

半封闭海域生态修复策略研究

——以渤海为例

张少春, 宋静静, 刘凯凯, 于道德, 李友训, 马健, 李彬, 王先磊

(山东省海洋科学研究院 青岛国家海洋科学研究中心 青岛 266104)

摘要:渤海作为我国唯一的半封闭型海域,是京津冀城市群蓬勃发展的战略支撑和关键依托,其生态环境的稳定与沿岸人类福祉息息相关,其生态环境修复是近年来该领域的研究热点。文章重点围绕全球气候变化和人类活动对渤海生态环境的影响进行了剖析,通过综合对比分析国内外其他类似水域或地区的生态修复既有成果,立足渤海水域特点和现状,提出动态思维与整体保护原则、生境连通性修复原则、不同时空尺度修复原则等生态修复原则,并指出渤海生态修复需理性规划渔业经济活动,统筹考虑渤海生态与冲淡水之间的关系,建议运用前瞻性的思维模式和理念,合理预测、规划、定位、配置、实施和维护渤海生态系统的稳定,重点探索应对全球气候变化的最佳适应性管理策略。

关键词:半封闭海域;渤海;生态修复;全球气候变化;生境连通性

中图分类号:X55;P74

文献标志码:A

文章编号:1005-9857(2022)09-0003-08

Research on Ecological Restoration Strategy in the Semi-enclosed Sea Area: A case study in the Bohai Sea

ZHANG Shaochun, SONG Jingjing, LIU Kaikai, YU Daode, LI Youxun,
MA Jian, LI Bin, WANG Xianlei

(Marine Science Research Institute of Shandong Province(National Marine Scientific Center, Qingdao), Qingdao 266104, China)

Abstract: As the only semi-enclosed sea area in China, the Bohai Sea is the strategic support and key support for the vigorous development of Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration. The stability of its ecological environment is closely related to the well-being of coastal human beings, and its ecological environment restoration has become a research hotspot in recent years. This study focused on the analysis of the impact of global climate change and human activities on the ecological environment of the Bohai Sea, and comprehensively compared and analyzed the successful cases of ecological restoration in similar waters at home and abroad. Based on the characteris-

收稿日期:2022-01-17;修订日期:2022-08-05

基金项目:中国工程科技发展战略山东研究院咨询研究项目(202103SDYB17);山东省重点研发计划(重大科技创新工程)(2022CXGC010401);山东省重点研发计划(软科学项目)重点项目(2021RZB07028)。

作者简介:张少春,高级工程师,硕士,研究方向为海洋生态保护与资源养护

通信作者:王先磊,研究员,博士,研究方向为海洋科技战略咨询

tics and present situation of the Bohai Sea, some ecological restoration principles such as dynamic thinking and holistic preservation, habitat connectivity restoration principles, and different spatio-temporal scale restoration principle were proposed. It also pointed out that the ecological restoration of the Bohai Sea required rational planning of fishery economic activities, and overall consideration of the relationship between the Bohai Sea ecology and flushing water. It was recommended to use a forward-looking thinking model and concept, reasonably predict, plan, locate, configure, implement and maintain the stability of the Bohai Sea ecosystem, and focus on exploring the best adaptive management strategies to deal with global climate change.

Keywords: Semi-enclosed sea, Bohai Sea, Ecological restoration, Global climate change, Habitat connectivity

0 引言

人类目前面临的最艰巨的挑战是, 是否有集体智慧来驾驭人类世 (Anthropocene), 为人类自身以及共同生活在这个星球上的其他生命维持一个可居住的生物圈^[1]。首先应该改变对于人类社会发展的认知, 即人类社会是属于生物圈和更广泛的地球系统的一部分^[2], 其繁荣和福祉在很大程度上依赖于后两者, 这也是习近平总书记提出的“绿水青山就是金山银山”在社会生态学上最好的诠释。人类社会作为生物圈的一部分而存在, 意味着环境不再是经济或社会之外的东西, 而是文明存在和依赖的基础。人类的社会条件、卫生、文化、民主、权力、正义、平等, 甚至生存问题, 都与地球系统和生物圈交织在一起, 形成了一种复杂的相互作用、相互依存的网络^[3-5], 从个体水平到全球尺度都受到这个网络的影响和调节。

