海上风电磁场对 12 种海洋生物存活率与行为的影响

袁健美 贲成恺 高继先 于雯雯 张 虎* 刘培廷 吴杨平
(江苏省海洋水产研究所, 江苏南通 226007)

摘 要 海上风电磁场主要由风电场运行中海底电缆产生,其对海洋生物产生的影响目前研究报道较少。为了掌握风电磁场是否对临近海域及养殖环境中的海洋生物产生影响,本研究以如东龙源风电示范区为例,选取江苏近海常见 12 种海洋生物,通过实验方法研究不同磁场强度(试验Ⅰ:1.00 mT;试验Ⅱ:0 mT、(0.045±0.01) mT、(0.20±0.01) mT、(0.90±0.01) mT、(4.05±0.01) mT、对照(自然地磁场))下,风电磁场对鱼、虾、蟹和贝类的存活、行为等方面的影响。结果表明:当磁场为 1.00 mT 时,黑鲷存活和行为在短期内(21 d)受磁场影响明显,试验组与对照组存活率差异显著($P<0.05$),磁场撤销后 14 d 内无显著性差异($P>0.05$);试验Ⅱ中,受试生物(黑鲷、半滑舌鳎、文蛤)的存活率仅在(4.05±0.01) mT 磁场暴露下的试验组与对照组差异显著($P<0.05$);受试生物(纵肋织纹螺、半滑舌鳎、天津厚蟹)的行为在(4.05±0.01) mT 磁场下试验组与对照组间均存在差异显著($P<0.05$)。由此可见:短期内(21 d),风电磁场对几种海洋生物的存活、行为有一定的影响,撤销磁场后影响消失。

关键词 风电磁场; 海底电缆; 江苏近岸; 海洋生物

Effects of magnetic field of offshore wind farm on the survival and behavior of marine organisms.

YUAN Jian-mei, BEN Cheng-kai, GAO Ji-xian, YU Wen-wen, ZHANG Hu*, LIU Pei-ting, WU Yang-ping (*Jiangsu Marine Fisheries Research Institute*, *Nantong* 226007, *Jiangsu*, *China*).

Abstract: Magnetic field of wind farm is mainly generated by the submarine cables in the operation of wind farm, and its effects on marine organisms have been less studied. In order to know whether the marine organisms in adjacent sea areas and in aquaculture environment were affected by magnetic field generated during the operation of wind farm, we took Rudong Longyuan windpower demonstration area as an example and selected 12 economic categories of marine organisms along the coastal water of Jiangsu. Six intensities of magnetic field (Test Ⅰ: 1.00 mT; Test Ⅱ: 0 mT, (0.045±0.01) mT, (0.20±0.01) mT, (0.90±0.01) mT, (4.05±0.01) mT, and ambient magnetic field (CK)) were installed to check their influence on the survival and behavior of marine organisms. Significant difference ($P<0.05$) was detected on survival rate and behavior of fish *Acanthopagrus schlegeli* between 1 mT magnetic field (21 days) group and control group, but such effects disappeared 14 days after removal of the magnetic field. The survival rates of fish *Acanthopagrus schlegeli*, *Cynoglossus semilaevis* and shellfish *Meretrix meretrix* in (4.05±0.01) mT magnetic field group showed significant difference ($P<0.05$) compared with control group. The avoidance behaviors of shellfish *Nassarius variciferus*, fish *Cynoglossus semilaevis* and crab *Helice tientsinensis* in (4.05±0.01) mT magnetic field had significant differences ($P<0.05$) compared with control group. The results indicated that magnetic field of wind farm had tangible impacts on the survival and behavior of marine organisms in short term (21 days) but such effects disappeared after removal of the magnetic field.

Key words: magnetic field of wind farm; submarine cable; coastal water in Jiangsu Province; marine organism.

