

根据《建设项目海洋环境影响跟踪监测技术规程》^[10]的要求,2019年5—6月在工程邻近海域布设8个水质监测站(站位1~8)、6个沉积物、生态和渔业资源监测站(站位2~7)、2条潮间带底栖生物监测断面(断面A、B)。站位分布见图2。

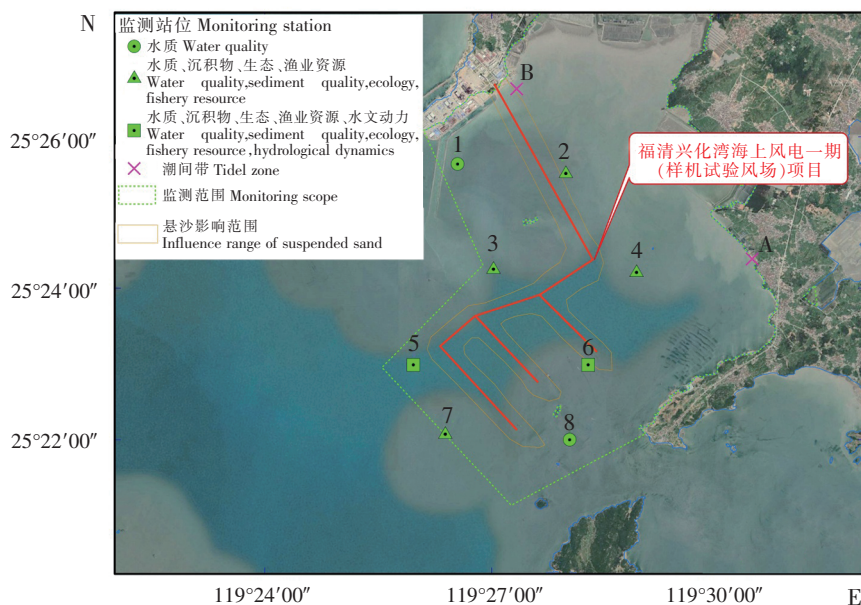


图2 风电运营期监测采样站位图
Fig.2 Survey stations in the operation of offshore wind farm

海水水质监测要素包括：水温、盐度、悬浮物、石油类、化学需氧量、溶解氧、锌。海洋沉积物质量监测要素包括：有机碳、硫化物、油类、锌。海洋生态监测要素包括叶绿素 *a* 含量、浮游植物、浮游动物、潮下带底栖生物、潮间带生物。水质、沉积物和生态监测频率为 2019 年 5 月，监测 1 次。渔业资源监测要素为鱼卵、仔稚鱼的种类组成、数量分布、生态特征指数及优势种等，2019 年 5—6 月监测 1 次。

各监测要素样品的采集、保存方法均按《海洋监测规范》^[11] 和《海洋调查规范》^[12] 的有关规定执行。水质取样层次要求：水深小于 10 m 只采表层水，水深 10 ~ 25 m 采表、底层水，水深 25 ~ 50 m 采集表层、10 m 层和底层水，石油类仅采集表层水样。沉积物用不锈钢采泥器采集表层样品。叶绿素 *a* 采样同水质；浮游植物采用装有流量计的浅水Ⅲ型浮游生物网自底至表层作垂直拖网进行采集，采集的样品在现场用饱和 Lugos 溶液固定，经浓缩后用显微镜观察、鉴定和计数；浮游动物同时使用浅水Ⅰ型网（定性）和Ⅱ型网（定量）两种网具采集，从底层到表

层垂直拖取，样品用 5% 甲醛溶液固定，以湿重法称取浮游动物的重量，在体视显微镜下对标本进行鉴定和计数；大型底栖生物调查使用采泥面积为 0.05 m² 的采泥器，每站连续采集 4 次有效泥样，合为一份样品，泥样经淘选，用网目孔径为 0.5 mm 的套筛分选出标本，套筛内残渣带回实验室再行拣选；潮间带生物在各断面潮间带的高、中、低潮区分别采集定性样品和定量样品，定量样品用大小为 25 cm × 25 cm 的取样框随机抛投 4 次，先拾取框内滩面上的底栖生物，再挖取至 30 cm 深处内的底泥，用 0.5 mm 孔径的套筛淘洗，所获底栖生物样品用 5% 甲醛溶液固定保存，以湿重法称取底栖生物生物量，在体视显微镜下对标本进行鉴定和计数。鱼卵、仔鱼调查采用浅水Ⅰ型浮游动物网，垂直拖网每站自底层到表层垂直拖网 1 次（定量），水平拖网每站拖曳 10 min（定性），样品经 5% 福尔马林固定，带回实验室后进行分类、鉴定和计数。

