

Doi: 10.11840/j.issn.1001-6392.2020.03.002

海上风电工程对海洋生物影响的研究进展

苏文^{1,2}, 吴霓¹, 章柳立¹, 陈绵润¹

(1. 国家海洋局南海规划与环境研究院, 广东 广州 510300;

2. 国家海洋局南海维权技术应用与重点实验室, 广东 广州 510300)

摘 要: 随着世界各国对能源安全、生态环境、气候变化等问题日益重视, 加快发展风电已成为国际社会推动能源转型发展、应对全球气候变化的普遍共识和一致行动。过去十余年, 我国海上风电产业受益于国家政策的大力推动而蓬勃发展, 大有乘势崛起, 赶超其他清洁能源的势头。相比陆上风电场, 海上风电场对环境的影响较小, 但其开发实施以及运行对海洋生态环境和资源开发的累积影响还尚不明确。本文系统全面地梳理了海上风电工程对鸟类、鱼类、海洋哺乳动物、底栖生物、浮游生物及海洋生物多样性等影响的研究进展, 总结了海上风电环境影响研究的现状。结合我国实际, 提出了将科学研究与海上风电工程环境影响评价紧密结合, 开展海上风电项目对区域生态环境影响的研究等有关建议。

关键词: 海上风电; 生态环境; 海洋生物

中图分类号: P75; X820.3

文献标识码: A

文章编号: 1001-6932(2020)03-0291-09

A review of research on the effect of offshore wind power project on marine organisms

SU Wen^{1,2}, WU Ni¹, ZHANG Liuli¹, CHEN Mianrun¹

(1. South China Sea Institute of Planning and Environmental Research, SOA, Guangzhou 510310, China; 2. Key Laboratory of Technology and Application for Safeguarding of Marine Rights and Interests, SOA, Guangzhou 510310, China)

Abstract: With the increasing attention paid to energy security, ecological environment, climate change and other issues around the world, accelerating the development of wind power has become a general consensus and concerted action of the international community to promote energy transformation and development and to respond to global climate change. Over the past decade, flourished offshore wind power industry in China has benefited from the vigorous promotion of national policies. It has the potential to catch up with other clean energy sources. Compared with onshore wind farms, offshore wind farms have less impact on the environment, but the cumulative impact of their development, implementation and operation on the marine ecological environment and resource development are not fully explored. The present study systematically reviews the research on the effects of offshore wind power projects on birds, fishes, marine mammals, benthos, plankton and marine biodiversity, and summarizes the current situation of research on the impact of offshore wind power on the environment. Based on the actual situation in China, some suggestions are made, such as combining scientific research with environmental impact assessment of offshore wind power projects, and carrying out research on the impact of offshore wind power projects on regional ecological environment.

Keywords: offshore wind power; ecological environment; marine organisms

收稿日期: 2019-08-24; 修订日期: 2019-10-09

基金项目: 国家自然科学基金 (31500411); 国家海洋局南海维权技术与应用重点实验室开放基金 (1722); 海洋公益性行业科研专项 (201405007; 201505008); 2019 年广东省促进经济高质量发展专项资金海洋经济发展项目 (广东省海域定级研究, GDOE [2019] A46)

作者简介: 苏文 (1985-), 博士, 高级工程师, 主要从事污染生态学方面的研究。电子邮箱: wensu2000@gmail.com

通讯作者: 吴霓, 博士, 工程师, 主要从事海洋生态环境保护研究。电子邮箱: soonhai@126.com

1991年,丹麦在Vindeby建成了世界上第一个海上风电场,随后,荷兰、瑞典、英国等相继建成了海上风电场。2009年,我国东海大桥海上示范风电场建成。截至2017年底,欧洲继续保持全球最大海上风电市场地位,全球近84%的海上风电设施位于11个欧洲国家的近海水域。英国的海上风电装机容量全球第一,累计装机容量6836 MW,占全球装机容量的36.3%,其次是德国,中国以2788 MW累计装机容量位居全球第三。虽然我国海上风电起步较晚,但是近年来凭借海风资源的稳定性和大发电功率的特点,海上风电正在我国沿海各地飞速发展。

海上风电场的开发建设规模较大,项目的建设期和运营期将给海洋生态环境造成一定的影响。例如,项目建设期,水下打桩噪声会对鱼类和其他海洋生物产生影响(Abbott, 2002; Kilfoyle, 2018),工程建设施工或铺设海底输电电缆,会影响水质、沉积物、鸟类、鱼类、浮游生物(Bray et al, 2016)和底栖生物(Coates et al, 2014);项目运营期,风机叶片运动和噪声等会影响鸟类的栖停迁飞,风机会带来噪声污染,变电所和输电线路会带来电磁辐射等。系统全面、科学客观地掌握国内外海上风电对海洋生物影响的研究进展,对促进海上风电行业和海洋环境保护的协同发展具有深远的意义。

1 海上风电工程对鸟类的影响

风电场建设期桩基安装的噪声、运营期涡轮机叶片碰撞及风电场的电磁场都会对鸟类产生影响,主要体现在以下4个方面:(1)影响鸟类行为,例如使鸟类产生趋避行为;(2)影响鸟类栖息地和觅食;(3)由于风机干扰或者形成屏障,影响鸟类迁徙;(4)碰撞引起的死亡。目前国内外研究表明,海上风电建设期,鸟类会产生趋避行为,但是随着时间的推移,鸟类对风电场内的环境会产生适应性,只要海上风电选址避开鸟类栖息地,海上风电对鸟类栖息和觅食的影响相对较小,鸟类与风机碰撞导致的死亡率与鸟的种类、年龄、飞行经验、天气状况及风力发电场本身的特性有关。大量统计数据表明,海上风电不会引起鸟类的严重碰撞(Pettersson, 2005)。