2013 年海洋与渔业资源环保专项苏海计【2013】50 号、2014 年海洋与渔业资源环保工作任务苏海计【2014】11 号项目和国家自然科学基金项目(41471431)资助。
收稿日期: 2016-03-11 接受日期: 2016-07-29
*通讯作者 E-mail: ahu80@163.com

海上风电磁场主要由海上风机产生的磁场、升压站产生的磁场、海底电缆产生的磁场(Faria *et al.*, 2006; Ohman *et al.*, 2007)3 部分组成。近年来,伴随着海上风电场的开发建设,海底电缆数量急剧上升,除了风电场施工建设对海洋生态环境产生影响外,海上风电场运行所产生的电磁辐射也成为了一个值得关注的环境问题(Sigray *et al.*, 2011; Andersson *et al.*, 2012)。有关海上风电场海底电缆的磁场效应国内外已有相关研究(Bochert *et al.*, 2006; Ohman *et al.*, 2007)。部分研究结果显示,某些海洋生物会受一定强度、时间作用磁场的影响,但并不意味着风电场正常运行产生的磁场一定对所有海洋生物造成不利影响(Gill *et al.*, 2010; Reubens *et al.*, 2014)。从目前的研究结果来看,风电场区海底电缆磁场效应是否对于生物幼体,尤其是定期性和营底栖的鱼类、虾蟹类、贝类等生物幼体存活和生长产生影响,还鲜有研究报道。本研究以龙源如东海上风电场为例,通过实验模拟风电场海底电缆产生的磁场环境,以江苏近海潮间带常见海洋生物及风电场周边养殖生物为试验对象,研究探讨风机运行及事故状态下风电场海底电缆所产生磁场是否对临近海域及养殖环境中的海洋生物产生影响,以期为后期风电场工程环境影响评价和潜在风险评估提供参考。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

如东龙源风电示范区海底电缆采用铜导体 3 芯交联聚乙烯绝缘分相铅护套钢丝铠装海底光电符合缆,系统额定电压 35 kV,短路电流 1200 A,系统频率 50 Hz。在风机运行过程中对海底电缆开展了实际测量,海上测量水深 5.00~10.00 m,海底电缆埋深 2.00 m。根据理论公式 $B=(\mu\times I)/(2\pi\times\alpha)$($\mu=4\pi\times10^{-7}$ Hm^{-1}; I 为通过电缆的电流; α 为与电缆的距离)(Bochert *et al.*, 2004)计算获得距离电缆 0.10~6.00 m的磁场强度约在0.04~2.40 mT;距离风机 1.00 m 左右附近磁场强度为数百 nT。海底电缆产生的磁场强度大小与线路的电压等级、运行电流、导线排列、与线缆距离及周围环境有关(Bresesti *et al.*, 2007)。一般来说,磁场强度随着与电缆距离加大而急速的降低。本例所使用的 1200 A 行标电缆在电缆不同距离处产生的理论磁场强度如表 1。

表 1 1200 A 行标电缆不同距离处的磁场强度

Table 1 Magnetic field strength at different distances of standard cable for 1200 A

与电缆距离(m)	风电磁场强度(mT)
0.10	2.40
1.00	0.24
4.00	0.08
6.00	0.04

表 2 风电磁场梯度

Table 2 Magnetic field gradient of wind farm

梯度	风电磁场 B (mT)	理想状态下与电缆的距离(m)	模拟区域/状态
Ⅰ	0±0.01	抵消地磁场的零磁空间	-
Ⅱ	0.045±0.01	5.30	游泳生物
Ⅲ	0.20±0.01	1.20	底栖贝类
Ⅳ	0.90±0.01	0.27	电缆自身
Ⅴ	4.05±0.01	-	事故状态
CK	地磁场	-	-

1.2 磁场发生装置

本试验在江苏省海水增养殖技术及种苗中心育苗房内开展,利用空闲的养殖池作为试验区,各梯度试验占地面积一致(4.00 m×5.00 m)、间距相等(0.30 m),图 1 为室内各试验梯度布局示意图。

试验分 2 次进行,试验Ⅰ设置 1 个风电磁场 1.00 mT(模拟电缆 0.30 m 处磁场)及 1 个对照组 CK(自然地磁场);试验Ⅱ共设置 5 个梯度磁场暴露组(表 2)及一个对照组 CK(自然地磁场)。磁场发生装置选用亥姆赫兹线圈($R=0.45$ m),即能在线圈中心产生平行于地面方向的恒定磁场,磁场的强