水质、沉积物和海洋生态监测项目分析方法依据的标准规范、技术规程见表 1。

表 1 样品的分析方法和引用标准

Tab. 1 Analytic technique and referenced standard in the survey

监测项目 Monitoring factors	分析方法 Analytical technique	引用标准 Referenced standard
水质 Water quality	水温	表层水温表法/颠倒温度计法/CTD 法
	盐度	电导法、多参数计直读
	溶解氧	碘量法
	化学需氧量	碱性高锰酸钾法
	石油类	紫外分光光度法
	悬浮物	重量法
	锌	火焰原子吸收分光光度法
沉积物 Sediment quality	有机碳	重铬酸钾氧化-还原容量法
	硫化物	碘量法
	锌	原子吸收分光光度法
	石油类	紫外分光光度法
	叶绿素 - a	分光光度法
海洋生态 Marine ecology	浮游植物	浮游生物生态调查
	浮游动物	浮游生物生态调查
	大型底栖生物	大型底栖生物生态调查
	潮间带生物	潮间带生物生态调查

续表 1

监测项目 Monitoring factors		分析方法 Analytic technique	引用标准 Referenced standard
渔业资源 Fishery resource	鱼卵仔鱼	鱼类浮游生物调查	GB/T 12763.6—2007

注:引用标准 GB/T 12763—2007 为《海洋调查规范》,GB 17378—2007 为《海洋监测规范》。

Notes: Referenced standard GB/T 12763—2007 meant《Specifications for oceanographic survey》, GB 17378—2007 meant《The specification for marine monitoring》.

1.2 质量控制

海水水质监测中,所有站位盐度、水温、COD 做 100% 测试样双平行,溶解氧做 100% 原始样双平行;站位 3 定为质控站位,对水质石油类、悬浮物、锌采集原始样双平行,同时采集水质锌的现场空白样。沉积物监测中,站位 3 为质控站位,硫化物、石油类和锌采集原始样双平行。内业分析中,在水质锌检测时插入标准物质作内控样分析,沉积物锌检测时插入标准物质作内控样分析。浮游植物、浮游动物、大型底栖生物、潮间带生物应保证 90% 以上鉴定到种(尤其是优势种)。

1.3 数据处理

水质评价方法采用《近岸海域环境监测规范》^[13]中推荐的“单因子污染指数评价法”,计算公式如下:

$$PI_i = C_i/S_i \quad (1)$$

式(1)中, PI_i —某监测站位污染物*i*的污染指数, C_i —某监测站位污染物*i*的实测浓度(mg/L), S_i —污染物*i*评价标准(mg/L)。

溶解氧污染指数的计算公式为:

$$PI_{DO} = \begin{cases} |DO - DO_f|/(DO_f - DO_s), DO \geq DO_s \\ 10 - 9DO/DO_s, DO < DO_s \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中, PI_{DO} —溶解氧的污染指数, DO_f —饱和溶解氧浓度(mg/L), DO_s —溶解氧的评价标准(mg/L), DO —溶解氧的实测浓度(mg/L)。

判定条件:水质参数的污染指数>1,表明该水质超过了规定的水质评价标准。沉积物质量评价方法参照水质。

海洋生态特征指数选取多样性指数、均匀度指数、丰度指数、群落优势度和物种优势度指数进行评价,计算公式分列如下:

多样性指数(Shannon - Wiener 1963):

$$H' = - \sum_{i=1}^s p_i \log_2 p_i \quad (3)$$

均匀度指数(Pielou 1966): $J = H'/\log_2 S$ (4)

丰度指数(Margalef 1958): $d = (S - 1)/\log_2 N$ (5)

群落优势度(Manauhton): $D = (N_1 + N_2)/NT$ (6)