国外学者在21世纪初就已开展了风电对鸟类影响的相关研究。Erickson等(2001)认为,风机对鸟类确实有驱赶作用,但不会对其数量有太大影响,与死于飞机、汽车、架空电线、通讯塔等人工设备的鸟类数量相比,死于风电场环境下的鸟类数量很少。Pettersson(2005)对瑞典Kalmar Sound两个近岸风机附近的鸟类进行观测,结果显示,在1500万只迁徙的水鸟中,仅发生了一次撞击事件。

另外一些研究表明,鸟类的规避行为并不确定,会随着时间的推移而发生变化,例如一些鸟类对风电场建成后的生境会产生适应性。Desholm等(2005)通过雷达跟踪监测了丹麦南部Nysted海上风力发电场对周围20多万只鸟秋季昼夜迁移的影响,研究发现海上风电建设后鸟类进入风电区域的比例显著下降,并出现了大规模的主动回避行为。据数据统计,在迁移到足够靠近涡轮机的地方,有可能发生碰撞的鸟类所占比例不到1%。Pertersen等(2007)对Horns Rev海上风电场区域内的黑海番鸭调查发现,黑海番鸭在风电场建成初期有规避行为,然而3年后的调查显示,黑海番鸭在该海域觅食的现象已很常见,种群数量达到当地种群的50%以上,黑海番鸭已习惯了在风电场区域觅食。除此之外,小鸥(*Larus minutus*)和普通燕鸥(*Sterna hirundo*)也对风电场内的环境产生了适应性。

Cook等(2012)收集了欧洲32个已建、在建和拟建的海上风电对鸟类影响的40份数据材料(主要来源于项目环境影响评价),总共涉及39种40多万只鸟,重点统计了鸟类飞行高度和碰撞死亡率,结果显示在海拔20~150 m时,鸟类碰撞死亡率为0.03%~33.1%。Furness等(2013)建立了鸟类海上风电场碰撞指数和规避行为指数研究体系,研究表明,海鸥、白尾鹰、北方塘鹅和贼鸥最容易与风电场发生碰撞死亡,潜鸟科鸟类和黑海番鸭最容易流离失所。风电场除了通过碰撞、干扰等方式直接影响鸟类外,也会通过影响一些鸟类的饵料鱼类而间接对鸟类的捕食和繁殖造成影响,研究表明,美国诺福克建设期安装风电场桩群时影响到白额燕鸥(*Sternula albifrons*)主要的饵料小鲱鱼的繁殖,进而致使白额燕鸥的繁殖率下降(Perrow et al, 2011)。

国内针对海上风电对鸟类影响的研究比较有限, 但一致认为海上风电的建设对周围鸟类的迁徙、觅食及碰撞影响都比较小。施蓓等 (2014) 对东海大桥海上风电场附近鸟类的研究表明, 风电场建成后, 对邻近区域鸟类的栖息和觅食基本无影响。区域内鸟类的物种数无明显变化, 风电场建设前鸻形目鸟类比例和种类明显占优势, 建设后鸻形目鸟类种类还占优势, 但是比例下降, 此时雀形目种类最为丰富, 可能与区域陆化发展、人为干扰和生境格局改变等各种干扰效应的长期累积有关。魏科技等 (2011) 研究表明, 徐闻沿海风力发电场的建成对鸟类 (主要种类是冬候鸟和水鸟) 的栖息地和觅食会造成一定的影响, 但总体上影响也较小。

2 海上风电工程对鱼类的影响

海上风电场对海洋鱼类的影响主要体现在噪声和电磁场, 主要影响有以下 6 个方面: (1) 水下打桩噪声影响鱼类行为, 甚至引起死亡; (2) 建设期影响鱼卵和幼鱼的生长发育; (3) 风电机运行阶段产生的噪声可能会导致鱼类的通讯受阻或方向迷失; (4) 施工工程导致海底泥沙和沉积物悬浮或含油废水泄露而污染海域水质, 影响鱼类生活; (5) 电磁场影响其周围鱼类的分布和迁移模式; (6) 电磁场可能会影响鱼类的胚胎早期发育。目前国内外关于海上风电对鱼类行为影响的研究结果不尽相同, 由于现场数据稀少, 海上风电对鱼类是否产生负面影响尚不能定论。

2.1 噪声对鱼类的影响

国外关于风电机建设时期打桩产生的噪声对鱼类的影响尚无定论, 影响程度仍不清晰, 离打桩地点很近的鱼类可能会死亡, 但鱼类也会有趋避行为, 暂时离开打桩地点。Abbott 等 (2002) 研究发现, 离声源 45 m 内的鱼类相比 45 m 外将受到更大的伤害, 但这种伤害只存在于声压超过 193 dB 的条件下。Thomsen 等 (2006) 研究表明, 鱼类对噪声会有规避行为, 因鱼类听觉系统差异较大, 所以噪声对鱼类的影响程度因鱼种类而不同。另外, 由于声音在水体和沉积物中传播方式不同, 噪声对底栖鱼类和上层水体中鱼类的影响也会不同, 当噪声超过 261 dB, 能影响到 80 km 以外的

鱼类, 特别是对声音敏感的鲱科鱼类等。Andersson (2011) 研究表明, 风电机打桩噪声会引起鳕鱼 (*Gadus morhua*) 和鳎 (*Solea solea*) 的行为反应, 即使在离打桩点 10 km 外, 也会对其行为产生影响, 但风电场打桩时产生的噪声对大马哈鱼、黑眼鲈鱼、凤尾鱼的影响结果表明, 与对照组相比, 其死亡率和病理学无差异 (Abbott, 2004; Marty, 2004)。长期暴露于噪声下, 人类的压力水平会升高进而影响健康, 但研究发现, 金鱼持续暴露在 170 dB 声压下, 其应激激素肾上腺酮并无显著变化 (Smith et al, 2004)。