我们已经认识到, 在耦合的社会经济——生态系统中, 人类行为不仅仅受生态变量的影响, 同时对生态变量具有强烈的反馈效应^[6]。因此, 任何不考虑生态环境的经济发展都不具有可持续性。环渤海海洋经济区, 作为我国三大海洋经济区之一, 其稳定发展离不开渤海生态环境问题的解决。全球海域的共性问题, 例如水体污染、气候变化、富营养化、赤潮暴发、生境丧失与退化、外来物种入侵等, 也是近年来渤海生态面临的诸多威胁。

本研究针对全球类似于渤海的半封闭海域存在的异同点进行综合分析, 借鉴成功战略的实施。例如, 借鉴全球其他海岸带或河口地区已经开展的

成功修复案例, 开展渤海退化水域生态修复。针对渤海个性问题, 制定行之有效的治理方案和管理策略, 促进各部门协同创新发展。渤海作为一个半封闭海域, 其系统退化的任何层面都存在着内部联系, 采用保护、修复、改造等多维度的动态管理思维行动起来才是关键前提。

1 渤海水域现状分析

渤海是一个深入大陆的浅海, 也是中国最大的内海, 具有水域封闭性强、自净能力弱、浅海平坡 (坡度 0.13‰) 等特征, 导致其更容易积累污染物^[7]。除了黄河, 还有海河、辽河、滦河等多条河流注入, 仅莱州湾海域自东向西就有胶莱河、虞河和小清河等 10 余条入海河流, 构成极具代表性的海洋近岸生态系统, 是海水富营养化进而诱发赤潮频发的主因^[8]。渤海现有主要经济发展模式也存在诸多问题^[9-10], 如京唐港海运导致的油类污染^[11]、蓬莱 19-3 溢油事件等偶发性生态灾害^[12], 也是渤海水质下降的原因之一, 对海洋生物、邻近群落、生态系统等多个层次的影响更具持续和累计效应^[13-14]。此外, 近年来国内外备受关注的微塑料污染在渤海湾内也较为严重^[15]。

1.1 全球气候变化对渤海水域的影响

全球气候变化对生物的影响显而易见。陆地动物向北或者高海拔地区迁移的平均速度为每 10 年 6.1 km, 而全球气候变迁导致海洋物种 (主要是鱼类和无脊椎动物) 向北迁移的速度更快, 平均速度为每 10 年 45~49 km^[16]。除温度外, 海洋酸化^[17]、局部海洋缺氧^[18]等关键环境因素的变化无

无时无刻不在影响着海洋的生物多样性,如珊瑚礁白化、湿地退化等。未来100年,气候变化将成为决定全球物种分布、多样性格局的重要驱动因素之一。

渤海具有平均水深较浅、水体停留时间较长等水文特征,这决定了渤海未来将成为我国受全球气候变化影响较为显著的地区。其中,渤海作为众多物种的“三场一通道”(产卵场、索饵场、越冬场和洄游通道),临近海岸,水深更浅,气候影响将会更为明显。已有研究表明,海水温度变化会显著影响浮游动物的组成,进而威胁鱼类的繁殖和仔稚鱼的存活^[19]。全球升温对渤海湾“三场一通道”的影响是致命的,物种北移受到陆域限制,众多洄游鱼类的产卵场、越冬场消失,洄游通道被迫关闭,这一点与纬度稍低的地中海和红海极为类似^[20]。

因此,预测全球气候变化对渤海海域主要生境和关键动植物在何时、何地会产生何样的影响,人们又当如何消减或适应影响,这些问题的思考和应对策略就显得尤为紧迫。我们需要深入了解全球气候变化对渤海关键生物种群产生的影响,用以探索采取怎样的渔业管理措施来保障目标生物适应气候变化。以稍高纬度的波罗的海鲑鱼资源变化为例,海洋变暖和酸化对波罗的海鲑鱼的繁殖和幼鱼存活产生极大的负面影响,学者们提出首先应当量化气候变化对鲑鱼渔业三重底线(生态、经济、社会)的影响,并通过降低捕捞死亡率来补偿气候变化造成的负面影响^[21]。

通过就地(in situ)保护措施帮助生物在气候变化中生存、维持种群数量并保证生态功能,例如:通过植被覆盖、生境异质空间构造来缓解全球气候变化对海洋生物的负面影响^[22]。这项工作对于渤海来说意义重大,重要渔业资源的整体迁徙对于渤海渔业经济的打击是致命的,对于渤海水域生态系统的影响也是无可估量的。