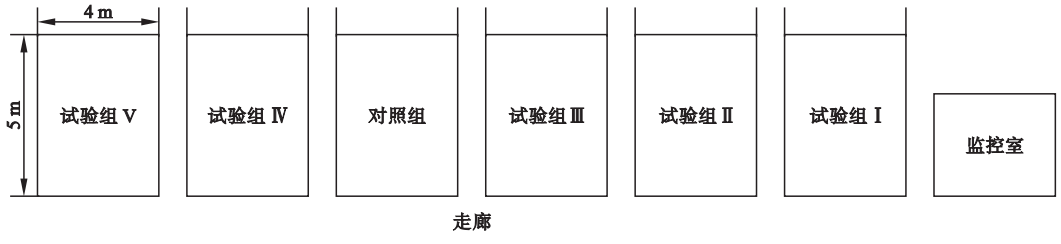


图 1 各试验梯度布局图

Fig.1 Sketch map of magnetic field gradient devices

表 3 试验生物
Table 3 Experimental organisms

海洋生物	学名	规格	来源
黑鲷	*Acanthopagrus schlegeli*	20~30 mm	
		80~100 mm	
半滑舌鳎	*Cynoglossus semilaevis*	60~80 mm	
脊尾白虾	*Palaemon carinicauda*	40~51 mm	
文蛤	*Meretrix meretrix*	0.25~0.60 g	江苏省海水增养殖技术及种苗中心
纵肋织纹螺	*Nassarius variciferus*		
细螯寄居蟹	*Clibanarius* sp.		吕四近岸
黑褐新糠虾	*Neomysis awatschensis*		
口虾蛄	*Oratosquilla oratoria*		
三疣梭子蟹	*Portunus trituberculatus*		
天津厚蟹	*Helice tientsinensis*		
斑尾刺虾虎鱼	*Acanthogobius ommaturus*		
中华仙影海葵	*Cereus sinensis*		

度范围 0~5.00 mT,通过调节进入线圈的电流大小来实现,经过安全测试,装置可循环维持 24 h 不间断工作,磁场发生装置由上海海洋大学制作。试验区无其他大型电磁场发生装置。

1.3 试验生物及试验方法

根据风电场邻近海域优势种及江苏近海养殖品种结合试验研究可操作性筛选了以下试验生物(表 3)。

试验分两次进行,第一次试验(试验Ⅰ)主要测试了风电磁场(1.00 mT)对海水鱼(黑鲷全长 20~30 mm、3 组平行)存活、行为的影响,于 2014 年 5—7 月开展。室内海水温度 22.6~27.2 ℃、海水比重 1.017~1.018、pH 8.02~8.31、溶氧 5.4~7.0 mg·L^{-1}。磁场开启后前 21 天暴露磁场,第 22~35 天撤销磁场常规养殖。每日定时观察鱼类的行为取向,采集影像资料。第二次试验(试验Ⅱ)在 2014 年 10—11 月开展,室内海水温度 15.6~18.2 ℃、海水比重 1.016~1.018、pH 8.08~8.38、溶氧 5.60~7.10 mg·L^{-1}。试验Ⅱ主要开展了以下几项内容:1)风电模拟磁场对海洋生物(文蛤 3 个平行、半滑舌鳎 2 个平行、黑鲷 2 个平行)存活的影响研究(30 d);2)风电模拟磁场对 3 种海洋生物(半滑舌鳎、天津厚蟹、纵肋织纹螺)回避行为的影响研究(1 d);3)风电模拟磁场对黑褐新糠虾、斑尾刺虾虎鱼、脊尾白虾、口虾蛄、三疣梭子蟹、斑尾刺虾虎鱼、中华仙影海葵等 7 种海洋生物的急性影响(6 d);

1.4 数据处理

采用 SPSS 19.0 和 Excel 软件进行数据分析。回避率采用以下方式计算,回避率=$(E-A)/(E+A)\times 100\%$(侯兰英等,1993),其中 E 为进入自然环境一侧的生物个体数,A 为停留在磁场暴露一侧的生物个体数。存活率和回避率数据表示为平均数±标准偏差(AV±SD),采用单因素方差分析(ANOVA)比较各处理差异,然后再进行多重比较(LSD 法)(董兆克等,2013)。

2 结果与分析

2.1 电缆磁场对 3 种海洋生物存活率的影响

1 mT 磁场试验中,黑鲷存活率短期内受磁场影响明显(表 4)。试验Ⅰ结果显示:第 1~7 天存活率降低明显,第 8~14 天开始恢复,前 21 天磁场暴露下试验鱼与对照组之间的存活率存在显著性差异($P<0.05$);撤销磁场后 14 天内试验组和对照组无显著性差异($P>0.05$)。

试验Ⅱ结果显示(表 5):相同磁场强度下不同生物的影响结果各有差异。从显著性差异来看,黑鲷、半滑舌鳎、文蛤在梯度Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ与对照组之间均没有显著性差异($P>0.05$),黑鲷、半滑舌鳎在梯度Ⅴ与对照均存在显著性差异($P<0.05$)。

