

建设渤海跨海通道的生态影响述评

刘炳亮¹, 苏金豹², 马建章³

(1. 鲁东大学 商学院, 山东 烟台 264025; 2. 东北林业大学 经济管理学院, 黑龙江 哈尔滨 150040; 3. 东北林业大学 野生动物与自然保护地学院, 黑龙江 哈尔滨 150040)

摘要: 海洋生态系统能够提供各种生态服务, 对人类的生存与发展具有重要意义。然而随着对海洋开发强度的增加, 尤其近些年大型涉海工程的建设, 给海洋生态带来严重威胁。作为一项世界级的大型海洋交通工程, 渤海跨海通道项目从 20 世纪 90 年代初提出至今已经历近 30 年的时间。为深入探讨其建设可能给海洋生态带来的风险, 本文从海洋污染、水下噪音、人造光、微塑料等几个方面分析和讨论了其可能给海洋生物的生理、行为、迁移以及海洋保护区及其周边渔业管理等带来的影响, 并在此基础上提出了海洋通道建设影响评估框架, 以期跨海通道建设评估提供理论依据和参考。

关键词: 海洋工程; 海洋噪音; 光污染; 海洋保护区; 海洋发展战略

中图分类号: X37; P76

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2023)01-0108-11

DOI: 10.11759/hyxx20220110002

海洋能够提供各种生态系统服务, 对人类的生存与发展具有重要意义。中国是具有多种近海海洋生态系统类型的国家, 随着参与全球化以及科技创新的发展, 海洋已经成为中国经济转型升级的重要依托和资源综合利用的重要载体, 同时也是对外贸易和大宗战略物资运输的重要通道^[1]。作为一项旨在促进区域一体化发展的超级海洋交通工程——渤海跨海通道项目自从 20 世纪 90 年代初提出至今已历经近 30 年的时间。该方案的基本设想是利用渤海海峡的地理条件, 从山东蓬莱经长岛至辽宁旅顺以“全隧道”或“桥隧结合”的方式建立一条全天候、多功能的交通通道, 构建形成东北亚乃至亚欧地区的现代化综合交通运输体系, 为促进东北老工业基地振兴、东部沿海地区经济发展以及扩大与东北亚国家合作创造条件^[2]。

在该方案提出的近 30 年里, 众多国内研究者从不同视角对其进行了分析和讨论, 包括该项目建设的紧迫性^[3-4]、技术上的可行性^[2, 5]、经济效益^[5]、交通可达性^[6]、城市物流联系^[7]、对海洋功能区划的影响^[8]、对旅游业的作用^[9]乃至对地缘政治和军事的战略意义^[10]等。这些研究为渤海通道建设方案的可行性和必要性提供了有益的参考和借鉴。然而, 从目前来看, 这些研究大多只是强调了渤海跨海通道对区域社会经济发展的积极作用, 而对海洋生态环境的影响仍然缺乏深入的分析和讨论。尽管也有研究者^[11]基于全

隧道方案对该项目的海洋环境与生态影响进行了初步探讨, 但并没有对该项目可能引发的生态后果以及影响因素、影响机制等进行全面的分析和讨论。实际上, 目前已经有大量文献表明, 人类对海洋的开发活动(如轮船、钻井、水下勘探、水上风力发电等)给全球海洋生态环境带来了严重的冲击和影响。这些影响几乎涉及海洋生物的生理、心理、行为、长距离迁移扩散以及互作关系等多个方面。影响因素则主要来自于人类活动产生的各种水体污染(如有害藻、微塑料、富养化、有毒物质等)、水下噪音、近岸人造光污染、生境质量下降、水域连通度下降等。

作为世界级的海洋超级工程, 渤海跨海通道的空间跨度大(约 106 km), 建设周期长, 施工条件复杂, 线路勘测、方案确定及施工需要跨越深海、远海作业^[4], 因此可能给渤、黄海的海洋生态环境带来重大影响。同时, 由于渤海及其周边海岸带具有相对较高的生物多样性, 是众多海洋物种或鸟类的关键栖息地和迁徙中转站, 建有大量海洋与渔业保护区, 尤其渤海海峡是连接渤海与黄海的唯一生态

收稿日期: 2022-01-10; 修回日期: 2022-05-20

基金项目: 鲁东大学环渤海发展研究院渤海海峡跨海通道研究项目(201800101)

[Foundation: Bohai Strait Cross-sea channel research project, Bohai Rim Development Institute, Ludong University, No. 201800101]

作者简介: 刘炳亮(1974—), 男, 山东烟台人, 博士, 讲师, 主要研究方向为景观生态学、生物多样性保护与自然保护区管理, E-mail: vipword@126.com

通道, 因此在该区域建设跨海通道可能给渤、黄海的生态以及生物多样性保护带来巨大压力。基于此, 本文在已有相关文献的基础上, 从海洋环境、物种生理生态、海洋保护区管理等几个方面对渤海跨海通道建设可能带来的影响和冲击进行分析和讨论, 旨在阐明海洋通道建设可能带来的各种生态风险。同时在此基础上提出了跨海通道建设的生态影响评估框架, 通过描述其可能给海洋生物个体及其种群以及未来海洋保护战略可能产生的各种影响, 为该工程项目的可行性论证提供理论参考, 避免给渤、黄海及其周边海域的生态环境带来无法预知的风险。

1 渤海自然环境条件与项目概况

1.1 自然环境条件

渤海(北纬 37°07'—41°0', 东经 117°35'—122°15')三面环陆, 渤海与黄海通过渤海海峡相连, 使渤海成为半封闭内海。海域面积约 7.7 万 km², 大陆岸线长约 3 170 km(包括烟台市的黄海部分)。渤海包含多个湾区, 有渤海湾、辽东湾、莱州湾、渤海中央区和渤海海峡区五个部分。周边涉及北部的辽宁省、西部的河北省与天津市以及南部的山东省。

渤海有多条河流汇入, 包括黄河、海河以及松花江——辽河水系的多条大河。渤海地势由陆地沿岸向渤海中央和渤海海峡逐渐倾斜, 地形总体单调平缓。渤海为中、新生代沉降盆地, 基底为前寒武纪变质岩, 第四纪沉积物厚达 300~500 m。渤海海域年平均气温 10.7 °C, 年降水量 500~600 mm, 海水盐度为 30。受北方大陆性气候影响, 2 月渤海表面水温为 0 °C 左右, 8 月则达 21 °C。

1.2 渤海生态系统特征及其生物多样性

渤海水域及其沿岸包括河口生态系统、河口三角洲湿地生态系统和渤海中部深水区三大生态系统。这些自然生态系统与环渤海陆地生态系统相互作用, 共同形成了环渤海地区的复合生态系统。这些多样化的生态系统在为海洋生物提供良好栖息环境的同时, 也为人类提供了重要的生态系统服务和文化价值。

渤海拥有丰富的海洋生物多样性。渤海海洋生物包括鱼类、哺乳类、底栖类以及浮游动物、植物等。其中, 鱼类物种数量 44 种^[12]; 哺乳类 8 种^[13]; 浮游植物 171 种, 主要类群为硅藻和甲藻; 浮游动物 85 种, 主要类群为桡足类和水母类; 大型底栖生物 286 种,