物种优势度: $Y = (n_i/N) \times f_i$ (7)

式(3)~(7)中, P_i 为第*i*种的个体数量与样品总数量的比值, S 为样品中的种类数, N 为样品的总个体数, N_1 为样品中第一优势种的个数, N_2 为样品中第二优势种的个数, NT 为样品的总个体数, f_i 为出现率。

根据《近岸海域环境监测技术规范》(HJ 442—2008)中生物多样性指数 H' 评价指标, $H' \geq 3.0$,生境质量等级优良; $2.0 \leq H' < 3.0$,生境质量等级一般; $1.0 \leq H' < 2.0$,生境质量等级差; $H' < 1.0$,生境质量等级极差。根据评价结果,确定海域环境对海洋生物的影响程度,即生物环境质量。均匀度 J 是站位上各种类间数量分布是否均衡的一个量度, J 值的范围在0~1之间, J 值大时,体现种间个体数分布较均匀;反之, J 值小反映种间个体数分布欠均匀。

2 结果与分析

2.1 结果

2.1.1 海水水质

水质监测结果表明:调查海域水温介于22.9~25.0℃之间,平均值23.5℃;盐度介于30.3~31.2之间,平均值30.9;悬浮物含量介于22.4~28.0 mg/L之间,平均值25.3 mg/L;化学需氧量介于0.39~0.64 mg/L之间,平均值

0.55 mg/L; 溶解氧含量介于 6.54 ~ 7.56 mg/L 之间, 平均值 7.00 mg/L; 石油类含量介于 33.4 ~ 48.0 $\mu\text{g/L}$ 之间, 平均值 39.3 $\mu\text{g/L}$; 锌含量介于 4.46 ~ 9.41 $\mu\text{g/L}$ 之间, 平均值 6.34 $\mu\text{g/L}$ 。所有站位的溶解氧、化学需氧量、石油类、锌含量均符合第一类海水水质标准, 水质状况良好, 未出现超标情况。

2.1.2 海洋沉积物

沉积物质量监测结果表明: 调查海域石油类含量介于 $(14.8 \sim 82.8) \times 10^{-6}$ 之间, 平均值 46.9×10^{-6} ; 有机碳含量介于 0.46% ~ 1.06% 之间, 平均值 0.75%; 锌含量介于 $(96.1 \sim 122.1) \times 10^{-6}$ 之间, 平均值 110.3×10^{-6} ; 硫化物含量介于 $(34.7 \sim 98.0) \times 10^{-6}$ 之间, 平均值 50.3×10^{-6} 。所有指标均符合第一类海洋沉积物质量标准, 沉积物质量状况良好。

2.1.3 海洋生态指标

海洋生态监测结果表明: 叶绿素 *a* 含量均值为 2.91 mg/m^3 , 最高值出现在 2 号站 (3.87 mg/m^3), 最低值出现在 6 号站 (2.02 mg/m^3)。浮游植物共鉴定 2 门 26 种, 硅藻 23 种, 占 88.5%; 细胞密度均值为 $1.70 \times 10^8 \text{ cells/m}^3$ ($3.41 \times 10^5 \sim 5.45 \times 10^8 \text{ cells/m}^3$); 优势种仅中肋骨条藻 1 种; 浮游植物多样性指数 *H'* 平均值为 0.74、种类均匀度指数 *J* 平均值为 0.21、丰度指数 *d* 平均值为 0.40、群落优势度 *D* 平均值为 0.93。浮游动物共鉴定 13 大类 92 种 (类), 浮游幼虫最多, 共 26 种; 生物量均值为 814.4 mg/m^3 (610.4 ~ 1 208.3 mg/m^3), 密度均值为 5 252.5 ind/m^3 (767.6 ~ 9 086.5 ind/m^3); 浮游动物共出现 11 个优势种 (类), 其中小拟哲水蚤为主要优势种, 平均密度为 2 119.3 ind/m^3 ; 浮游动物多样性指数 *H'* 平均值为 3.12、种类均匀度指数 *J* 平均值为 0.63、丰度指数 *d* 平均值为 2.71、群落优势度 *D* 平均值为 0.56。大型底栖生物共鉴定 38 种, 以多毛类种类数最多, 共 29 种; 总生物量和总栖息密度均值分别为 8.13 g/m^2 (0.65 ~ 34.05 g/m^2) 和 48 ind/m^2 (15 ~