表 4 1 mT 磁场暴露下黑鲷的存活率(%)
Table 4 Survival rate of *Acanthopagrus schlegeli* in magnetic field exposure of 1 mT (%)

试验条件	CK	1 mT
M 7 天	98.19±1.12 a	75.76±0.98 b
M 14 天	98.44±1.38 a	92.50±0.61 b
M 21 天	98.45±1.23 a	99.87±0.23 b
N 7 天	99.97±0.03 a	99.96±0.07 a
N 14 天	99.72±0.49 a	99.93±0.12 a

M 为磁场暴露,N 为撤销磁场;同一行内,不同字母表示差异显著 $P<0.05$。

表 5 风电磁场影响下海洋生物的存活率(%)
Table 5 Survival rate of marine organisms in magnetic field (%)

海洋生物	CK	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ
黑鲷	97.00±1.41 a	97.01±2.83 a	97.02±1.41 a	95.70±2.83 a	91.40±1.98 b	87.00±2.83 b
半滑舌鳎	91.70±1.27 a	89.60±2.55 ab	91.70±0.14 a	93.75±2.90 ac	87.55±1.20 ad	85.40±0.99 b
文蛤	96.11±0.96 ab	96.11±4.19 ab	96.11±3.47 ab	99.44±0.96 a	96.67±3.33 ab	93.90±3.47 b

不同小写字母表示个体间差异显著($P<0.05$)。

2.2 风电磁场对 4 种海洋生物行为的影响

风电磁场 1 mT 影响下的黑鲷鱼苗表现活跃,行为、觅食表现异常(图 2 左);试验Ⅰ结果:对照组的黑鲷鱼苗均匀分布,行为、觅食等表现正常(图 2 右)。

试验过程中发现,磁场暴露组的黑鲷鱼苗集中在水体中上层,有集体浮出水面的意向,动作频率幅度大,部分鱼冲撞鱼缸底玻璃,区别于正常的觅食行为。相同时刻,对照组的鱼苗均匀分布于水体中,觅食过程中轻触玻璃缸底,动作频率和幅度表现正常。撤销磁场 1 min 后,磁场暴露组的鱼活力不及对照组的实验鱼,游向杂乱。风电场特征磁场停止 10 min 后,原风电磁场暴露及对照组试验鱼行为之间无明显差异。

不同磁场强度下生物的影响结果各有差异。试验Ⅱ结果:纵肋织纹螺在梯度Ⅱ、Ⅲ、Ⅴ与对照之间存在显著性差异($P<0.05$);半滑舌鳎仅在梯度Ⅴ与对照之间存在显著性差异($P<0.05$);天津厚蟹各梯度与对照之间均存在显著性差异($P<0.05$);3 个不同种类的生物在梯度Ⅴ与对照之间均存在显著性差异($P<0.05$)(表 6)。

2.3 风电磁场对其他 7 种海洋生物存活率与行为的影响

试验所选取的其他 7 种海洋生物的存活及行为与对照组相比见表 7。磁场暴露下黑褐新糠虾的存活率与对照之间均存在显著性差异($P<0.05$),其行为以及其他 6 种生物的行为和存活未出现明显差异。

3 讨 论

3.1 风电磁场对海洋鱼类的影响

1.00 mT 强度磁场暴露对黑鲷的存活率和行为有一定影响,撤销磁场后,影响消失。1.00 mT 风电磁场作用下,黑鲷幼鱼集中分布在水体中上层,有集体浮出水面的意向,动作频率幅度大;少数鱼冲撞鱼缸底玻璃,区别于正常的觅食行为;撤销磁场 10 min 后,受试生物行为恢复正常,该现象区别于极低频磁