主要类群为环节动物、软体动物和节肢动物^[14]。

渤海及其周边湿地是东亚——澳大利西亚水鸟迁徙路线的重要组成部分, 也是其他各种鸟类的重要栖息地。由于缺乏全面调查数据, 目前并无全面的渤海鸟类多样性数据。但据洛昊等^[15]对渤海北部的大连滨海湿地调查显示, 该区域有鸟类 76 种, 隶属 10 目 17 科, 其中被列入世界濒危鸟类红皮书和国家二级保护鸟类有 6 种; 国家一级保护鸟类 1 种, 国家二级保护鸟类 10 种。隧道南部山东海域的长岛地区是东部众多鸟类的栖息地和迁徙通道, 也是东北亚内陆和环西太平洋鸟类迁徙的重要中转站。据长岛自然保护区候鸟环志中心站从 1984 年至 2017 年的记录, 长岛自然保护区共发现鸟类 19 目 58 科 331 种, 猛禽 2 目 4 科 39 种。其中被列为国家重点保护的有丹顶鹤(*Grus japonensis*)、白鹳(*Ciconia ciconia*)、大天鹅(*Cygnus cygnus*)、白肩雕(*Aquila heliaca*)、金雕(*Aquila chrysaetos*)、秃鹫(*Aegypius monachus*)等 60 种; 2019 年曾记录到 13 目 25 科 71 种 4012 只。目前长岛的 12 个岛已经被划为猛禽自然保护区。此外, 长岛海域也是东亚江豚(*Neophocaena*)和斑海豹(*Phoca largha*)等海洋哺乳动物的重要栖息地。

1.3 项目区位概况

按照规划方案, 渤海跨海通道纵穿渤海海峡(图 1), 将北部的大连老铁山与南部的蓬莱角进行直连, 总长度约为 106 km。渤海海峡平均水深 25 m, 其中, 南部的蓬莱角至砣矶岛水深较浅, 平均只有约 20 m; 砣矶岛至大钦岛平均水深 35~40 m; 大钦岛至北隍城岛平均水深约 45~50 m。南部各岛近岸等深线为 5 m, 北部各岛近岸等深线为 10 m。冲蚀洼地深 50 m, 最深处为老铁山水道, 约为 86 m。

2 通道建设的生态环境影响

2.1 水环境污染

作为一项世界级的超级海洋工程, 渤海跨海通道项目给海洋环境带来的风险首先来自于施工、运营产生的各种废弃物污染。海洋废弃物被界定为“在海洋和沿海环境中丢弃、处置、丢失或遗弃的任何持久性、经过制造或加工的固体物质”。海洋废弃物对海洋最直接的危害就是通过释放各种有毒物质以及重金属对海洋生物产生致命影响^[16]。大量的研究已经表明, 进入海洋的各种废弃物通常很难分解,

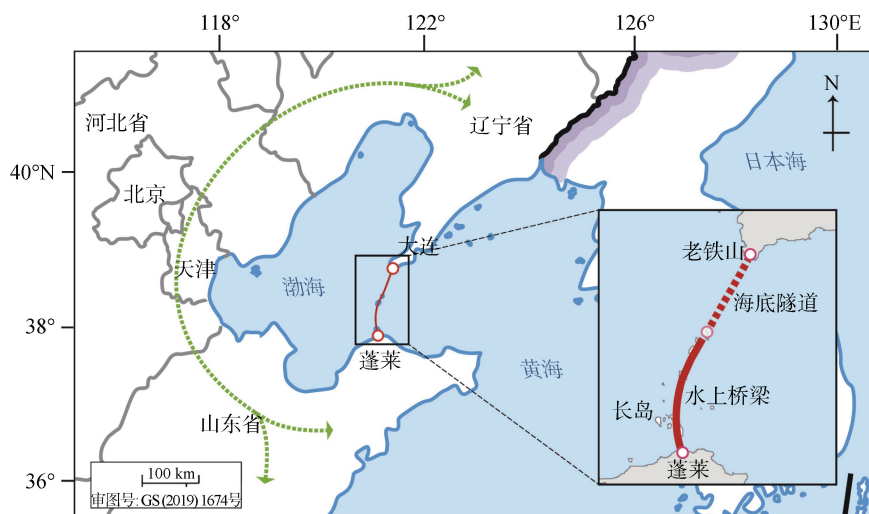


图1 渤海海峡跨海通道区位图

Fig. 1 Location of the Bohai Sea Crossing Corridor (BSCC)

在海洋中会存在数年甚至上百年。而这些长期存在海洋中的废弃物如果被海洋生物误食,不仅对生物个体的生理、行为产生影响,而且也会通过体内的沉积作用和食物链传递给人类,最终影响人类健康。废弃物中较大垃圾如网绳、塑料袋等导致的污染还能对海洋生物的身体带来伤害。例如,近年来越来越多的报道发现,一些海豚、江豚、海豹等大型海洋动物经常因遭受网绳的缠绕而受伤致死,或因误食海洋垃圾阻塞呼吸道而窒息死亡。

近几年,海洋废弃物中的微塑料对海洋生物的影响也越来越受到人们的关注^[17-20]。人类捕捞、运输、养殖和旅游等海上生产活动是微塑料来源之一^[19]。而跨海通道工程建设中同样会使用大量防水塑材,如果塑材废弃物处理不当,被直接丢弃入海或随河流、雨水等进入海洋被鱼类误食,不仅会导致鱼类身体的擦伤、阻塞呼吸道或产生其它损伤^[21-22],还会随着食物链转移、积累,影响海洋生物的生理^[23]、行为^[24-26]、乃至免疫^[27-28]等,并最终给人类健康带来风险^[29-30]。除了上述直接伤害,被分解后的微塑料还会影响海洋生物的产卵量和繁殖能力,改变生物群落结构和组成^[31]。

海底隧道建设及相关的围堰设施还可能形成库湾,改变水动力条件,导致蓝藻水华、赤潮的增加以及水体富营养化等一系列水环境问题^[32-33]。而有害藻的聚集会导致水体严重缺氧、水下光线不足,使鱼、虾、蟹、贝等物种大量死亡,严重的还会在海底形成沉积物,影响深海生态系统。有害藻类产生的毒素也会通过被污染的海洋生物直接或间接地危害人

类健康。水质变化也会改变水中浮游植物的光合作用。而浮游植物是水域初级生产者,因此如果受到影响,最终还将对水生生态系统的结构和功能产生影响^[34]。王建国等^[33]在对珠海-澳门十字门隧道工程的研究发现,长周期的隧道施工已显著改变了水域生态系统中的浮游植物种类、丰度、生物量以及优势种群的数量,导致浮游动物、底栖生物群落结构异质化、个体的死亡或迁徙。