125 ind/m^2); 优势种有 2 种, 似蛭虫占较大优势; 大型底栖生物多样性指数 *H'* 均值为 2.27、均匀度指数 *J* 均值为 0.84、丰度指数 *d* 均值为 2.05、群落优势度 *D* 均值为 0.46。潮间带底栖生物共鉴定 91 种, 其中多毛类最多, 共 33 种; 平均栖息密度和生物量分别为 180 ind/m^2 (0 ~ 588 ind/m^2) 和 18.83 g/m^2 (0.00 ~ 91.52 g/m^2); A 断面优势种有 5 种, 以多毛类为主, B 断面优势种有 6 种, 以多毛类和甲壳动物为主; 潮间带底栖生物多样性指数 *H'* 均值为 2.47、均匀度指数 *J* 均值为 0.73、丰度指数 *d* 均值为 2.08、群落优势度 *D* 均值为 0.59。总体来看, 调查海域浮游植物多样性指数和均匀度均较低, 群落结构多样性较差; 浮游动物多样性指数和丰度均较高, 均匀度中等, 种类分布均匀, 群落结构多样性较好; 潮下带大型底栖生物和潮间带底栖生物的生物多样性较好, 群落结构稳定。

2.1.4 鱼卵、仔稚鱼

渔业资源监测结果表明: 鱼卵、仔稚鱼共发现 3 目 7 科 7 种, 其中鱼卵 3 种、仔稚鱼 4 种。鱼卵的密度均值为 0.35 ind/m^3 (0 ~ 1.66 ind/m^3), 仔稚鱼均值为 1.45 ind/m^3 (0.27 ~ 3.33 ind/m^3)。各站获得的鱼卵优势种共有 3 种, 仔鱼 2 种, 鱼卵以小公鱼占较大优势, 仔鱼以美肩鳃鲷占绝对优势。

2.2 环境影响的比较与分析

2.2.1 海水水质

以《福清兴化湾海上风电场一期 (样机试验风场) 项目海洋环境影响报告书》^① 中的调查数据 (与本次运营期跟踪监测站位经纬度相近) 作为工程建设前的背景资料 (调查时间为 2016 年 3 月和 9 月)。

与建设前 (2016 年 3 月) 相比 (表 2), 2019 年 5 月运营期水质变化幅度很小, 各指标要素与建设前均处在同一水质等级上, 表明本工程营运基本未对周边海域水质环境造成不利影响。

① 浙江环科环境咨询有限公司. 福清兴化湾海上风电场一期 (样机试验风场) 项目海洋环境影响报告书. 2017.

表2 建设前和运营期海水水质抽样数据对比表

Tab. 2 Comparison of water quality between pre – construction and operation period of the offshore wind farm

调查时间 Time	特征值 Value	盐度 SAL	悬浮物 /(mg/L) SS	化学需氧量 /(mg/L) COD	溶解氧 /(mg/L) DO	石油类 /(μg/L) PH	锌 /(μg/L) Zn
2016年3月 (建设前) March, 2016 (Pre – construction)	最小值	30.7	29.5	0.77	7.65	11.7	5.76
	最大值	31.4	51.5	1.05	8.15	27.6	10.30
	平均值	31.0	41.3	0.88	7.93	19.1	8.08
2019年5月 (运营期) May, 2019 (Operation)	最小值	30.3	22.4	0.39	6.54	11.7	4.46
	最大值	31.4	51.5	1.05	8.15	48.0	10.30
	平均值	30.9	30.6	0.66	7.31	32.6	6.92

2.2.2 海洋沉积物

与建设前（2016年3月）相比（表3），
2019年5月运营期沉积物中锌含量有所升高，

石油类、有机碳含量有所降低，硫化物含量基本
无变化，可见运营初期工程周边沉积物质量仍保
持在良好状态。

表3 建设前和运营期沉积物质量监测数据对比表

Tab. 3 Comparison of sediment quality between pre – construction and operation period of the offshore wind farm