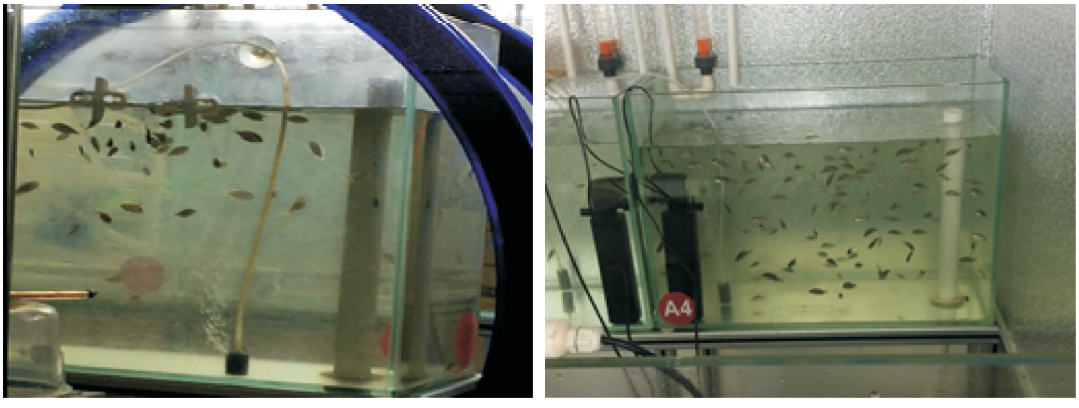


图 2 1 mT 风电磁场影响下海水鱼类行为表现
Fig.2 Behavior of *Acanthopagrus schlegeli* in 1 mT magnetic field

表 6 风电磁场影响下生物的回避率(%)
Table 6 Avoidance behavior of marine organisms in magnetic field

海洋生物	CK	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ
纵肋织纹螺	46.25±0.09 ac	43.25±0.11 a	32.00±0.13 ab	30.50±0.03 b	52.00±0.01 c	33.00±0.10 ab
半滑舌鳎	42.10±0.11 a	35.50±0.20 a	42.10±0.11 a	48.70±0.10 a	43.80±0.13 a	23.80±0.09 b
天津厚蟹	33.30±0.06 a	64.40±0.15 b	52.20±0.08 c	47.80±0.09 c	21.70±0.07 d	47.80±0.12 c

不同小写字母表示个体间差异显著($P<0.05$)。

表 7 风电磁场对其他 7 种海洋生物的影响
Table 7 Influence of magnetic field on seven marine organisms

类群	海洋生物	学名	试验指标	是否具有明显差异
鱼类	斑尾刺虾虎鱼	*Acanthogobius ommaturus*	存活/行为	否/否
甲壳类	脊尾白虾	*Palaemon carinicauda*	存活/行为	否/否
	黑褐新糠虾	*Neomysis awatschensis*	存活/行为	是/否
	口虾蛄	*Oratosquilla oratoria*	存活/行为	否/否
	三疣梭子蟹	*Portunus trituberculatus*	存活/行为	否/否
	细螯寄居蟹	*Clibanarius* sp.	存活/行为	否/否
腔肠动物	中华仙影海葵	*Cereus sinensis*	存活/行为	否/否

场对罗非鱼行为的影响结果(汝碧潇,2012),推测原因可能是磁场的强度、作用时间及试验对象的不同导致结果的差异。1.00 mT 风电磁场作用于黑鲷鱼苗的瞬时(或短期内)有可能对鱼苗中枢神经、酶系统等产生急性效应,一定程度影响鱼苗的摄食及消化功能等,造成局部死亡。1.00 mT,距离海底电缆 0.30 m 处磁场,约为该鱼类正常栖息水域磁场值的 100 倍,该特征范围磁场影响下的海水鱼类试验研究目前尚未见报道。有学者曾对磁水的生物效应进行研究,发现磁场和磁场处理(0.07 T)水养殖可以提高恶劣条件下奥里亚罗非鱼等的生长性能(谢瑞生等,1991;姜景田等,2004;宋吉德,2004)。与此同时,鱼苗自身产生应激机制抵御该环境,从而使存活下来的鱼苗产生了较强的抗逆性,并且磁场的生物效应可能存在着一定的滞后性(刘宪亭等,1981;章之蓉等,1987)。

随着风电磁场强度增强(0~4.05 mT),黑鲷、半滑舌鳎的存活率受磁场影响加剧(呈现降低的趋势);0.20 mT(距离海底电缆 1.20 m 外)是黑鲷、半滑舌鳎能耐受的磁场。该范围主要是营底栖游泳生物的生活区域,从实验结果可初步判断黑鲷、半滑舌鳎存活率的磁场耐受范围。并推测栖息在该范围(即距离海底电缆 1.20 m 外)的海洋鱼类受风电磁场影响不明显。磁场强度 4.05 mT 对黑鲷、半滑舌鳎的存活率影响明显,该磁场状态远高于海底电缆正常运行产生的磁场强度,假设为事故状态下的模拟,该磁场范围超过海洋鱼类耐受的磁场范围,出现了明显的应激反应,可作为海上风电场预警预防措施制定的数据参考。