工程建设与运营过程中排放的废水、废气以及其他废弃物等还能影响海岸带以及沉积环境,导致海岸线性质和底质条件的改变^[35],对底栖生物产生影响^[36]。而局部海水污染、海洋生物质量下降及生态环境恶化等还将加剧海洋生物食物短缺的压力,这对大型海洋哺乳动物种群更为不利。人造堤坝、桩基、竖井等构筑物形成的人工岸线也将导致海岸生境的严重同质化以及破碎化,并为水母水螅体等提供附着基,增加暴发水母灾害的可能性^[37]。涉海工程和各类人工岸线以及围堰工程等还能改变岸线形态,给水动力环境带来连锁性影响^[38-39]。

2.2 水下噪音

大多海洋生物依靠听觉捕食猎物、寻找配偶和幼仔、逃避捕食者、定位航向、寻找栖息地以及彼此沟通^[40],因此,听觉是其得以存续的基础。但越来越多的研究表明,人类的海上活动如交通、勘测、钻探、声呐探测、电气设备、水下实验等产生的噪音以及来自海岸带的各种震动已经对海洋生物产生了显著影响^[41]。

水下噪音对海洋生物的影响最典型的的就是导致听力损害。噪音能够导致某些海洋生物听力灵敏度下降、甚至永久性听力丧失^[40]，尤其海洋哺乳动物受到噪音的影响最为明显^[42]。据美国国家海洋渔业局(National Marine Fisheries Service, NMFS)现行颁布的声级影响报告显示，海洋中的鳍足类动物对 A 级噪声(能导致物理性伤害的等级)最大可承受瞬时声压标准为 190 dB；所有海洋哺乳动物可承受的 B 级(能导致行为妨害的等级)单脉冲声级为 160 dB；而持续性噪音达到 120 dB 就能够产生干扰^[43]。在海底隧道施工过程中，采用的钻爆、盾构、TBM 和沉管等方法通常要使用盾构机、两栖挖掘机、蛙式打夯机、振动平碾机、混凝土搅拌机、打桩机、振捣器、电气接线设备等通常会产生不同频率的结构性震动和噪声，且大多声源级能达到 200 dB 以上，明显高于大多数海洋生物的耐受级别，因此对海洋生物的听力可能产生极大伤害。尤其盾构机、冲击式打桩机等设备产生的结构性振动噪音强度更大，连续性更强，传播距更遥远^[44]，这对某些深海生物也可能带来较强干扰。

渤海海域是许多海洋哺乳动物的栖息地，包括长须鲸(*Balaenoptera physalus*)、小须鲸(*Balaenoptera acutorostrata*)、虎鲸(*Orcinus orca*)、伪虎鲸(*Pseudorca crassidens*)、宽吻海豚(*Tursiops truncatus*)、真海豚(*Delphinus delphis*)、江豚(*Neophocaena asiaorientalis*)等^[13]。这些哺乳类海洋动物对噪声干扰尤其敏感。尤其需要关注的是，渤海海域是国家一级保护物种斑海豹(*Phoca largha*)的栖息地。研究表明，斑海豹对噪音干扰极为敏感^[45]，特别是在其繁殖季由于声讯交流更为频繁，因此该时期受到噪音干扰的可能性更大^[46]。渤海海域是全球 8 个斑海豹繁殖区中最南端的一个，其栖息地主要位于大连西部与北部的辽东湾以及南部山东的长岛(庙岛群岛)海域。由于目前来渤海海域繁殖的斑海豹种群数量已经大大减少，因此目前这两处繁殖栖息地已经被划为国家级或省级自然保护区。从渤海跨海通道的规划方案来看，其路径与这两个分布区相邻较近甚至存在空间重叠(南部的长岛)，因此，通道建设将给斑海豹种群保护带来更多的挑战。据美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration)于 2009 年发表的物种状况评估报告指出，西北太平洋南部区域包括黄、渤海区域和日本海区域在内的斑海豹除了人为捕杀之外，水下噪声已经成为其最主要的干扰因素^[47]。

除了听力损害，水下噪声对海洋生物的行为也能产生影响^[48]。同样，大型海洋哺乳动物受到的影响更为显著^[49]。来自美国自然资源保护委员会(NRDC)的一项报告显示，海洋声呐探测仪产生的冲击波能够明显改变鲸和海豚的捕食、交配以及躲避捕食者等的行为，严重时还可能导致个体死亡^[50]。美国海军在近些年的数次声呐实验中，曾经发现周边海域有大量领航鲸、座头鲸等搁浅或自杀性行为。而这种死亡与声呐的使用具有直接的相关性^[51]。海底隧道在前期勘测以及建设过程中通常也需要使用声呐设备，无疑会给这些大型海洋生物带来巨大压力。

水下噪音还会增加鲸类、蟹类和鱼类等的荷尔蒙水平，导致其精神压力增加^[50]。严重的还会导致鱼类脏器(如脑、耳、肾、肝脏等)出血和中枢神经系统损伤^[51]。例如，美国安德森卡博特海洋生物中心主任 Rolland 等^[52]在对露脊鲸的粪便研究中发现，由于长期受低频噪音的干扰，露脊鲸精神压力明显增加，其消化系统功能受到了严重损害。除了大型海洋物种之外，噪音对海龟以及其它鱼类捕食的成功率、繁殖率等也能产生影响^[40]。

2.3 光污染

随着人类活动强度的增加以及城镇化的普及，沿海地区越来越多的人造光对海洋生物也产生了重要影响。跨海通道在建设、运营过程中也将使用大量的照明设施，尤其水上道桥部分在夜间将产生大量的光污染，这对周边海域的生物将产生严重胁迫。这是因为海洋中的很多脊椎动物、哺乳动物、鱼类和海鸟等都有趋光或避光行为。那些暴露于人造光源下的海洋生物会因光的干扰而产生迷航^[53]、行为异常、捕食关系的改变^[54]等。例如，在加蓬首都利伯维尔，由于城市发展，海滩的棱皮龟(*Dermochelys coriacea*)筑巢地受到来自附近建筑物人造光的影响，使得当地已近濒危的棱皮龟种群受到严重威胁^[55]；在阿森松岛(Ascension Island)海滩，几百只刚孵出的绿海龟(*Chelonia mydas*)因受到岸边篝火的吸引而冲向沙滩，最终因无法返航而死亡^[56]。幼年海龟还可能因光的误导而迷航，增加脱水或被捕食的风险^[55]。

人造光还能对海洋物种的捕食产生影响^[53]。研究发现，不同光照环境条件下斑海豹(*Phoca vitulina*)对鲑鱼的捕食量明显不同^[57]。可以预见，如果渤海通道采用“南桥北隧”方案，那么南部海域道桥部分使用的大量人造光源将对周边的斑海豹种群产生严重

干扰,这显然对本已数量稀少的斑海豹种群极为不利。除了海洋哺乳动物,人造光源还会促使某些海洋无脊椎动物附着在人造设施上,造成近岸生物污染,改变水下群落结构^[58]。