1.2 人类活动影响渤海水域富营养化状态

相较于全球气候变化对于渤海造成的长时期缓慢影响,人类密集活动能够在短时间内快速改变渤海水质状况。海洋(尤其是大洋系统)本身作为一个寡营养的实体存在,其各种元素的具体含量、存在形式、测定方法、时空变化、生物需求等的巨大

差异性导致人们很难界定一个生态区域水质情况是否处于富营养化状态。与之密切相关的一个重要生态现象——有害藻华,却能让人们从另一个角度对于富营养化有更直观的认知。资料分析发现:黄渤海交界的长岛水域66年来(1952—2020年)共发现6次赤潮、累计面积1 577 km²,与渤海湾内的东营黄河口海域发现11次赤潮,累计面积4 626.6 km²,以及莱州湾中西部海域发现13次赤潮,累计面积6 616 km²形成鲜明对比;烟台四十里湾(22次)为暴发次数最多的海域,但所暴发的事件多以中小型赤潮(面积<100 km²)为主^[23-24]。表明渤海海域水质在受到陆源污染后形成小型生态区域是十分明显的,富营养化程度在渤海内部差异性很大。

全球大部分半封闭海域在历史上都有赤潮频发的特点,如红海、地中海、波罗的海^[25-26]等。日本濑户内海曾在工业化高度发展的1976年一年内就暴发了229次赤潮,引起了日本政府和科学界的高度重视^[27],在严格控制磷营养盐的排放后,赤潮暴发频率显著下降(约100次/年)。然而,随后的结果却是出乎意料,渔业资源产量竟然随着赤潮改善而降低。该现象呈现一定的滞后性,引起了学者们的极大关注。Yamamoto^[28]研究指出,濑户内海从赤潮频发海域转变为由磷负荷迅速降低而导致的“寡营养(oligotrophication)”海域,磷元素的减少很可能降低了初级生产力,引起了浮游植物种类组成的变化,从而改变了食物网结构,这很可能是渔业产量减少的主要原因。与此同时,营养元素比例严重失衡叠加全球海洋温度变化,导致了濑户内海赤潮优势种由无毒硅藻演变为有毒、有害甲藻,新的有毒藻种不断出现^[29]。

渤海面积约为濑户内海的3倍,前者平均水深18 m,后者平均水深超过38 m,海水容量相当,水体停留时间也较为相似。日本的工业化发展要早于中国,因此濑户内海陆源污染对于海洋生态系统的影响及其治理过程,可以作为渤海开展退化水域生态修复的前车之鉴,其先进的渔业管理也值得我们学习和讨论。将营养元素循环的动力学过程与初级生产力、食物链上行传递相偶联^[30],保证区域生态系统的生物地球化学循环速度,这有利于渤海水

体的稳定性,避免过多生态灾害和生态意外的发生。综上所述,人为或自然因素驱动导致渤海水域正常的营养循环速率降低,是其赤潮等生态灾害频发的诱因之一,而通过简单地限制某一陆源污染物,很可能推动水域向“寡营养”水平演变,从而打破生态系统平衡。

2 渤海生态修复原则

本研究通过综合国内外其他类似水域或地区的生态修复既有成果,结合渤海水域特点和现状^[31],提出以下3点生态修复原则。

2.1 动态思维与整体保护原则

我们希望保护的是完整的渤海生态系统,还是更偏重于保护其服务价值?其实二者并不矛盾,显然后者是依附于前者而存在。然而,长期以来人们更倾向于保护具有较高服务价值的物种或生境,缺乏对生态过程的保护。例如,捕捞对水体的扰动、对底栖生物的影响等生态过程往往被忽视,但恰恰是此类生态过程影响着生态连通性和生态系统功能^[32]。偏重服务价值的保护仍是以人类利益为先、生态保护在后,最终仍会导致类似长江水系破碎性保护悲剧的发生——长江白鲟(*Psephurus gladius*)灭绝^[33]。

目前,整个渤海水域的完全禁渔是很难被接受的,除非我们摒弃以人类为中心的世界观^[34]。再者,随着全球气候变暖,暖水物种北迁入渤海,渤海生态环境持续变化是不可避免的。渤海保护的终极目标之一应当是在维持渤海水域现存生态系统稳定性和服务价值的前提下,最大化修复受损生境、保护生物多样性。而目前的保护规划和政策则聚焦在大型脊椎动物或具有经济价值物种,这与生态保护的初衷不一致,也是成效不理想的原因之一。