风电机运行阶段产生的噪声也会对鱼类产生影响, 可能会导致海洋鱼类的通讯受阻或方向感迷失, 风电机运行阶段产生的噪声可以在 1 km 外的海域被探测到 (Thomsen et al, 2006), 然而目前尚无研究证实, 涡轮机产生的噪声会对鱼类产生明显的负面影响。Abbott (2004) 认为在风电机运营阶段, 当风速达到 13 m/s 以上时, 在距离风机 4 m 范围内一些鱼类会永久避开, 一些鱼类的通信和导航信号可能会被掩盖。Wahlberg 等 (2005) 认为, 风电机在运营过程中产生的噪声远达不到引起鱼类生理反应的声压水平, 但可能会对其行为有一定的影响, 因此, 在运营期间即使鱼类离风机很近, 也不会产生有害生理健康的影响。Andersson (2011) 认为声音敏感物种在风电机运营期间也只会 10 m 内的地方探测到涡轮机的噪声。

美国 Cape 风电场历时 9 年的环评报告显示, 风电场在建设期间和运营期间对鱼类及其生境均无影响或影响很小, 但建设期间对鱼卵和幼鱼有可以自我恢复的中等程度影响 (Snyder et al, 2009)。除了噪声之外, 施工期间在海底打桩固定、铺设海底电缆需要深挖海沟, 这些工程会导致海底泥沙和沉积物悬浮, 致使水体浑浊, 另外还有可能会有含油废水的泄露, Petersen 等 (2006) 认为这些对海域水质的污染及对鱼类的影响都是局部和暂时的。

2.2 电磁场对鱼类的影响

海上风场产生的电磁场主要由风机、升压站及海底电缆产生的磁场组成, 许多鱼类都利用磁场来进行空间定位、捕食, 电磁场可能是风电场影响海洋鱼类的另一个因素。国内外开展了电磁

场对鱼类生理、行动等影响的研究,但是有关海上风电电磁场对鱼类的影响研究比较少,也没有统一的结论。

2.2.1 电磁场对鱼类生理的影响

电磁场对鱼类生理影响的研究大部分是室内实验,集中在对鱼类胚胎早期发育的研究。Lerchl等(1998)研究表明,溪红点鲑(*Salvelinus fontinalis*)暴露在磁场后,体内的激素水平明显发生了变化。Fornicki等(1998)研究也表明磁场会改变鲑鱼(*Salmo trutta*)和虹鳟(*O. Mukiss*)的胚胎发育。Skauli等(2000)研究表明,诱导电场会使海胆胚胎的早期发育发生改变,斑马鱼置于1 mT强度的电磁场中,其生长、产卵量和孵化量均会受到影响。Krzemieniewski等(2004)开展室内实验发现当欧洲鲈鱼(*Silurus glanis*)持续暴露在磁场强度0.4~0.6 T中时,鱼类生物量下降,死亡率增加。但是,将鳔鱼幼体置于3.7 mT的电磁场中几周也未受到显著影响(Bochert et al, 2004)。李莹等(2015)研究了磁场间歇暴露的斑马鱼胚胎发育,结果显示,50 Hz、100 μ T磁场暴露对斑马鱼胚胎发育无显著影响,50 Hz、200 μ T磁场暴露会延迟斑马鱼胚胎发育,降低斑马鱼心率,但具有可恢复的特点。韩振兴(2016)研究了电磁场对鲫鱼(*Carassius auratus*)和褐菖鲉(*Sebastes marmoratus*)的影响,结果表明,电磁场对两种鱼的生化指标(溶菌酶活性、血液蛋白含量、碱性磷酸酶活性和乙酰胆碱酯酶活性)产生了显著影响,并对两种鱼有一定的致死效应。

2.2.2 电磁场对鱼类行为的影响

从行为学角度分析,鱼类是可以接受磁场的,但是电磁场对其影响尚未定论。Yano等(1997)的研究显示,将马苏大麻哈鱼置于12倍的地球磁场中(0.6 mT),其空间定位并未受到影响。但Fornicki等(2004)的实验结果表明,鳔鱼仔鱼与幼鱼的行为会因磁场而改变。Nishi等(2004)研究表明,需要洄游数千米至远方产卵的日本鳗鲡(*Anguilla japonica*)对12 663 nT的磁场变化会产生反应。洪波等(2014)对东海大桥海上风电场春、夏季鱼类组成及多样性进行了调查,发现东海大桥海上风电场鱼类种类组成以鲈形目为主,包括了石首鱼科、鲳科、虾虎鱼科、鳗虾虎鱼科、带鱼科等,其次为鳔形目舌鳎科以及鲱形目鳀科。

袁健美等(2016)研究海上风电电磁场对黑鲷(*Acanthopagrus schlegeli*)和半滑舌鳎(*Cynoglossus semilaevis*)的影响,在1 mT磁场试验条件下,短期内黑鲷存活率受磁场影响显著,黑鲷鱼苗表现活跃,行为、觅食表现异常,磁场强度4.05 mT对半滑舌鳎的存活率影响明显,并推测距离海底电缆1.2 m外的黑鲷和半滑舌鳎受风电电磁场影响不明显。

Kilfoyle等(2018)通过交流电、直流电和关闭电流三种模式随机切换对珊瑚鱼的影响结果显示,珊瑚鱼总丰度和行为在三种电力状态下并没有显著性差异,但不同种类珊瑚鱼的分布数据却证实了电磁场对一些鱼类有短期影响,一些珊瑚类会避开直流和交流电产生的电磁场,而在电流关闭的状态下,一些种类的珊瑚鱼的丰度会增加。