事实上,光污染对海洋生物的影响绝不仅仅限于浅海。最近的一项研究表明,光不仅能够浅水中传播,也能够辐射至深海并在海底广泛传播^[59]。因为人造光源(如 LED 光源)大多由红、绿、蓝三种光混合形成。其中,绿色和蓝色波长能够传播至深海,分别使高达 76%和 70%的海洋底层暴露在光照之下,从而影响海底生态系统^[59]。可见,光污染已经成为威胁海洋生物的一个重要干扰源。

2.4 阻隔效应

海洋中的许多物种都具有洄游特性,因此某些关键的生态廊道对其至关重要。在渤海海域,由于其属

于半封闭结构,只有渤海海峡与外部的黄海相连,这就使得渤海海峡成为鲸类、海豚、江豚以及斑海豹等海洋物种的唯一生态廊道^[60],因此其生态功能至关重要。但由于渤海跨海通道的规划路径恰与渤海海峡重合,虽然为了避免产生物理性隔离,该方案采用了“南桥北隧”或“全隧道”的方案,但渤海海峡水深相对较浅,如果在建设施工过程中存在噪音等干扰源,那么同样可能因该区域生境质量的下降而妨碍物种的运动与洄游,产生与陆地生态系统相似的隔离效应^[61]。例如,对斑海豹种群而言,每年十一月左右从日本海南下穿越渤海海峡(北部老铁山水道或南部砬矶水道)进入渤海斑海豹保护区进行繁殖产仔,并于第二年五月左右再次洄游至北部日本海(图 2)。如果渤海海峡这一唯一的生态通道存在干扰,生境质量下降,那么其洄游产仔就可能会受到影响。

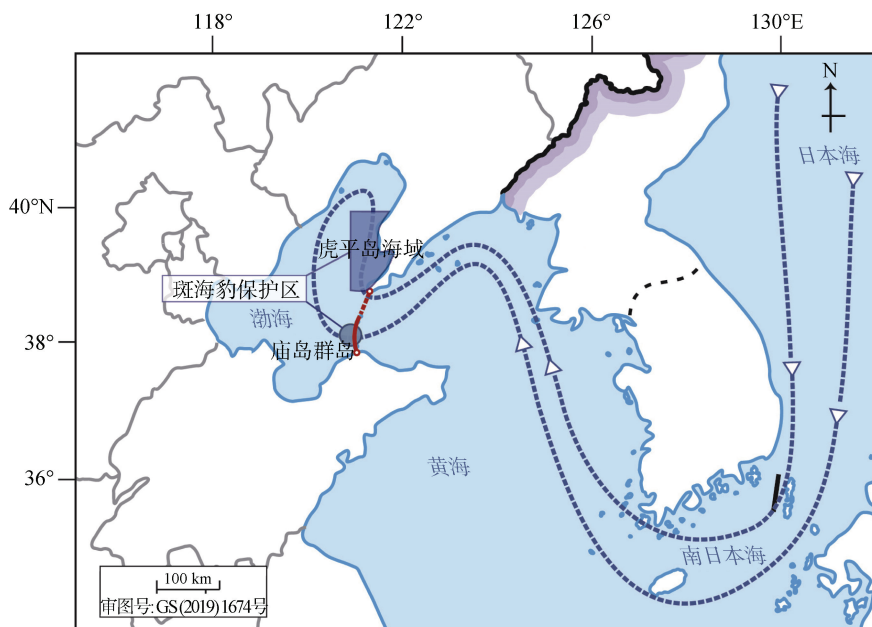


图 2 斑海豹迁徙路线

Fig. 2 Migration routes of the spotted seal (*Phoca largha*)

生态通道受到影响,还会减少渤海海域生物种群与外部海域生物种群之间的基因交流,对种群的存续极为不利,尤其某些濒危小种群。韩家波^[62]在对渤海斑海豹种群的分子遗传特征研究中发现,该海域的种群与其他海域的种群存在生殖隔离,其原因除了过去几十年人类的捕杀以及栖息地破坏导致的种群瓶颈效应之外,一个重要原因就是辽东湾与其他海域(如最近的日本海)存在地域性隔离,因此导致了种群的分化。可见,如果渤海海峡的生态

廊道功能进一步被弱化,那么就可能增加成为“死海”的风险。

2.5 保护区影响

目前国际上将建立海洋保护区作为恢复海洋生物多样性、维持海洋生态系统功能的最主要方式之一。在渤海海域,为了保护不同物种对象,已经建立多个不同级别的海洋自然保护区(图 3)。据近几年的数据统计,在通道北端的辽宁省,由海洋与渔业主管部门管理的海洋保护区中包括 7 个海洋特别保护区、

4 个海洋自然保护区和 7 个渔业自然保护区,如旅顺口区的蛇岛老铁山国家级自然保护区、大连斑海豹国家级自然保护区、大连老偏岛玉皇顶海洋生态自然保护区以及大连三山岛海珍品自然保护区等。蛇岛老铁山保护区的保护对象为蝮蛇、鸟类及多种野生动植物;旅顺口西北部的猪岛、虎平岛、蚂蚁岛等海域为斑海豹国家级自然保护区;旅顺东北部的老偏岛玉皇顶海

洋生态自然保护区的保护对象是刺参、皱纹盘鲍、紫海胆、紫石房蛤、香螺、魁蚶、马尾藻及周围海洋生态系统。除了这些野生动、植物和海洋生物保护区之外,还有金石滩地质遗迹等非海洋生物自然保护区等。北部的这些保护区中,距离通道较近的仅有几公里到几十公里的距离(例如三山岛保护区只有约 60 km),较远的也只有 140 km 左右。

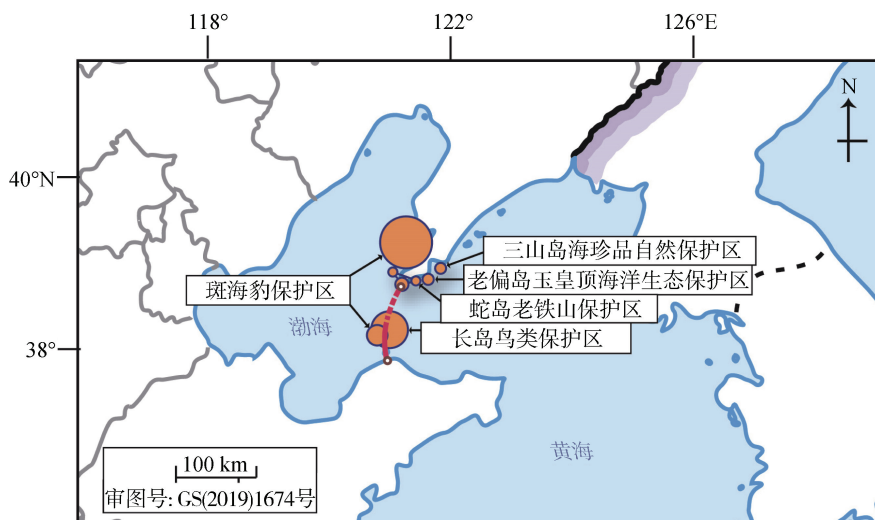


图 3 渤海跨海通道与周边主要海洋保护区的相对位置关系

Fig. 3 Relative locations between the BSCC and the marine protected areas (MPAs)