此外,渤海水域作为一个庞大复杂的生态系统,其相变(regime shift)发生具有明显的时滞性。减少或避免发生重大生态灾害事件^[23,35](如赤潮、褐潮、金潮等)的前提是维持系统处于稳定的生态域,提高或保证系统弹性,更为重要的是找到相变发生前的指示,提高我们对于特定灾害的预测能力,进一步减少灾害损失。在具体保护措施上,需要人们具有动态保护理念,除了关注系统生境要素

外,更为重要的是理解各个维度之间内在的连通性以及生态过程。

2.2 生境连通性修复原则

随着人们对生态保护认知的深入,保护对象由物种逐步扩展至生境。例如,学者们意识到相对于树木本身,林冠、林下带等构成的特定生境对于生物多样性维持也十分关键^[36]。近几年,有学者提出应当遵从就地保护原则^[37],以保护特定功能性生境为切入点,如牡蛎礁^[38]、天然湿地^[37],恢复其固有生态功能,维持服务价值^[39]。参照陆地生态系统的退耕还林原则,退沿海池塘和人工湿地为天然沼泽和湿地^[40-41],开展生境修复。

不同自然生境斑块之间存在功能连通性。在热带珊瑚礁系统,食草鱼类对于维持珊瑚礁稳定起到决定性作用,而此类食草鱼类的生活史需要建立在珊瑚礁—红树林—海草场三者共建的空间格局上。红树林和海草场为其主要的育幼场所,同时也是其重要的庇护所。故在建立珊瑚礁保护区时,需综合考虑珊瑚礁—红树林—海草场三者的连通性。渤海水域也存在类似的具有强烈连通性的生境斑块,例如:牡蛎礁—海草(藻)场—盐沼湿地。

研究发现,牡蛎礁可以减缓海浪冲击,进而保护与之相邻的海草(藻)场或盐沼湿地^[42],后者又可为前者提供足够的食物碎屑。与孤立 in 泥滩上的牡蛎礁相比,靠近海草(藻)场的牡蛎礁贝类附着率更高,也能够支持更大生物量的肉食性鱼类。与此同时,海草(藻)场还能为螃蟹等生物在牡蛎礁和盐沼之间移动提供一条安全廊道^[43-45]。这意味着,不同自然生境斑块之间的连通性,会让人类的破坏效应级联放大。近几年,牡蛎礁修复取得快速研究进展^[46],研究表明适当的人为修复,可以加快和巩固保护效果。渤海水域河口生态修复工作可以很好地借鉴此类研究成果,因地制宜,循序渐进开展。

与此同时,渤海作为“三场一通道”对维持众多海洋生物,尤其是经济生物的生物量和种群结构具有重要意义^[47]。因此,我们要更加关注不同生境斑块对于“三场一通道”的支撑作用。保证洄游通道畅通的同时,深入探索生境异质性和破碎化之间的辩证关系。

2.3 不同时空尺度修复原则

人类捕捞的很多海洋物种生活史较长,其种群的自我修复需要执行以年为尺度的禁渔政策方能实现。因生物栖息地以及上下营养级改变也会对其种群恢复产生巨大影响,故只针对某些特定物种实施禁捕的保护原则效果并不佳。目前人类捕捞技术上的进步,如拖网^[48],大大加剧了海洋栖息地的破坏,甚至比过度捕捞造成的危害影响更为严重^[49]。现已经证实,过度捕捞和拖网捕鱼技术已经严重影响近海乃至深海的生态系统,这需要长时间的修复过程。因此,在渤海,以行政区划为单位,试点开展更长时间的禁渔措施,将大大有利于物种的自然修复。夏威夷诸多海岛采用三年一次的捕捞策略,渤海海域也可借鉴。例如,实行不同海岛不同年度的轮禁轮捕策略。也可根据渤海的某些特定生境,如牡蛎礁、鲍鱼岛等关键生物的生活史特征,制定具有季节针对性的禁渔制度,将会大大提升保护效果。