监测时间 Time	特征值 Value	锌/(10 ⁻⁶) Zn	石油类/(10 ⁻⁶) PH	硫化物/(10 ⁻⁶) S	有机碳/% TOC
2016年3月 (建设前) March, 2016 (Pre – construction)	最小值	65.3	40.8	31.8	0.72
	最大值	88.5	113.0	65.1	1.26
	平均值	78.5	75.2	43.6	1.03
2019年5月 (运营期) May, 2019 (Operation)	最小值	96.1	14.8	34.7	0.46
	最大值	122.1	82.8	98.0	1.06
	平均值	110.3	46.9	50.3	0.75

2.2.3 叶绿素 *a*

与2016年建设前相比（表4），运营期监测

海域叶绿素 *a* 含量最高，2016年9月叶绿素 *a*
含量最低，这可能与季节变化规律有关。

表4 建设前和运营期叶绿素 *a* 特征值对比表Tab. 4 Comparison of chlorophyll – *a* between pre – construction and operation period of the offshore wind farm

特征值 Value	建设前 Pre – construction		运营期 Operation
	2016年3月 Mar., 2016	2016年9月 Sept., 2016	2019年5月 May, 2019
最小值 Min value	1.78	1.12	2.02
最大值 Max value	3.11	2.43	4.01
平均值 Average value	2.18	1.67	2.91

2.2.4 浮游植物与生态特征

与2016年建设前相比(表5),运营期监测海域浮游植物种类数降低,细胞密度升高;中肋

骨条藻为建设前、运营期的共同优势种;运营期浮游植物的物种多样性指数 H' 和均匀度指数 J 均较建设前降低。

表5 建设前和运营期浮游植物海洋生态特征对比表

Tab.5 Comparison of phytoplankton between pre-construction and operation period of the offshore wind farm

生态指标 Ecological index	建设前 Pre-construction		运营期 Operation
	2016年3月 Mar.,2016	2016年9月 Sept.,2016	2019年5月 May,2019
种类数 Species number	总计82: 硅藻77,甲藻4,蓝藻1	总计63: 硅藻60,甲藻3	总计26: 硅藻23,甲藻3
细胞密度/cells·m ⁻³	4.02×10 ⁴	2.16×10 ⁴	1.70×10 ⁸
Density	(2.23×10 ⁴ ~6.75×10 ⁴)	(1.13×10 ⁴ ~4.72×10 ⁴)	(3.41×10 ⁵ ~5.45×10 ⁸)
优势种 Dominant species	中肋骨条藻,旋链角毛藻,具槽帕拉藻	中肋骨条藻,具边圆筛藻,具槽帕拉藻,菱形海线藻	中肋骨条藻
多样性 H'	2.88 (2.66~3.12)	2.94 (2.64~3.31)	0.74 (0.11~1.79)
均匀度 J	0.73 (0.70~0.76)	0.75 (0.67~0.80)	0.21 (0.04~0.45)

2.2.5 浮游动物及生态特征

与2016年建设前相比(表6),运营期监测海域浮游动物的种类数最多,多个航次浮游动物

以桡足类、水母类为主;运营期浮游动物平均生物量和平均密度均较高;运营期浮游动物多样性指数 H' 最高,均匀度 J 相差不大。

表6 建设前和运营期浮游动物海洋生态特征对比表

Tab.6 Comparison of zooplankton between pre-construction and operation period of the offshore wind farm

生态指标 Ecological index	建设前 Pre-construction		运营期 Operation
	2016年3月 Mar.,2016	2016年9月 Sept.,2016	2019年5月 May,2019
种类数 Species number	总计56: 桡足类26,浮游幼体7,水母类7,毛颚类4,十足类4,糠虾类3,介形类2,端足类1,被囊类1,磷虾类1	总计39: 桡足类18,浮游幼体5,水母类5,毛颚类3,十足类3,糠虾类2,介形类1,被囊类1,磷虾类1	总计92: 桡足类27,浮游幼体26,水母类21,毛颚类3,介形类3,端足类3,被囊类3,多毛类1,等足类1,枝角类1,十足类1,糠虾类1,磷虾类1
生物量/mg·m ⁻³ Biomass	140.2 (52.6~263.7)	86.3 (28.4~255.8)	814.4 (610.4~1208.3)
密度/ind·m ⁻³ Density	1306.3 (437.9~2980.0)	688.3 (333.5~1723.8)	5252.5 (767.6~9086.5)
优势种 Dominant species	针刺拟哲水蚤,小拟哲水蚤,中华哲水蚤	精致真刺水蚤,瘦尾胸刺水蚤,肥胖箭虫,微刺哲水蚤,中华假磷虾	小拟哲水蚤,瘦尾胸刺水蚤,桡足类桡足幼体,筒长腹剑水蚤,强额孔雀水蚤,长尾住囊虫,拟长腹剑水蚤,尖额真猛水蚤,异体住囊虫,多毛类幼虫,蔓足类无节幼虫