在通道南端的山东省海域,建有 88 个不同类型的海洋保护区(截止 2016 年)。其中长岛国家级自然保护区和庙岛斑海豹自然保护区恰好是该跨海通道的途径地,距离南部入口较近。长岛国家级自然保护区既是多种珍稀濒危物种的保护区,也是自然景观和历史文化遗迹的重点分布区,同时也是中国目前唯一的海岛国家地质公园,是渤海的“咽喉”,其保护对象包括鹰、隼等猛禽、各种鸟类、海洋动物及其栖息地。该保护区也是鸟类的重要迁徙通道和中转站。在 32 个岛屿中,有 12 个岛已经被划为猛禽保护区。

渤海海域的这些海洋(包括部分陆地)保护区在陆地、湿地与海洋生态系统及物种保护中具有关键性的作用。但由于渤海跨海通道与部分海洋保护区(也包括部分陆地和海岛生态系统)在地理空间上较近甚至重叠(图 3),因此这将极大增加保护区的管理压力,尤其通道南北两端出入口附近的几个保护区所受影响可能更大。与陆地保护区不同,海洋保护区具有更明显的动态性特征。通常认为,保护区中的生

命形式要维持最低可持续种群数量,就要求保护区必须有足够大的面积,并在功能上保持相对的完整性,才能实现内部与外部种群在营养动力学与基因等方面的交换^[63]。因此如果保护区周边存在跨海通道这种超级海洋工程,保护效果可能会因此大大下降。这对于保护区来说也将带来更多挑战。

实际上,渤海海域近年来由于受临港工业和保护区功能衰退等诸多因素影响,部分保护区面积已经被调整或缩减^[64]。如辽宁蛇岛老铁山等 9 个沿海海洋自然保护区面积被调减的总量已达 5 756.77 km²^[65]。这种面积的缩小与周边高强度干扰环境的叠加,将进一步加剧这些保护区管理的难度,给保护工作带来更多的挑战和风险。而保护区周边栖息地的退化,也必将进一步割裂不同海域或保护区的生态联系,对未来保护区网络的构建产生不利影响。

除了影响保护成效之外,保护区周围干扰的存在还会影响周边的渔业。有研究表明,海洋保护区的建立,会使得区内种群密度和空间资源竞争压力增加,促使某些个体向保护区边界外部溢出^[66],从而

有利于周边渔业的发展。但如果周边存在干扰因素,将抑制这种溢出效应,导致渔业产量下降,影响渔业发展。

3 渤海跨海通道建设影响评估框架

为了充分理解跨海通道建设可能产生的各种生

态影响,本文在 New 等^[67]的观鲸影响模型基础上提出海洋通道建设影响评估模型框架(图 4)。该框架呈现了跨海通道建设给海洋生物个体、种群以及保护策略可能产生的各种影响,体现了通道建设给海洋保护行动可能带来的诸多风险和挑战。该框架有助于为其生态影响评估提供理论参考。

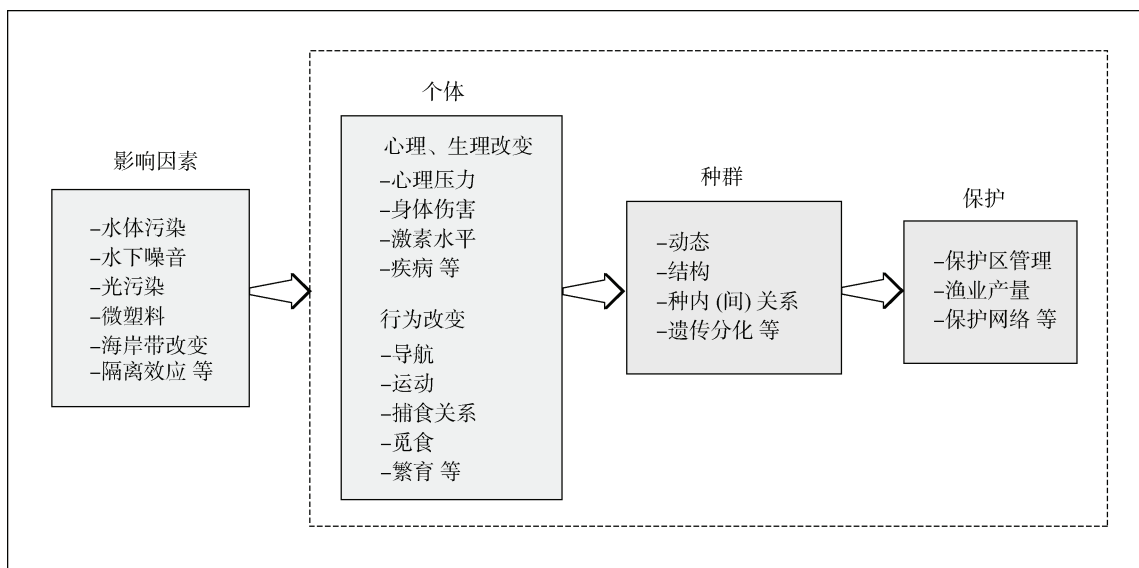


图 4 渤海跨海通道生态影响评估框架

Fig. 4 Evaluation framework for the ecological effects of the BSCC

4 结论

建设渤海跨海通道对于环渤海地区乃至东北亚的社会经济发展无疑将具有促进作用。但通过以上分析发现,该项目的建设也将给海洋生态带来巨大风险。尤其近年来渤海面临生态环境不断恶化、渔业资源“三场一通道”不断被侵占、生物栖息地破碎化、海洋灾害频发等^[68]严峻形势下,建设跨海通道将进一步给渤海及其周边海域的生态环境带来更多的压力和挑战。因此,对于渤海跨海通道这一世界级工程,除了从经济、区域一体化和地缘战略视角进行评估之外,更要从海洋生态保护视角进行全面、深入的分析和论证,针对不同的保护对象和目标(如物种、种群、生态系统、生物多样性保护等)构建科学、有效的生态影响评价体系,来预测和评估不同尺度下可能产生的各种影响。尤其有必要开展模拟性的实验论证,以防止工程建设和运营给海洋生态环境带来不可逆转或无法预估的重大风险。

然而从渤海重要的生态地位、半封闭的特征以及当前的退化程度来看,仅凭技术性评估可能并不

能完全避免其给海洋生态带来的各种冲击和影响,因为海洋环境中复杂的影响因素以及生态过程并不能完全实现模拟,一些潜在的连锁效应可能需要在其建成多年后才能加以识别,因此这对于未来的海洋生态安全与海洋保护具有极大的不确定性和风险性。尤其某些具有关键生态功能的海洋栖息地和生态通道如果受到破坏,将给渤、黄海乃至周边整个区域生态都会带来重大影响。