2.2.3 海上风电电磁场对鱼类的影响

关于风电场现场水下电缆产生的电磁场对鱼类影响的研究有限。风电场设施附近产生的磁场能达到一个地磁场水平的仅在这些设施周围1 m范围内,因此,一些研究者认为海上风电场的弱磁场不会对周围环境造成严重影响。Westerberg等(1999)关于直流电缆的实验结果显示,这种影响非常小,若能采取较好的屏蔽措施,可以减少这种影响。关于海上风电场电缆排放电磁场的评估,CMACS(2003)认为由于多变性和不确定性,很难得出风电场电缆排放的电磁场会对电场和磁场敏感的动物有影响。测量数据和模型模拟结果显示,设备产生的电场可以被完全屏蔽,但仍会有磁场产生,这些磁场反过来又会产生较低量的诱导电场,这些较低量的电场可以被电敏感的动物所感知。对Nysted海上风电场132 kV的交流电缆研究显示,电缆周围鱼类的分布和迁移模式并没有受到影响(Anonymous, 2004)。但也有研究表明Nysted风电场电缆两侧的海鲱鱼、普通鳗鱼、大西洋鳕鱼和比目鱼的捕获量不对称,Nysted风电场电缆产生的电磁场可能干扰了这几种鱼类的迁徙(Dong et al, 2006),这可能因鱼种类或其他未知因素导致。Westerberg等(2008)测试了波罗的海海底130 kV交流电缆对欧洲鳗鲡(*Anguilla anguilla*)迁移的影响,除了在电缆附近其游泳速度有所降低外,在通过电缆的过程中,其行为上未发现任何形式的改变。

3 海上风电工程对海洋哺乳动物的影响

海上风电对海洋哺乳动物的影响主要源于噪声, 影响主要表现在: (1) 造成海洋哺乳动物听力损伤; (2) 引起海洋哺乳动物躲避行为; (3) 对海洋哺乳动物繁殖可能有影响。风电场产生的电磁场也可能对海洋哺乳动物行为产生影响。国内外的研究大都集中在水下打桩噪声对海洋哺乳动物听力损伤和躲避行为影响的研究, 且目前开展的研究有限。但研究一致认为海上风电建设期对不同海洋哺乳动物有不同的听觉损伤临界距离, 运营期海上风电对海洋哺乳动物的影响较小且是可恢复的。

许多海洋哺乳类动物通过声音信号进行交流、捕食。在风电机建设阶段, 噪声可以通过水体增强和传播, 特别是风电机建设时期打桩时产生的噪声。Tougaard 等 (2003) 对 Nysted 风电场打桩点附近的港海豚进行观测, 结果表明, 打桩期间港海豚的声学信号明显下降, 觅食行为变少, 打桩点附近的港海豹数量明显降低。在距离风电机打桩 400 m 的海域, 声压水平能达到 189 dB, 该水平的声压可以导致海豹听力丧失, 其对海豚听力的影响范围可能会延伸至 1.8 km 外, 有时 20 km 外的海豚也会对此有强烈的躲避行为反应, 这种水平声压也是导致喙鲸搁浅的原因之一 (Thomsen, 2006)。Skeate 等 (2012) 研究发现, 英国 Scoby Sands 风电场打桩期间, 港海豹上岸换毛及繁殖行为减少。在德国 alpha ventus 风电场打桩建设期间, 港海豚的数量降到最低, 在距离打桩地点 20 km 处, 港海豚仍有强烈的躲避行为, 直到在距离打桩点 25 km 和 50 km 处才监测到较多的港海豚, 说明港海豚被打桩噪声驱赶到了 25 km 外 (Dähne et al, 2013)。

相比打桩噪声, 风电场运营阶段的噪声对海洋哺乳动物的影响微弱, 海洋哺乳动物能很好地适应风电场运营期间噪声。Carstensen 等 (2006) 研究表明, 在 Horns Rev 风电场建设期间, 斑海豹出现的频率有所降低, 但其数量在风电场建成后又逐渐恢复。Snyder 等 (2009) 对 Nysted 风电场建设前、建设期和建设后附近的斑海豹和灰色海豹的数量进行监测, 结果表明风电场的运行对其

数量没有显著影响, 仅在风电场其中一个基础场地打桩期间, 附近海豹繁殖场中的海豹数量有所减少, 总体来说, 一年期间海豹总数量保持稳定, 风电场建好后, 尽管在六月的繁殖季节, 海豹很少出现在风电场附近, 但之后的七八月有更多的海豹出现在风电场附近。美国 Cape 风电场的环评报告显示, 建设期间风电场对海洋哺乳动物有很小或可以自我恢复的中等程度影响, 运行期间对哺乳动物为无影响或有可以自我恢复的中等程度影响 (Snyder et al, 2009)。

中华白海豚是我国一级保护动物, 对噪声敏感, 风电场施工期间水下打桩噪声可能会对中华白海豚的听力和行为造成影响。汪启铭 (2014) 研究表明, 距离水下打桩地点 139.5 m 是造成中华白海豚听觉损伤的临界距离, 2 373.5 m 是水下打桩噪声引起中华白海豚产生强烈躲避行为的临界距离, 他们分别在离打桩地点 200 m、500 m 和 1 000 m 布设 3 个监测点, 3 个监测点的噪声均对中华白海豚造成了 whistle 信号声学掩蔽, 引起了强烈的躲避反应, 但不会损伤中华白海豚听觉。海上风机运营期间, 在距离风机 15 m 以外, 噪声不会掩蔽中华白海豚的 whistle 信号, 也不会造成中华白海豚强烈的躲避行为, 对中华白海豚产生的影响较小。

Kirschvink 等 (1986) 提出即使地球磁场的变化不超过 50 nT, 也可能对鲸类造成影响, 如搁浅等。目前涉及哺乳动物电感知能力的研究非常有限, 海上风电电磁场对哺乳动物的影响尚无定论。