续表 6

生态指标 Ecological index	建设前 Pre - construction		运营期 Operation
	2016 年 3 月 Mar. ,2016	2016 年 9 月 Sept. ,2016	2019 年 5 月 May,2019
多样性 H'	2.73 (2.36 ~ 3.43)	2.50 (2.24 ~ 2.81)	3.12 (2.76 ~ 3.54)
均匀度 J	0.70 (0.60 ~ 0.82)	0.66 (0.61 ~ 0.69)	0.63 (0.57 ~ 0.73)

2.2.6 底栖动物及其生态特征

与 2016 年建设前相比 (表 7), 运营期监测海域大型底栖生物的种类数和栖息密度明显下降, 生物量亦有所下降。建设前 2 个航次共同优

势种有 1 种 (异足索沙蚕), 与运营期无共同优势种。多样性指数 H' 呈下降趋势, 丰度指数 d 和均匀度指数总体保持稳定。

表 7 建设前和运营期大型底栖动物海洋生态特征对比表

Tab. 7 Comparison of macro benthos between pre - construction and operation period of the offshore wind farm

生态指标 Ecological index	建设前 Pre - construction		运营期 Operation
	2016 年 3 月 Mar. ,2016	2016 年 9 月 Sept. ,2016	2019 年 5 月 May,2019
种类数 Species number	总计 58: 多毛类 34, 软体动物 10, 甲壳动物 10, 棘皮动物 2, 其他动物 2	总计 43: 多毛类 27, 软体动物 6, 甲壳动物 6, 棘皮动物 3, 其他动物 1	总计 38: 多毛类 29, 软体动物 2, 甲壳动物 3, 棘皮动物 1, 其他动物 3
生物量/ $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ Biomass	21.87	57.73	8.13
栖息密度/ $\text{ind} \cdot \text{m}^{-2}$ Density	304	266	48
优势种 Dominant species	寡鳃齿吻沙蚕、异足索沙蚕	异足索沙蚕、棒锥螺、模糊新短眼蟹	似蛭虫、梳鳃虫 sp.
多样性 H'	2.97 (2.75 ~ 3.13)	2.81 (2.07 ~ 3.03)	2.27 (1.58 ~ 3.62)
均匀度 J	0.83 (0.78 ~ 0.89)	0.86 (0.8 ~ 0.92)	0.84 (0.58 ~ 1)
丰度 d	2.26 (1.73 ~ 2.72)	1.93 (1.35 ~ 2.47)	2.05 (1.26 ~ 3.66)

与 2016 年建设前相比 (表 8), 运营期监测海域潮间带底栖生物总种类数有所增加, 多毛类增加明显, 从分布上来看, 最高栖息密度和生物量均出现在低潮区, 而建设前是中潮区的生物量

和栖息密度最高, 优势种有所增加, 最大优势种均为多毛类。总体而言, 潮间带底栖生物的群落结构有所变化, 但群落结构较稳定。

表8 建设前和运营期潮间带底栖生物海洋生态特征对比表

Tab.8 Comparison of intertidal benthos between pre – construction and operation period of the offshore wind farm