3.2 风电磁场对海洋底栖贝类的影响

纵肋织纹螺回避行为受磁场影响明显。24 h 之内,4.05 和 0.90 mT 暴露条件下的纵肋织纹螺分别有 8.30%和 3.30%逃离了试验缸,剩余部分均分布于试验缸边缘。其余梯度试验缸的生物分布较为均匀,未发生逃离现象,该现象与 Bochert 等(2004)及 Gill(2005)研究结果相似。Bochert 等(2004)发现,在 2.70 mT 的静电磁场中短期暴露,底栖生物会出现集中栖息在试验磁场的水族箱壁上,有逃离这个磁场的意向。某些生物可以耐受一定强度范围内的磁场,而超过特定强度的磁场会造成生物的逃逸(Gill,2005)。

文蛤对磁场的耐受性较好。试验结果显示其磁场耐受范围为 0.90 mT(电缆自身磁场),文蛤存活率仅在梯度Ⅴ(4.05 mT)受一定影响,呈现降低的趋势,说明事故状态模拟磁场会造成文蛤存活率下降,而风电场在正常运行中海底电缆产生的磁场对文蛤的存活率不存在影响。长期暴露于静电磁场的海洋底栖动物可以在 3.70 mT 的静电磁场中生存 28 d 以上,而且其生殖腺和繁殖期指数和对照并无显著差异;3.70 mT 静电磁场下幼体鲽鱼的生长未受影响(Bochert *et al.*,2004),在海底电缆的静磁场作用下,海洋底栖动物的取向、运动和生理并没有明显响应,本研究结果与之相似,但该范围风电磁场是否对营底栖贝类(如文蛤)的胚胎发育产生影响,需进一步的研究佐证。有研究发现,暴露在静态磁场中海胆,通过延迟早期的有丝分裂而改变胚胎的发育状况(Levin *et al.*,1997)。

3.3 风电磁场对海洋底栖虾蟹类的影响

磁场暴露下黑褐新糠虾的存活率有所降低,梯度Ⅴ(4.05 mT)表现尤为明显,与对照相比,其存活率显著降低(降低了 10.53%)。脊尾白虾、口虾蛄、三疣梭子蟹、寄居蟹等其他 4 种虾蟹类存活率未受磁场影响。不同种类生物对磁场的耐受性各有差异,黑褐新糠虾日常喜降至海水底层栖息,经常被作为海洋污染毒性研究的指示生物(刘瑞玉等,1979),虽然试验所设置的磁场范围对其未出现急性致死效应,但其对磁场的反应是虾蟹类中最为敏感的一种,充分突显了其海洋标准实验生物的地位。

天津厚蟹的回避行为受磁场影响明显。推测其对磁场的感受较敏感(Gill,2005),也有可能是其特有的生活习性对外界干扰常伴有应激反应。梯度Ⅴ(4.05 mT)该磁场假设为事故状态下的模拟磁场,生物的回避行为短期内受到一定的影响,该状态是否会造成海洋生物繁殖、产卵的影响,是否会累积在生物体内,我们不得而知? 某些小型淡水鱼类,如虹鳉(*Poecilia reticulata*),在 50 mT 的磁场强度连续作用下能存活 200 d,但是二代的产卵率会下降 50%,到第三代产卵率完全受抑制(Brewer,1979;Formicki *et al.*,1998)。如果试验条件许可对生物进行多代连续观测,能获取更可靠的试验数据及影响说服力。

综上所述,海洋生物因风电磁场强度、距离、作用时间不同会产生细微变化,虽然这些变化极其微小,但是仍可以作为风电场工程环境影响评价和潜在风险评估的数据参考,并为进一步深入研究打下了基础。从目前的研究结果来看,研究的重复性、再现性差;研究的针对性、系统性、可操作性弱;研究的可变性大,各类研究结果之间存在一定的争议(Andersson,2011;Sigray *et al.*,2011),因此仍需要进行更多的研究,尤其是针对近海养殖品种和近海潮间带常见物种,进行风电磁场影响多方面、连续、世代研究。

致 谢 感谢江苏省海水增养殖技术及种苗中心提供的试验场地,张曹进、陈爱华及吴建平老师在试验过程给予了帮助,张志伟博士在英文摘要写作中给予了指点,感谢上海海洋大学张硕教授对论文提出的修改意见。

参考文献

董兆克, 戈 峰. 2013. 磁场对棉铃虫生长发育及繁殖的影响. 生态学杂志, **32**(3): 1265-1268.