另外,从海洋保护与发展战略视角来看,目前中国仍落后于其它海洋强国。实践表明,海洋空间资源的特殊性及其在国际上的战略意义使得海洋保护从来都不是单纯地保护生态和文化景观,它更体现着一种国家对海洋资源的控制权力和管理能力^[69-70],尤其在当前一些海洋强国如美国、英国、法国、澳大利亚等争相通过设立大型海洋保护区来维持和扩张海洋权益的背景下,大规模开发海洋空间资源可能并非最优选项,而通过强化海洋保护来实现国家海洋安全并进一步获取更多的国际海洋权益,可能更具有长远的战略意义。

参考文献:

- [1] 周世锋, 秦诗立. 海洋开发战略研究[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2009.
ZHOU Shifeng, QIN Shili. Study on ocean development strategy[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2009.
- [2] 宋克志, 姜爱国, 王梦恕. 渤海海峡跨海通道“南桥北隧”方案初步研究[J]. 隧道建设, 2011, 31(5): 536-542.
SONG Kezhi, JIANG Aiguo, WANG Mengshu. Research on “Bridge in South and Tunnel in North” option for Bohai Strait Sea-crossing fixed link[J]. Tunnel Construction, 2011, 31(5): 536-542.
- [3] 柳新华. 渤海海峡跨海通道建设的必要性及紧迫性[J]. 中国工程科学, 2013(12): 10-17.
LIU Xinhua. The necessity and urgency of Bohai Strait cross-sea channel construction[J]. Strategic Study of CAE, 2013(12): 10-17.
- [4] 王梦恕, 宋克志. 渤海湾跨海通道建设的紧迫性及现实条件和初步方案[J]. 北京交通大学学报, 2013, 37(1): 1-10.
WANG Mengshu, SONG Kezhi. Urgency and current construction conditions and preliminary scheme of Bohai Strait cross-sea channel[J]. Journal of Beijing Jiao Tong University. 2013, 37(1): 1-10.
- [5] 尹延鸿, 叶思源, 赵铁虎, 等. 渤海海峡跨海桥隧建设的海洋地质环境分析及修建方案思考[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2017(3): 5-20.
YIN Yanhong, YE Siyuan, ZHAO Tiehu, et al. Marine geo-environment analysis of the proposed bridge-tunnel path system across the Bohai strait and suggestions on construction schemes[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2017(3): 5-20.
- [6] 王振波, 徐建刚, 孙东琪. 渤海海峡跨海通道对中国东部和东北地区交通可达性影响[J]. 上海交通大学学报, 2010(6): 810-811.
WANG Zhenbo, XU Jiangang, SUN Dongqi. The effect of Bohai Sea-Crossing passage on the traffic accessibility of eastern coastal area in China[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2010(6): 810-811.
- [7] 王玉梅, 丁俊新, 孙海燕, 等. 渤海海峡跨海通道对辽东、山东半岛城市物流联系的影响[J]. 经济地理, 2016, 36(12): 104-111, 176.
WANG Yumei, DING Junxin, SUN Haiyan. et al. The influence of trans-bohai Strait passageway on urban logistics contact in Shandong and Liaodong Peninsula[J]. Economic Geography, 2016, 36(12): 104-111, 176.
- [8] 吴晓青, 程国山, 王雪燕. 渤海海峡跨海通道建设对环渤海地区海洋功能区划的影响[J]. 海洋开发与管理, 2009, 26(7): 7.
WU Xiaqing, CHENG Guoshan, WANG Xueyan. Influence of Bohai Strait cross-sea channel construction on marine function zoning in Bohai Rim region[J]. Ocean Development and Management, 2009, 26(7): 7.
- [9] 毕剑, 李悦铮, 江海旭, 等. 渤海海峡跨海通道背景下环渤海旅游圈发展研究[J]. 海洋开发与管理, 2014, 31(11): 115-119.
BI Jian, LI Yuezheng, JIANG Haixu. et al. Research on the development of tourism circle around Bohai Sea under the background of Bohai Strait cross-sea passage[J]. Ocean Development and Management, 2014, 31(11): 115-119.
- [10] 孙峰华, 陆大道, 代合治, 等. 渤海海峡跨海通道建设与中国的地缘政治战略[J]. 地理科学, 2017, 31(7): 1-10.
SUN Fenghua, LU Dadao, DAI Hezhi. et al. The construction of Trans-Bohai strait passageway and its geopolitical strategies of China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2017, 31(7): 1-10.
- [11] 王玉梅, 李世泰. 渤海海峡跨海通道建设环境影响研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2007, 17(5): 90-94.
WANG Yumei, LI Shitai. Preliminary study on environmental impact assessment of the significant strategy project of the cross-sea passage on Bohai Sea Strait[J]. China Population Resources and Environment, 2007, 17(5): 90-94.
- [12] 胥延钊. 渤海渔业生物群落结构特征研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2021.
XU Yanzhao. Study on the characteristics of structure of community of fishery species in the Bohai Sea[D]. Shang Hai: Shanghai Ocean University, 2021.
- [13] 祝茜, 姜波, 汤庭耀. 中国海洋哺乳动物的种类、分布及其保护对策[J]. 海洋科学, 2000, 24(9): 35-39.
ZHU Qian, JIANG Bo, TANG Tingyao. Species, distribution, and protection of marine mammals in the Chinese coastal waters[J]. Marine Sciences, 2000, 24(9): 35-39.
- [14] 中华人民共和国生态环境部. 2018 年中国海洋生态环境状况公报[R]. 2019.
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. China Marine Ecological and Environmental Status Bulletin 2018[R]. 2019.
- [15] 洛昊, 李冕, 刘志军, 等. 大连市滨海湿地鸟类多样性调查[J]. 海洋开发与管理, 2019, 36(2): 47-55.
LUO Hao, LI Mian, LIU Zhijun. et al. Investigation on bird diversity in coastal wetland habitats of Dalian[J]. Ocean Development and Management, 2019, 36(2): 47-55.
- [16] LACHMANN F, ALMROTH B C, BAUMANN H, et al. Marine plastic litter on Small Island Developing States (SIDS): Impacts and measures[R]. Swedish Institute for the Marine Environment, 2017.