生态指标 Ecological index	建设前 Pre – construction		运营期 Operation
	2016 年 3 月 Mar. ,2016	2016 年 9 月 Sept. ,2016	2019 年 5 月 May,2019
	总计 51:		总计 58:
种类数 Species number	多毛类 23, 软体动物 14, 甲壳动物 9, 棘皮动物 2, 其他动物 3	多毛类 23, 软体动物 12, 甲壳动物 10, 其他动物 3	多毛类 31, 软体动物 14, 甲壳动物 9, 其他动物 4
生物量/ $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ Biomass	9.4	2.97	18.83
栖息密度/ $\text{ind} \cdot \text{m}^{-2}$ Density	81	31	180
优势种 Dominant species	双鳃内卷齿蚕、不倒翁虫	异足索沙蚕、寡鳃齿吻沙蚕、粗糙滨螺	粗糙滨螺、异蚓虫 sp.、婆罗囊螺、锥虫 sp.、索沙蚕 sp.、凸壳肌蛤

2.2.7 鱼卵、仔稚鱼

2016 年 3 月和 6 月的鱼卵仔鱼种类数差异不大,运营期种类数有所减少。运营期鱼卵密度有所下降,仔稚鱼密度升高。建设前和运营期

的鱼卵的共同优势种均包括鲱形目的小公鱼属,仔鱼优势种主要以鲈形目为主,优势种类变化不大。总的来说,鱼卵仔稚鱼种类和平均密度受项目的影响较小,优势种保持稳定(表9)。

表9 建设前和运营期鱼卵仔鱼海洋生态特征对比表

Tab.9 Comparison of fish eggs and larvae between pre – construction and operation period of the offshore wind farm

生态指标 Ecological index	建设前 Pre – construction		运营期 Operation
	2016 年 3 月 Mar. ,2016	2016 年 9 月 Sept. ,2016	2019 年 5 月 May,2019
鱼卵种数 Species number of fish eggs	7	7	3
仔鱼种数 Species number of larvae	7	6	4
鱼卵密度/ $\text{ind} \cdot \text{m}^{-3}$ Density of fish eggs	2.04	1.64	0.35
仔鱼密度/ $\text{ind} \cdot \text{m}^{-3}$ Density of larvae	0.87	0.75	1.45
优势种 Dominant species	鱼卵:康氏小公鱼、小沙丁鱼属 仔稚鱼:真鲷、多鳞鱈	鱼卵:梅童鱼属、鰕虎鱼 仔稚鱼:康氏小公鱼、白姑鱼	鱼卵:小公鱼、鲱、舌鳎 仔稚鱼:美肩鳃鲷、鰕虎鱼

3 讨论

目前,国内对海上风电场的环境影响研究主要是一些综述性的文章,如陈晓明等^[14]对国内外的海上风电项目在建设和运营过程中出现的环境问题进行了分析探讨,并结合东台海上风电场的建设情况,提出相应的对策措施;郑磊夫^[15]根据

我国东海大桥海上风电工程的特点,分析了海上风电场对生态环境的主要影响;陆忠民等^[16]也对海上风电项目造成的海洋生态环境影响进行了分析研究,从施工期和运营期两个角度对鸟类的影响进行了探讨。上述研究成果尚缺乏现场实测数据的支撑,本文基于福清兴化湾海上风电场一期(样机试验风场)项目运营期(2019 年 5 月)海

洋环境跟踪监测数据,结合项目建设前(2016年3月、9月)的海洋环境质量调查资料,从海水水质、海洋沉积物质量、海洋生态、渔业资源等方面,对比分析海上风电工程运营初期对海洋环境生态的影响程度,结论如下:

1) 工程运营初期,周边海域的水质指标符合第一类海水水质标准,悬浮物含量较低,沉积物质量指标符合第一类海洋沉积物质量标准,海洋生态和渔业资源的生物多样性总体较好,群落结构保持较为稳定。

2) 与建设前相比,工程营运对周边海域水质环境、沉积物质量的影响很小,未改变其质量等级,海洋生态和渔业资源的部分指标虽有所变化,但总体上未产生明显影响,其中浮游动物、潮间带底栖生物的种类数、生物量、密度等指标优于建设前。

总体而言,一期样机试验风场项目投入运营后,周边海域的海洋环境生态质量保持良好,与建设前的海域背景值相比变化很小,符合所在海域的环境保护要求。可见,海上风电工程对海洋环境生态的影响主要是在施工阶段,随着施工的结束,这些影响就会随之变小,甚至消失,风电项目对海洋环境生态的影响并不是长期的、具有严重破坏性的,是可以自行修复的。