4 海上风电工程对底栖生物的影响

风电场建设最好的海底底质条件是软沉积物区, 这也正是许多底栖生物适宜的生境, 海上风电对底栖生物的影响包括: (1) 建设期引起水质污染, 改变或破坏了它们的生境; (2) 运营期改变了沉积物组成, 影响底栖生物群落结构。国内外这方面的研究非常有限, 海上风电对底栖生物的影响数据不足, 无法作出定论。

海上风电场对底栖生物最直接的影响是风电场建设时期风电机地基的打桩和钻孔, 致使水体浑浊, 对海域水质造成污染, 破坏底栖生物的生

境 (Petersen et al, 2006), 特别是不同的基础结构形式 (如单桩、三桩和四桩) (李炜等, 2012) 对底栖生物造成的影响不同。风电场建成后, 海床环境会因人工建筑而改变, 原有沉积物和水文特征也会改变, 进而影响到底栖生物的生物量、多样性, 导致区域现有群落组成发生较大变化。美国对 Cape 海上风电厂 9 年的环境评估显示海上风电建设期和运营期对底栖无脊椎动物影响很小 (Snyder et al, 2009)。

Coates 等 (2014) 研究表明, 风电场建成一段时间后, 风机附近沙砾的大小会逐渐发生变化, 沙砾的大小与沙砾与风机之间的距离成正比, 离风机距离越近, 其沙砾颗粒越小, 有机质含量越多, 环境的变化也引发了附近底栖动物丰度和多样性的变化, 大型底栖动物的丰度越高, 多样性也越高。除了对附近软质沉积物带来变化外, 风电场建成后对底栖生物的另一个直接的影响是硬质基底增加 (Bray et al, 2016)。

对德国湾一个离岸平台的研究显示, 与同等面积的软质沉积物区域相比, 硬质基底上大型底栖动物的生物量是软质沉积物区域的 35 倍 (Krone et al, 2013)。

Wilhelmsson 等 (2006) 研究表明, 风电场建成后, 涡轮机的水下部分被紫贻贝和藤壶所覆盖, 附近海床上则主要被紫贻贝和小型红藻覆盖。贝类的生物量、生长和大小等指标会随着海水深度的增加而降低, 研究表明, 相比没有人工水下建筑的区域, 人工水下建筑为一些贝类提供了更接近水面的附着基质, 波浪会导致接近地表的水体运动幅度更大, 从而也提高了浮游植物的更新率, 进而促进贝类生长和生物量 (Wilhelmsson et al, 2006)。

宋超等 (2017) 研究了东海大桥海上风电水域大型底栖动物群落结构的影响, 研究显示春、秋季共发现 17 种大型底栖动物种类, 隶属 5 目 10 科 14 属, 十足目占绝对优势, 温度和盐度是影响东海大桥风电场水域大型底栖动物群落结构变异的最主要环境因子。方宁 (2015) 通过对东海大桥海上风电场建成前后工程海域沉积物调查数据分析, 研究海上风电场的建设可能对海洋底质产生的环境影响, 沉积物质量调查结果表明, 风电场建设前后海域沉积物中锌的质量分数增加显

著, 这与风电场内风机桩基基础防腐使用的牺牲阳极中锌的释放有关。

5 海上风电工程对浮游生物的影响

目前, 国内外关于风电场对浮游生物影响的研究非常有限。海上风电场会影响海洋水文环境, 进而影响浮游生物的聚集。人工海底建筑会导致海床环境的改变, 导致无脊椎动物等底栖生物也发生改变, 进一步影响藻类的组成结构 (Kurz, 1995)。研究表明, 越靠近风电机区域藻类越少, 这可能与风电机附近水文动力的改变、有机质的输入以及贝类数量的变化有关, 越靠近风机桩柱贝类越多 (Wilhelmsson et al, 2008)。

美国对 Cape 海上风电厂的环境评估历经 9 年完成, 评估显示海上风电建设期末检测到对浮游生物的影响, 运营期影响很小 (Snyder et al, 2009)。不同栖息地的种群会通过交换卵、幼虫和成体的扩散来相互关联, 风电场的硬质基底可以为卵、幼虫和成体等浮游生物提供固着场所, 从而促进浮游生物的连通性 (Bray et al, 2016)。

赵冉等 (2014) 对东海大桥海上风电场周边渔业水域浮游植物群落变化进行了研究, 风电场工程建设对调查水域浮游植物的影响是短期的、可逆的, 表现为工程期间浮游植物物种数和细胞丰度呈下降趋势, 随着作业期结束, 浮游植物群落逐渐恢复。

6 海上风电工程对海洋生物多样性的影响

近年来国外有些学者认为风电机的建设对海洋生物有一定的积极作用, 风电场的建成会增加海洋生物的栖息地, 栖息地的增加则对增加当地物种的丰度、保护当地物种的多样性有一定的积极作用。

海上风机的基础部分可起到人工鱼礁的作用, 复杂的环境为许多生物创造了很好的庇护和觅食场所, 不仅丰富了鱼类的食物来源, 也为鱼类的聚集提供场所。Wilhelmsson 等 (2006) 在波罗的海卡马尔海峡上研究了涡轮机作为人工礁石和鱼类聚地的可能性, 结果显示涡轮机附近鱼类的数

量比周围其他地方要多, 其种群丰度和多样性也有类似现象。在涡轮机底座上, 鱼类总量很多, 但种群丰度和多样性水平与附近海床相比较低。Andersson 等 (2010) 认为海上风电机对鱼类和固着无脊椎动物有积极影响, 为鱼类和无脊椎动物提供庇护和产卵场所, 也丰富了食物来源。波罗的海南部 Utgrunden 风电场建成 7 年后, 双斑虾虎鱼、黑虾虎鱼以及紫贻贝的数量都有所增加。除此之外, 其他附近的对栖息地有更广泛选择的鱼类数量也并未受到风电机的影响。