- [17] COZAR A, ECHEVARRIA F, GONZALEZGORDILLO J I, et al. Plastic debris in the open ocean[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, 111(28): 10239-10244.
- [18] MOORE C J. Synthetic polymers in the marine environment: a rapidly increasing, long-term threat[J]. *Environmental Research*, 2008, 108(2): 131-139.
- [19] 陈孟玲, 高菲, 王新元, 等. 微塑料在海洋中的分布、生态效应及载体作用[J]. *海洋科学*, 2021, 45(12): 125-141.
CHEN Mengling, GAO Fei, WANG Xinyuan, et al. Distribution, ecological effects, and carrier function of microplastics in the marine environment[J]. *Marine Sciences*, 2021, 45(12): 125-141.
- [20] 刘香, 茹小尚, 张立斌. 海洋微塑料污染的生物效应研究进展[J]. *海洋科学*, 2021, 45(3): 122-133.
LIU Xiang, RU Xiaoshang, ZHANG Libin. Research progress on the biological effects of marine microplastic pollution[J]. *Marine Sciences*, 2021, 45(3): 122-133.
- [21] RANDS M R W, ADAMS W M, BENNUN L, et al. Biodiversity conservation: challenges beyond 2010[J]. *Science*, 2010, 329: 1298-1303.
- [22] RYAN P G. Seabirds indicate changes in the composition of plastic litter in the Atlantic and south-western Indian Oceans[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2008, 56(8): 1406-1409.
- [23] RODRIGUEZSEIJO A, LOURENCO J, ROCHASANTOS T A, et al. Histopathological and molecular effects of microplastics in *Eisenia Andrei Bouché*[J]. *Environmental Pollution*, 2017, 220: 495-503.
- [24] ORY N C, GALLARDO C, LENZ M, et al. Capture, swallowing, and egestion of microplastics by a planktivorous juvenile fish[J]. *Environmental Pollution*, 2018, 240: 566-573.
- [25] HUANG J, KOONGOLLA J B, LI H, et al. Microplastic accumulation in fish from Zhanjiang mangrove wetland, South China[J]. *Science of The Total Environment*, 2020, 708: 134839.
- [26] CHEN Q, GUNDLACH M, YANG S, et al. Quantitative investigation of the mechanisms of microplastics and nanoplastics toward zebrafish larvae locomotor activity[J]. *Science of The Total Environment*, 2017, s584-585: 1022-1031.
- [27] QIAO R X, DENG Y F, ZHANG S H, et al. Accumulation of different shapes of microplastics initiates intestinal injury and gut microbiota dysbiosis in the gut of zebrafish[J]. *Chemosphere*, 2019, 236: 124334.
- [28] MARQUES-SANTOS L F, GRASSI G, BERGAMI E, et al. Cationic polystyrene nanoparticle and the sea urchin immune system: biocorona formation, cell toxicity, and multixenobiotic resistance phenotype[J]. *Nanotoxicology*, 2018, 12(8): 847-867.
- [29] TEUTEN E L, SAQUING J M, KNAPPE D R U, et al. Transport and release of chemicals from plastics to the environment and to wildlife[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 2007, 364: 2027-2045.
- [30] SHARMA S, CHATTERJEE S. Microplastic pollution, a threat to marine ecosystem and human health: a short review[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24: 21530-21547.
- [31] GOLDSTEIN M C, ROSENBERG M, CHENG L. Increased oceanic microplastic debris enhances oviposition in an endemic pelagic insect[J]. *Biology Letters*, 2012, 8(5): 817-820.
- [32] 刘洁, 吴仁海. 珠江三角洲水环境问题及其调控方略探讨[J]. *环境科学与技术*, 2004, 27(5): 45-47.
LIU Jie, WU Renhai. Water pollution in Pearl River Delta: problems and control measures[J]. *Environmental Science and Technology*, 2004, 27(5): 45-47.
- [33] 王建国, 汪义杰, 崔树彬, 等. 珠海——澳门十字门水道隧道工程对浮游植物群落结构影响分析[J]. *人民珠江*, 2014, 35(5): 60-64.
WANG Jianguo, WANG Yijie, CUI Shubin, et al. Effects of Zhuhai-Macao Cross Gate Channel tunnel on phytoplankton community structure[J]. *Pearl River*, 2014, 35(5): 60-64.
- [34] REYNOLDS T J, CLIFF N. An interactive preference ordering model and its monte carlo evaluation[J]. *Psychometrika*, 1984, 49(2): 247-255.
- [35] 黄丽芬. 浅析澳门大学横琴校区过海隧道顶部埋设深度[J]. *珠江水运*, 2011(8): 36-37.
HUANG Lifen. Analysis on the buried depth of the top of the Cross-sea tunnel to Campus of University of Macau in Hengqin[J]. *Pearl River Water Transport*, 2011(8): 36-37.
- [36] 吴晓青, 程国山, 王雪燕. 渤海海峡跨海通道建设对环渤海地区海洋功能区划的影响[J]. *信息集成与应用实验室*, 2008, 26(7): 109-115.
WU Xiaoqing, CHENG Guoshan, WANG Xueyan. Influence of Bohai Strait Cross-sea Channel construction on marine function regionalization in Bohai Rim region[J]. *Information Integration and Application Laboratory*, 2008, 26(7): 109-115.
- [37] PURCELL J E, UYE S, LO W T. Anthropogenic causes of jellyfish blooms and their direct consequences for humans: a review[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2007, 350: 153-174.
- [38] 孙晓宇, 吕婷婷, 高义, 等. 2000—2010 年渤海湾岸线变迁及驱动力分析[J]. *资源科学*, 2014, 36(2): 413-419.
SUN Xiaoyu, LÜ Tingting, GAO Yi, et al. Driving force analysis of Bohai Bay coastline change from 2000