此外,应考虑不同空间尺度的生态修复原则。以牡蛎礁修复为例,2000—2011年,美国半封闭海域切萨皮克湾和佛罗里达海湾实施了187个牡蛎礁修复项目,耗资4 500万美元,修复效果显著^[50-51]。研究发现,虽然小规模($0.004\sim 0.01\text{ km}^2$)短期(1~2年)修复项目更易于开展,但相对而言其单价过高,且小规模修复很可能无法有效地维持或恢复生态系统的服务功能,故应当根据修复技术范围和项目预算,尽可能地开展大规模(大于 0.04 km^2)的修复工程,以提升牡蛎礁修复效果。渤海天津海域、莱州湾河口区域牡蛎礁生态修复项目也应结合区域自身特点,考虑不同时空尺度的修复原则,探寻最佳修复策略。

3 生态修复建议

3.1 理性规划渔业经济活动

渤海局部水域处于富营养化状态,渔业经济活动的可持续发展必须考虑这一问题。应当以生态理念为指导,开展健康水产养殖和休闲渔业,论证其对局地生态系统和渤海大生态系统的影响,坚持谁污染谁治理的方针,理性规划和开展渔业经济活动。

以海洋牧场建设为例,其本质是人工引入的栖息地。海洋牧场可以有效改善荒漠化的海底生境,但这个生态功能的发挥需要经历较长的适应过程。如,微生物群落的建立、附着生物群落的稳定、底栖和鱼类等生物群落之间生态联系的建立。有学者提出人工鱼礁区生态系统稳定需要5~10年甚至更长的时间^[52]。Babcock^[53]通过分析新西兰、澳大利亚等海洋保护区发现,在消除捕捞压力后,海洋保护区特定目标物种个体大小或生物量增加至少需要5年的时间,整个保护区生态功能稳定大约需要13年的时间,而某些特殊的大型肉食性恋礁鱼类的生物量稳定则经历了25年的时间。Edgar^[54]调查全球范围内87个海洋保护区,发现保护效益随5个关键特征的积累呈指数增长,5个关键特征分别是:禁止捕捞、高执行率、建立时间长(超过10年)、面积大(大于 100 km^2)、具有明显地理边界(如,被深水或沙地隔开)。与海洋保护区相比,海洋牧场由于是人工生境,受外界干扰更多,面积也存在一定的局限性,所以其形成稳定的生态系统并发挥良好的生态功能可能需要更长的时间。渤海水域较浅,很多区域属于泥沙软底,鱼礁投入后很快被泥沙掩盖。与此同时,鱼礁等人工构筑物很可能对软底海床长期进化的特定动植物、微生物群落造成强烈的干扰。

另一个需要重新审视的是休闲渔业对于生态环境和渔业资源的影响。目前很多国家的休闲渔业甚至超过了商业捕捞,造成了众多鱼种的过度捕获^[55]。根据加拿大休闲渔业数据推算,休闲捕鱼占全球渔业捕捞的12%^[56],且这个比例仍在不断攀升。近几年,渤海区域内的休闲渔业活动十分频繁。我们需要将休闲渔业提升为渤海生态保护关切事项之一,一方面采取生态理念制定规划、监测和管理办法,保证休闲渔业的可持续性^[57];另一方面可借助垂钓者,采集野生鱼类数量和地理空间分布等信息^[58],为渤海生态保护提供基础数据。

3.2 综合考虑渤海生态保护与冲淡水之间的联系

全球范围内的河口区域是生物多样性的热点地区,其作为海陆空三者的交界面,具有较高的生境异质性。作为地球之肾的湿地、沼泽等大都分布

在河口区域。然而,人类的向海性也使得这一热点区域遭受了巨大的压力,生境退化速度极快^[59]。河口区域冲淡水的影响亦是十分剧烈,主要表现为海岸带的动物区系受到严重威胁^[60]。例如,波罗的海不同的生态分(亚)系统存在明显的盐度梯度,导致浮游动物的组成、生物量以及空间分布存在显著差异^[61]。研究发现,1970 年以来海水脉冲减少以及淡水径流增加,导致波罗的海盐度进一步下降,浮游动植物群落结构和组成已然改变,进而影响波罗的海关键种西鲱(*Sprattus sprattus*)的种群丰度。