侯兰英, 赵鸿儒, 吴玉霖. 1993. 几种重金属对梭鱼的急性致毒及梭鱼回避反应的试验研究. 海洋与湖沼, **24**(5): 507-510.

姜景田, 李 秋, 邹胜利. 2004. 磁化水对家鱼胚胎发育的影响. 黑龙江水产, (3): 40-42.

刘瑞玉, 王绍武. 1979. 中国动物志-节肢动物门-甲壳动物亚门-糠虾目. 北京: 科学出版社: 220-222.

刘宪亭, 鲁大椿, 孙小异, 等. 1981. 磁水对莫桑鼻克罗非鱼生长的作用效果. 淡水渔业, (3): 34-37.

汝碧潇. 2012. 极低频电磁场对罗非鱼生长影响及其机制探讨. 湖北: 华中科技大学.

宋吉德. 2004. 磁化水对皱纹盘鲍生长影响的研究. 海洋渔业, (2): 116-121.

谢瑞生, 章之蓉, 翁少萍. 1991. 磁场和磁场处理水对奥利亚罗非鱼(*Tilapia aurea*)生长和耐寒力的影响. 生物物理学报, (3): 404-411.

章之蓉, 谢瑞生, 肖丽莹, 等. 1987. 磁场和磁场处理水对罗非鱼生长的影响. 热带海洋, (1): 91-93.

Andersson MH, Ingvar L, Sigray P. 2012. Do ocean-based wind farms alter the migration pattern in the endangered European silver eel (*Anguilla anguilla*) due to noise disturbance. *Advances in Experimental Medicine & Biology*, **730**: 393-398.

Andersson MH. 2011. Offshore wind farms: Ecological effects of noise and habitat alteration on fish. Stockholm: Stockholm University.

Bochert R, Zettler ML. 2004. Long-term exposure of several marine benthic animals to static magnetic fields. *Bioelectromagnetics*, **25**: 498-502.

Bochert R, Zettler ML. 2006. Effect of electromagnetic fields on marine organisms// Offshore Wind Energy: Research on Environmental Impacts. Berlin: Springer-Verlag.

Bresesti P, Kling WL, Hendriks RL, *et al*. 2007. HVDC connection of offshore wind farms to the transmission system. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, **22**: 37-43.

Brewer HB. 1979. Some preliminary studies of the effects of a static magnetic field on the life cycle of the *Lebistes reticulatus* (guppy). *Biophysical Journal*, **11**: 305-314.

Faria JB, Neves MGD. 2006. Accurate evaluation of indoor triplex cable capacitances taking conductor proximity effects into account. *IEEE Transactions on Power Delivery*, **21**: 1238-1244.

Formicki K, Winnicki A. 1998. Reactions of fish embryos and larvae to constant magnetic fields. *Italian Journal of Zoology*, **65**: 479-482.

Gill AB, Bartlett MD. 2010. Literature review on the potential effects of electromagnetic fields and subsea noise from marine renewable energy developments on Atlantic salmon, sea trout and European eel. Scottish Natural Heritage Commissioned Report No. 401. School of Applied Sciences: Staff Publications.

Gill AB. 2005. Offshore renewable energy: Ecological implications of generating electricity in the coastal zone. *Journal of Applied Ecology*, **42**: 605-615.

Levin M, Ernst SG. 1997. Applied DC magnetic fields cause alterations in the time of cell divisions and developmental abnormalities in early sea urchin embryos. *Bioelectromagnetics*, **18**: 255-263.

Ohman MC, Sigray P, Westerberg H. 2007. Offshore windmills and the effects of electromagnetic fields on fish. *Ambio*, **36**: 630-633.

Reubens JT, Rijcke MD, Degraer S, *et al*. 2014. Diel variation in feeding and movement patterns of juvenile Atlantic cod at offshore wind farms. *Journal of Sea Research*, **85**: 214-221.

Sigray P, Andersson MH. 2011. Particle motion measured at an operational wind turbine in relation to hearing sensitivity in fish. *Journal of the Acoustical Society of America*, **130**: 200-207.

作者简介 袁健美,女,1983 年生,助理研究员,主要从事渔业资源与生态研究。E-mail: yjm-368@163.com

责任编辑 李凤芹