Scheidat 等 (2011) 对荷兰 Egmond aan Zee 风电场内海豚数量的研究表明, 港海豚的数量比风电场建设前有所增加, 可能因为礁石效应使得场内鱼类数量增加。另外, 风电场内航船数量的减少也可能是其数量增加的原因。Lindeboom 等 (2011) 的调查结果也显示, Egmond aan Zee 风电场建成后, 相比于风电场外对照区, 在风电场内发现了更多的海豚, 另外, 在风电机基座堆石的硬底质上建立了由许多新物种组成的新的动物群落, 生物多样性增加。

一些鱼类如鳕鱼则以风电场为庇护场所, 但对鸟类来说, 有些鸟类被风电场吸引, 有些鸟类则避开了风电场。Egmond aan Zee 风电场建成后被一些底栖生物、鱼类、海洋哺乳动物和鸟类利用, 成为多种生物新型的栖息地, 丰富了该区域的生物多样性。瑞典 Lillgrund 风电场建成前后, 鱼类的丰度和多样性未受到影响, 但随着时间的推移, 在靠近风电机基地的地方, 一些食鱼动物 (鳕鱼、鳗鱼、短角床杜父鱼) 以及岩梳隆头鱼的密度都有所增加, 增加的原因与该区域食物和庇护所的增加有关 (Bergström et al, 2013)。

7 结论与展望

7.1 海上风电工程对海洋生物的影响

通过较为全面、系统地梳理国内外对海上风电对海洋生物影响的最新研究进展, 得到以下结论。

(1) 国内外对海上风电生态影响的研究虽然数量不少, 但是研究不够全面, 尤其是对于现场的、长期的生态影响, 开展的研究数量非常有限。国内外的研究大部分集中在鸟类碰撞致死、水下

打桩噪声影响、电磁波对鱼类生长发育影响等方面, 有关海上风电项目对海洋哺乳动物、底栖生物、浮游生物的影响研究数量甚少。

(2) 海上风电项目建设期, 水下打桩时产生的噪声、施工建设对海洋环境的改变, 主要影响鸟类栖停迁飞、鱼类生长发育、海洋哺乳动物听力及行为、底栖生物生境、浮游生物种类组成等。运营期, 风机叶片、电磁场、噪声等主要影响鸟类、鱼卵和幼鱼的生长发育、底栖生物群落组成, 建成的海上风电基础会增加海洋生物的栖息地, 对物种多样性有一定的积极作用。

(3) 海上风电对鸟类影响的研究表明, 只要海上风电选址避开鸟类栖息地, 海上风电对鸟类栖息和觅食的影响是比较小的, 海上风电不会引起鸟类的严重碰撞。

(4) 海上风电对海洋哺乳动物影响的研究表明, 海上风电项目对不同海洋哺乳动物有不同的听觉损伤临界距离, 对海洋哺乳动物的影响较小且可恢复。

(5) 由于开展的研究不多, 现场数据有限, 目前海上风电项目对鱼类、底栖生物、浮游生物等的影响, 尚无定论。

7.2 我国海上风电生态环境影响研究的建议

国内外海上风电生态环境的影响研究还存在很多不足, 在我国尤为明显。目前, 我国在海上风电生态环境影响方面的研究比较少, 特别是现场开展的、具有长期数据积累的实验非常缺乏, 这对我国海上风电的科学布局与发展是一大制约因素。鉴于此, 结合我国海上风电发展现状, 针对我国海上风电生态环境影响研究提出以下建议:

(1) 将科学研究与海上风电工程环境影响评价紧密结合。目前海上风电的生态环境影响研究最缺乏的是现场数据, 海上风电工程按照项目审批要求, 需要开展海上风电工程环境影响评价, 可以将两者紧密结合, 充实海上风电科学问题研究的现场数据支撑, 同时科学有效地评估用海工程的生态影响。在海上工程建成后, 应对项目提出生态环境影响的后评估研究, 跟踪监测海上风电的生态影响, 一方面得到海上风电长期生态影响的数据, 一方面有益于加强用海项目的事中及事后监管。

(2) 开展海上风电项目对区域生态环境影响

的研究。海上风电确权范围小、实际占用海域面积大、用海具有排他性、容易造成海洋空间破碎化等用海问题。如能提前做好海上风电项目的规划布局,就可以将其对生态环境的影响降到最低。加强开展海上风电项目对区域生态环境影响的研究,引导海上风电合理布局,有利于处理好风电项目开发利用与保护环境的关系。

(3) 探究海上风电工程对海洋生物不同种类选择性影响的机制。不同种类的海洋生物对海洋环境变化的适应能力不同,特别是在风电机建设后,其风电机基地形成硬性基底,可为底栖生物(如双斑虾虎鱼、黑虾虎鱼以及紫贻贝等)提供良好的栖息场所,而对喜好软性基底的底栖生物的影响较大。且在海上风电的运行期不同鸟类的趋避行为也不同。因此,要加强不同海洋生物种类对海上风电工程环境变化响应的研究,揭示海上风电对不同生物选择性影响的机理,这有利于海上风电项目的选址工作,为有效降低海洋环境风险提供技术支撑。