- to 2010[J]. Resources Science, 2014, 36(2): 413-419.
- [39] 涂晶, 白玉川, 徐海珏, 等. 渤海湾围垦工程引起的岸线及潮流变化[J]. 港工技术, 2017, 54(4): 1-4.
TU Jing, BAI Yuchuan, XU Haijue, et al. Change of coastline and tidal current caused by Bohai Bay reclamation project[J]. Port Engineering Technology, 2017, 54(4): 1-4.
- [40] ERBE C. Effects of underwater noise on marine mammals[J]. Advances in Experimental Medicine and Biology, 2012, 730: 17-22.
- [41] BLAIR H B, MERCHANT N D, FRIEDLAENDER A S, et al. Evidence for ship noise impacts on humpback whale foraging behavior[J]. Biol Lett-UK, 2016, 12: 1-5.
- [42] TAVOLGA W N. 6 Sound production and detection[J]. Fish Physiology, 1971, 5: 135-205.
- [43] 苏冠龙, 许肖梅. 水下打桩和船舶噪声对斑海豹听觉影响的初步分析[J]. 应用海洋学学报, 2013, 32(2): 178-183.
SU Guanlong, XU Xiaomei. Preliminary analysis on the impact of underwater pile driving noise and shipping noise on spotted seal (*Phoca largha*)[J]. Journal of Applied Oceanography, 2013, 32(2): 178-183.
- [44] 牛富强, 杨燕明, 许肖梅, 等. 海上风电场运营期水下噪声测量及特性初步分析[J]. 振动与冲击. 2016, 35(12): 215-220.
NIU Fuqiang, YANG Yanming, XU Xiaomei. et al. Measurements and analysis of underwater noise from the operation of offshore wind farms[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(12): 215-220.
- [45] KASTAK D, SCHUSTERMAN R J. Low-frequency amphibious hearing in pinnipeds: methods, measurements, noise, and ecology[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1998, 103(4): 2216-2228.
- [46] RUGH J D, SHELDEN K E W, WITHROW D E. Spotted seals, *Phoca largha*, in Alaska[J]. Marine Fisheries Review, 1997, 59(1): 1-18.
- [47] BOVENG P L, BENGTSON J L, BUCKLEY T W, et al. Status review of the spotted seal (*Phoca largha*)[R]. 2009, U.S. Dep. Commer., NOAA Tech. Memo. NMFS-AFSC-200, 153p.
- [48] HARWOOD J, KING S, BOOTH C, et al. Understanding the population consequences of acoustic disturbance for marine mammals//the effects of noise on aquatic life II[M]. New York: Springer, 2016.
- [49] NOWACEK D P, THORNE L H, JOHNSTON D W, et al. Responses of cetaceans to anthropogenic noise[J]. Mammal Review, 2007, 37(2): 81-115.
- [50] MOTT M. Whales at Risk from New U.S. Navy Sonar Range, Activists Say, Nat'l Geographic News [EB/OL]. 2021-10-25. <http://news.nationalgeographic.com/news/pf/41287542.html>.
- [51] CRAIG R K, BEYOND W V. NRDC: a decade of litigating the navy's active SONAR around the environmental exemptions[J]. Boston College Environmental Affairs Law Review, 2009, 36(2): 353-388.
- [52] ROLLAND R M, PARKS S E, HUNT K E, et al. Evidence that ship noise increases stress in right whales[J]. Proc Biol Sci, 2012, 279(1737): 2363-2368.
- [53] LONGCORE T, RICH C. Ecological light pollution[J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 2004, 2(4): 191-198.
- [54] DEPLEDGE M H, GODARD-CODDING C A J, BOWEN R E. Light pollution in the sea[J]. Marine Pollution Bulletin, 2010, 60(9): 1383-1385.
- [55] BOURGEOIS S, GILOT-FROMONT E, VIALLEFONT A, et al. Influence of artificial lights, logs and erosion on leatherback sea turtle hatchling orientation at Pongara National Park, Gabon[J]. Biological Conservation, 2009, 142: 85-93.
- [56] MORTIMER J A. Ascension Island: British jeopardize 45 years of conservation[A/OL]. Mar. Turtle Newslett, 1979, <http://www.seaturtle.org/mtn/archives/mtn10/mtn10p7b.shtml>.
- [57] YURK H, TRITES A W. Experimental attempts to reduce predation by harbor seals on out-migrating juvenile salmonids[J]. Transactions of the American Fisheries Society, 2000, 129: 1360-1366.
- [58] DAVIES T W, COLEMAN M, GRIFFITH K M, et al. Night-time lighting alters the composition of marine epifaunal communities[J]. Biology Letters, 2015, 11(4): 20150080.
- [59] DAVIES T W, MCKEE D, FISHWICK J, et al. Biologically important artificial light at night on the seafloor[J]. Scientific Reports, 2020, 10: 12545.
- [60] 范国坤, 韩家波, 黄继成, 等. 庙岛群岛海域斑海豹的分布与保护[J]. 水产科学, 2005, 24(3): 16-18.
FAN Guokun, HAN Jiabo, HUANG Jicheng, et al. Distribution and protection of the spotted seals in Miaodao Islands[J]. Fisheries Science, 2005, 24(3): 16-18.
- [61] KNIGHTS B, WHITE E M. Enhancing immigration and recruitment of eels: the use of passes and associated trapping systems[J]. Fisheries Management and Ecology, 1998, 5: 459-471.
- [62] 韩家波. 中国海域斑海豹种群资源和分子遗传特征研究[D]. 青岛: 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2009.
HAN Jiabo. Studies on population resources and molecular genetic characteristics of spotted seals (*Phoca largha*) in Chinese waters[D]. Qingdao: Institute of Oceanology, The Chinese Academy of Sciences, 2009.
- [63] ROFF J, ZACHARIAS M, DAY J. Marine conservation ecology[M]. London: Routledge, 2011.

- [64] 曾江宁, 陈全震, 黄伟, 等. 中国海洋生态保护制度的转型发展——从海洋保护区走向海洋生态红线区[J]. 生态学报, 2016, 36(1): 1-10.
ZENG Jiangning, CHEN Quanzhen, HUANG Wei, et al. Reform of the marine ecological protection system in China: from marine protected areas to marine ecological redline regions[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(1): 1-10.
- [65] 何萍, 贾俊艳, 侯丽萍, 等. 借鉴国际经验保护滨水生态空间[J]. 环境保护, 2014, 42(11): 64-66.
HE Ping, JIA Junyan, HOU Liping, et al. Using international experience to protect waterfront and riparian area[J]. *Environmental Protection*, 2014, 42(11): 64-66.
- [66] ROWLEY R J. Marine reserves in fisheries management[J]. *Aquatic Conservation Marine & Freshwater Ecosystems*, 2010, 4(3): 233-254.
- [67] NEW L F, HALL A J, HARCOURT R, et al. The modelling and assessment of whale-watching impacts[J]. *Ocean Coast Manage*, 2015, 115: 10-16.
- [68] 关晓捷, 鞠茂伟, 陈兆林, 等. 渤海围填海历史遗留问题处理的实践经验启示——以大连金普新区为例[J]. *海洋环境科学*, 2021, 40(6): 965-969.
GUAN Xiaojie, JU Maowei, CHEN Zhaolin, et al. The experience reference on historical and problematic reclamation of Bohai sea—a case of Jinpu New Area[J]. *Marine Environmental Science*, 2021, 40(6): 965-969.
- [69] 张晓. 国际海洋生态环境保护新视角: 海洋保护区空间规划的能效[J]. *国外社会科学*, 2016(5): 89-98.
ZHANG Xiao. A new perspective of international marine ecological environment protection: the efficacy of marine reserve spatial planning[J]. *Social Sciences Abroad*. 2016(5): 89-98.
- [70] 郑苗壮, 刘岩, 丘君, 等. 美、英、法等国建立大型远岛海洋保护区的影响[J]. *吉林大学社会科学学报*, 2016, 56(6): 44-50.
ZHENG Miao Zhuang, LIU Yan, QIU Jun, et al. An analysis of the impact of United States, UK and France in establishing large distant islands marine protected zones[J]. *Jilin University Journal Social Sciences Edition*, 2016, 56(6): 44-50.

Review of the ecological effects of constructing the Bohai Sea Crossing Corridor

LIU Bing-liang¹, SU Jin-bao², MA Jian-zhang³

(1. School of business, Ludong University, Yantai 264025, China; 2. School of Economics and Management, Northeast Forestry University, Ha'erbin 150040, China; 3. School of Wildlife and Protected Area, Northeast Forestry University, Ha'erbin 150040, China)

Received: Jan. 10, 2022

Key words: oceanic project; marine noise; light pollution; marine protected areas; marine development strategy

Abstract: Marine ecosystems provide various ecological services, which are of great significance to human survival and development. However, with the recent increase in marine exploitation, many large-scale sea-related projects are threatening marine ecology. As a world-class large-scale ocean transportation project, the Bohai Sea Crossing Corridor (BSCC) project has been proposed for nearly 30 years since the beginning of the 1990s. To investigate the potential risks to marine ecology, this study analyzed and discussed the potential effects of marine pollution, underwater noise, artificial light, and microplastics caused by the BSCC on the physiology, behavior, and migration of marine organisms, as well as on the management of marine protected areas and their surrounding fisheries. Accordingly, we propose an impact assessment framework for constructing the BSCC to provide a theoretical basis and reference.

(本文编辑: 康亦兼)