海上风电场用海面积大,尤其建设区域邻近珍稀禽自然保护区或多种鱼类产卵场,生态环境较为敏感,运营期海洋环境跟踪监测除了水质、沉积物、生物质量、海洋生态等环境要素外,应积极开展风电营运对鸟类,以及水下噪声和电磁辐射对海洋生物的相关跟踪监测。同时,风电开发一般并非单个项目,应考虑短时期内在较小区域内密集建设海上风电场所产生的累积环境影响,而且,海上风电场运行年限长,一般可达20年之久,而本研究的时间尺度较短,风电场长期运营后对区域海洋环境生态的累积影响程度不能够体现,今后应在时间尺度上进一步扩大,对风电运营期海洋环境生态进行长期跟踪监测,从而更加完整地累积环境影响进行评价,有助于改进提高环境保护相关措施的有效性。

参考文献:

[1] 闵兵,王梦川,傅小荣,等. 海上风电是风电产

业未来的发展方向——全球及中国海上风电发展现状与趋势[J]. 国际石油经济, 2016, 24(4): 37-44.

[2] 林香红,高健,刘彬,等. 全球海上风电产业发展现状及对我国的启示[J]. 生态经济, 2014, 30(10): 82-86.

[3] 许莉,李锋,彭洪兵. 中国海上风电发展与环境问题研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2015, (S1): 146-149.

[4] 黄维学,方涛. 我国海上风电发展现状、问题和措施[J]. 一重技术, 2011, (4): 5-7.

[5] Fielding A H, Whitfield D P, Mcleod D R A. Spatial association as an indicator of the potential for future interactions between wind energy developments and golden eagles *Aquila chrysaetos* in Scotland[J]. Biological Conservation, 2006, 131(3): 359-369.

[6] Garthe S, Huppop O. Scaling possible adverse effects of marine wind farms on seabirds: developing and applying a vulnerability index[J]. Journal of Applied Ecology, 2004, 41(4): 724-734.

[7] Drewitt A L, Langston R H W. Assessing the impacts of wind farms on birds[J]. Ibis, 2006, 148(s1): 29-42.

[8] Wahlberg M, Westerberg H. Hearing in fish and their reactions to sound from offshore wind farms[J]. Marine Ecology Progress Series, 2005, 288(1): 295-309.

[9] 张玮,王斌,夏海峰. 近海风电场风机桩群布局对海域水动力条件的影响[J]. 中国港湾建设, 2007, (2): 1-4.

[10] 国家海洋局. 建设项目海洋环境影响跟踪监测技术规程[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.

[11] 国家质量监督检验检疫总局和国家标准委员会. GB/T 17378—2007 海洋监测规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.

[12] 国家质量监督检验检疫总局和国家标准委员会. GB/T 12763—2007 海洋调查规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.

[13] 环境保护部. HJ 442—2008 近岸海域环境监测规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.

[14] 陈晓明,王红梅,刘燕星,等. 海上风电环境影响评估及对策研究[J]. 广东造船, 2010, (6): 27-32.

[15] 郑磊夫. 海上风电工程生态环境影响及对策[J]. 上海电力, 2007, (2): 136-139.

- [16] 陆忠民, 张志宏, 徐凌云, 等. 海上风电场对鸟类行为的影响分析 [J]. 水利规划与设计, 2014, (1): 5-8.

Primary research on the impacts of marine environment ecology from the offshore wind farm operation

——A case study of the experimental offshore wind farm in Fuqing Xinghua Bay

ZHANG Hua, WU Jiachen, HE Ping

(Fuqing Strait Power Generation Company, Fuzhou 350003, China)

Abstract: For the project of the experimental offshore wind farm in Fuqing Xinghua Bay, based on the marine environment monitoring between pre-construction and operation period, we analysed and discussed the impacts of environmental factors (e.g. water quality, sediment quality, marine ecology, and fishery resources) during the project implement. We found that the marine environmental ecology impacts of the experimental offshore wind farm operation were in forecast range, and the influence level of some indices were better than prediction.

Key words: Xinghua Bay; offshore wind farm; environmental ecology impact; operation phase