参 考 文 献

- 方宁, 2015. 东海大桥海上风电场对海域沉积物的环境影响[J]. 青岛理工大学学报, 36(2): 79-82.
- 韩振兴, 2016. 基于亥姆霍兹线圈的风电磁场模拟及其对两种鱼类致死和生理的影响[D]. 上海: 上海海洋大学.
- 洪波, 王森, 安传光, 2014. 春、夏季东海大桥海上风电场鱼类组成及多样性[J]. 浙江海洋学院学报, 33(3): 234-239.
- 李炜, 郑永明, 陆飞, 等, 2012. 海上风电基础结构动力分析[J]. 海洋通报, 31(1): 67-73.
- 李莹, 刘兴发, 缪巍, 等, 2015. 极低频磁场暴露对斑马鱼胚胎发育的影响[J]. 高电压技术, 41(4): 1395-1401.
- 施蓓, 丁玲, 徐凌云, 等, 2014. 东海大桥海上风电场对鸟类组成的影响[J]. 生态学杂志, 33(4): 1068-1075.
- 宋超, 侯俊利, 赵峰, 等, 2017. 春、秋季东海大桥海上风电场水域大型底栖动物群落结构及其与环境因子的关系[J]. 海洋渔业, 39(1): 21-29.
- 汪启铭, 2014. 海上风电场建设水下噪声对中华白海豚影响研究[D]. 厦门: 厦门大学.
- 魏科技, 姜海萍, 王伟, 等, 2011. 徐闻沿海风力发电场对鸟类的影响分析[J]. 环境科学与管理, 36(7): 153-157.
- 袁健美, 贲成恺, 高继先, 等, 2016. 海上风电电磁场对 12 种海洋生物存活率与行为的影响[J]. 生态学杂志, 35(11): 3051-3056.
- 赵冉, 张玉平, 孙振中, 等, 2014. 东海大桥海上风电场周边渔业水域浮游植物群落变化[J]. 水产科技情报, 41(4): 187-191.
- ABBOTT R, 2004. Progress report: monitoring the effects of conventional pile driving on three species of fish[R]. CALTRANS.
- ABBOTT R, BING-SAWYER E, 2002. Assessment of pile driving impacts on the Sacramento blackfish (*Othodon microlepidotus*)[R]. CALTRANS.
- ANDERSSON M H, 2011. Offshore wind farms—ecological effects of noise and habitat alteration on fish [D]. Stockholm: Stockholm University.
- ANDERSSON M H, ÖHMAN M C, 2010. Fish and sessile assemblages associated with wind-turbine constructions in the Baltic Sea[J]. Marine and Freshwater Research, 61(6): 642-650.
- ANONYMOUS, 2004. Annual status report: Nysted offshore windfarm. Environmental monitoring programme 2003[R]. Energi E2, Copenhagen.
- BERGSTRÖM L, SUNDQVIST F, BERGSTRÖM U, 2013. Effects of an offshore wind farm on temporal and spatial patterns in the demersal fish community[J]. Marine Ecology Progress Series, 485: 199-210.
- BOCHERT R, ZETTLER M L, 2004. Long-term exposure of several marine benthic animals to static magnetic fields[J]. Bioelectromagnetics, 25(7): 498-502.
- BRAY L, REIZOPOULOU S, VOUKOUVALAS E, et al, 2016. Expected effects of offshore wind farms on Mediterranean Marine life[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 4(1): 18.
- CARSTENSEN J, HENRIKSEN O D, TEILMANN J, 2006. Impacts of offshore wind farm construction on harbour porpoises: acoustic monitoring of echolocation activity using porpoise detectors (T-PODs)[J]. Marine Ecology Progress Series, 321: 295-308.
- CENTRE FOR MARINE, COASTAL STUDIES (CMACS), 2003. A baseline assessment of electromagnetic fields generated by offshore windfarm cables[D]. COWRIE, Birkenhead: University of Liverpool.
- COATES D A, DESCHUTTER Y, VINCX M, et al, 2014. Enrichment and shifts in macrobenthic assemblages in an offshore wind farm area in the Belgian part of the North Sea [J]. Marine Environmental Research, 95: 1-12.
- COOK A, JOHNSTON A, WRIGHT J, et al, 2012. A review of flight heights and avoidance rates of birds in relation to offshore wind farms[R]. BTO Research Report, 618: 1-61.
- DÄHNE M, GILLES A, LUCKE K, et al, 2013. Effects of pile-driving on harbour porpoises (*Phocoena phocoena*) at the first offshore wind farm in Germany [J]. Environmental Research Letters, 8(2): 2-25.
- DESHOLM M, KAHLERT J, 2005. Avian collision risk at an offshore wind farm [J]. Royal Society Biology Letter, 1(3): 296-298.
- DONG E, VATTENFALL, DANISH E A, et al, 2006. Danish Offshore Wind: Key Environmental Issues[J]. Energy, 144.
- ERICKSON W P, JOHNSON G D, STRICKLAND D M, et al, 2001. Avian collisions with wind turbines: a summary of existing studies and comparisons to other sources of avian collision mortality in the United States[EB/OL]. [2019-02-10]. http://www.west-inc.com/Sreport/avian_collisions.pdf.
- FORMICKI K, SADOWSKI M, TAŃSKI A, et al, 2004. Behaviour of trout (*Salmo trutta* L.) larvae and fry in a constant magnetic field[J]. Journal of Applied Ichthyology, 20(4): 290-294.
- FORNICKI K, WINNICKI A, 1998. Reactions of fish embryos and larvae

- to constant magnetic fields [J]. *Italian Journal of Zoology*, 65 (sup1): 479–482.
- FURNESS R W, MADE H M, MASDEN E A, 2013. Assessing vulnerability of marine bird populations to offshore wind farms [J]. *Journal of Environmental Management*, 119(Complete): 56–66.
- HOFFMANN E, ASTRUP J, LARSEN F, et al, 2000. Effects of marine wind farms on the distribution of fish, shellfish and marine mammals in the Horns Rev area [J]. Dfu Rapport.
- KILFOYLE A K, JERMAIN R F, DHANAK M R, et al, 2018. Effects of EMF emissions from undersea electric cables on coral reef fish [J]. *Bioelectromagnetics*, 39(1): 35–52.
- KIRSCHVINK J L, DIZON A E, WESTPHAL J A, 1986. Evidence from strandings for geomagnetic sensitivity in cetaceans [J]. *Journal of Experimental Biology*, 120(1): 1–24.
- KRONE R, GUTOW L, JOSCHKO T J, et al, 2013. Epifauna dynamics at an offshore foundation—Implications of future wind power farming in the North Sea [J]. *Marine environmental research*, 85(APR): 1–12.
- KRZEMIEŃSKI M, TEODOROWICZ M, DĘBOWSKI M, et al, 2004. Effect of a constant magnetic field on water quality and rearing of European sheatfish *Silurus glanis* L. larvae [J]. *Aquaculture Research*, 35(6): 568–573.
- KURZ R C, 1995. Predator–prey interactions between gray triggerfish (*Balistes caprisicus* Gmelin) and a guild of sand dollars around artificial reefs in the northeastern Gulf of Mexico [J]. *Bulletin of Marine Science*, 56(1): 150–160.
- LERCHL A, ZACHMANN A, ALI M A, et al, 1998. The effect of pulsing fields on pineal melatonin synthesis in a teleost fish (brook trout, *Salvelinus fontinalis*) [J]. *Neuroscience Letters*, 256: 290–294.
- LINDEBOOM H J, KOUWENHOVEN H J, BERGMAN M J N, et al, 2011. Short-term ecological effects of an offshore wind farm in the Dutch coastal zone; a compilation [J]. *Environmental Research Letters*, 6(3): 35–101.
- MARTY G D, 2004. Necropsy and histopathology of three fish species exposed to concrete pile driving in the port of Oakland [A]. Draft report to Port of Oakland.
- NISHI T, KAWAMURA G, MATSUMOTO K, 2004. Magnetic sense in the Japanese eel, *Anguilla japonica*, as determined by conditioning and electrocardiography [J]. *Journal of Experimental Biology*, 207: 2965–2970.
- PERROW M R, GILROY J J, SKEATE E R, et al, 2011. Effects of the construction of Scroby Sands offshore wind farm on the prey base of Little tern *Sterna albifrons* at its most important UK colony [J]. *Marine pollution bulletin*, 62(8): 1661–1670.
- PETERSEN J K, FOX A D, 2007. Changes in bird habitat utilisation around the Horns Rev 1 offshore wind farm, with particular reference on Common Scoter [J]. Commissioned by Vattenfall A/S NERI/Ministry of Environment, Report number: 36.
- PETERSEN J K, MALM T, 2006. Offshore windmill farms: threats to or possibilities for the marine environment [J]. *A Journal of the Human Environment*, 35(2): 75–80.
- PETTERSSON J, 2005. The impact of offshore wind farms on bird life in Southern Kalmar sound, Sweden [M]. Sweden: Lund University.
- SCHEIDAT M, TOUGAARD J, BRASSEUR S, et al, 2011. Harbour porpoises (*Phocoena phocoena*) and wind farms: a case study in the Dutch North sea [J]. *Environmental Research Letters*, 6(2): 25102–25111(10).
- SKAULI K S, REITAN J B, WALTHER B T, 2000. Hatching in zebrafish (*Danio rerio*) embryos exposed to a 50 Hz magnetic field [J]. *Bioelectromagnetics*, 21(5): 407–410.
- SKEATE E R, PERROW M R, GILROY J J, 2012. Likely effects of construction of Scroby Sands offshore wind farm on a mixed population of harbour *Phoca vitulina* and grey *Halichoerus grypus* seals [J]. *Marine pollution bulletin*, 64(4): 872–881.
- SMITH M E, KANE A S, POPPER A N, 2004. Noise-induced stress response and hearing loss in goldfish (*Carassius auratus*) [J]. *Journal of Experimental Biology*, 207(3): 427–435.
- SNYDER B, KAISER M J, 2009. Ecological and economic cost–benefit analysis of offshore wind energy [J]. *Renewable Energy*, 34: 1567–1578.
- THOMSEN F, LÜDEMANN K, KAFEMANN R, et al, 2006. Effects of offshore wind farm noise on marine mammals and fish [M]. Biola, Hamburg, Germany on behalf of COWRIE Ltd.
- TOUGAARD J, CARSTENSEN J, DAMSGAARD H, et al, 2003. Short-term effects of the construction of wind turbines on harbour porpoises at Horns Reef [A]. Technical Report to Techwise A/S, 362(2): 1–72.
- WAHLBERG M, WESTERBERG H, 2005. Hearing in fish and their reactions to sounds from offshore wind farms [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 288(1): 295–309.
- WESTERBERG H, BEGOUT–ANRAS M L, 1999. Orientation of silver eel (*Anguilla anguilla*) in a disturbed geomagnetic field, in 3rd Conference on Fish Telemetry in Europe [J]. CEFAS: Norwich.
- WESTERBERG H, LAGENFELT I, 2008. Sub-sea power cables and the migration behaviour of the European eel [J]. *Fisheries Management & Ecology*, 15(5–6): 369–375.
- WILHELMSSON D, MALM T, 2008. Fouling assemblages on offshore wind power plants and adjacent substrata [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 79(3): 459–466.
- WILHELMSSON D, MALM T, OHMAN M C, 2006. The influence of offshore windpower on demersal fish [J]. *ICES Journal of Marine Science*, 63(5): 775–784.
- YANO A, OGURA M, SATO A, et al, 1997. Effect of modified magnetic field on the ocean migration of maturing chum salmon, *Oncorhynchus keta* [J]. *Marine Biology*, 129(3): 523–530.

(本文编辑: 袁泽轶)