渤海(尤其是莱州湾)也受到黄河等冲淡水的显著影响。研究发现,黄河等冲淡水锐减是导致渤海盐度整体升高的主要原因,可显著改变海域环流结构,导致垂向环流减弱,不利于黄海和渤海的水体交换以及渤海内部上下层水体交换^[62-63]。这一过程与渤海局部水体富营养化密切相关,也会导致关键生境的破坏。因此,在分析年际和年代际变化的历史数据基础上,开展渤海河口区域水质、栖息地、物种多样性变化与冲淡水之间的关系研究显得尤为重要。应当综合探索黄河等淡水径流的变化、富营养化状态、渔业资源动物的“三场一通道”时空变化^[47]以及邻近关键生境变化之间的关系。研究显示,黄河入海水量与海洋鱼卵、仔稚鱼密度构建了密切的调控响应关系^[64],春季黄河入海水量越大,河口近海鱼类低盐产卵场营造越显著,渔业资源效益越大,因此,为最大限度发挥黄河冲淡水调控功能,应在供给两岸工农业生产生活用水,满足发电、河道河口湿地补水等水资源需求前提下,可保障有相当水量入海,尽量在产卵季之前营造河口近海低盐水产卵孵育场环境。

4 结语

渤海作为我国典型的半封闭海域,承载着京津冀城市群,其生态环境的稳定与沿岸人类福祉息息相关。如何维持其生物多样性、保持其生态系统服务功能,需要我们运用前瞻性的思维模式和理念去合理地预测、规划、定位、配置、实施、维护渤海生态系统的稳定。开展全球气候变化对于渤海生态、社会、经济的综合影响评估,探索最佳的适应性管理策略是今后工作开展的重中之重。

参考文献

- [1] FOLKE C, POLASKY S, ROCKSTRÖM J, et al. Our future in the Anthropocene biosphere [J]. *AMBIO*, 2021, 50 (4): 834—869.
- [2] STEFFEN W, ROCKSTRÖM J, RICHARDSON K, et al. Trajectories of the earth system in the Anthropocene [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2018, 115 (33): 8252—8259.
- [3] 邓楚雄, 刘俊宇, 李忠武, 等. 近 20 年国内外生态系统服务研究回顾与解析 [J]. *生态环境学报*, 2019, 28(10): 2119—2128.
- [4] HORTAL J, BELLO F D, DINIZ-FILHO J A F, et al. Seven shortfalls that beset large-scale knowledge of biodiversity [J]. *Annual review of ecology, evolution, and systematics*, 2015, 46 (1): 523—549.
- [5] LIU J, DIETZ T, CARPENTER S R, et al. Complexity of coupled human and natural systems [J]. *Science*, 2007, 317(5844): 1513—1516.
- [6] HORAN R D, FENICHEL E P, DRURY K L S, et al. Managing ecological thresholds in coupled environmental-human systems [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, 108(18): 7333—7338.
- [7] 李天生, 陈琳琳. 环渤海区域海洋生态环境特点及保护制度改革 [J]. *山东大学学报(哲学社会科学版)*, 2019(1): 127—135.
- [8] 洛昊, 马明辉, 梁斌, 等. 中国近海赤潮基本特征与减灾对策 [J]. *海洋通报*, 2013, 32(5): 595—600.
- [9] 刘容子, 吴姗姗. 环渤海临海区域经济发展态势与忧患 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2008, 18(2): 61—65.
- [10] 吴培强, 张杰, 马毅, 等. 2010—2015 年环渤海海岸线时空变迁监测与分析 [J]. *海洋科学进展*, 2018, 36(1): 128—138.
- [11] 张运兴. 京唐港船舶油类污染防治管理研究 [D]. 大连: 大连海事大学, 2019.
- [12] 王业保, 潘广臣, 刘欣, 等. 渤海海域船舶溢油事故风险评价 [J]. *海洋湖沼通报*, 2016(2): 24—29.
- [13] 李志攀, 税伟, 吴朝玮, 等. C9 泄漏事故对海湾生态系统服务的影响评估: 以 X 海湾为例 [J]. *应用生态学报*, 2020, 31(5): 1735—1745.
- [14] KINGSTON P F. Long-term environmental impact of oil spills [J]. *Spill Science and Technology Bulletin*, 2002, 7(1—2): 53—61.
- [15] 冉文, 滕佳, 刘永亮, 等. 环渤海潮间带长牡蛎微塑料富集特征研究 [J]. *海洋通报*, 2018, 37(5): 583—590.
- [16] POLOCZANSKA E S, BROWN C J, SYDEMAN W J, et al. Global imprint of climate change on marine life [J]. *Nature Climate Change*, 2013, 3(10): 919—925.

- [17] 刘洪军,张振东,官曙光,等.海洋酸化效应对海水鱼类的综合影响评述[J].生态学报,2012,32(10):3233—3239.
- [18] WRIGHT J J, KONWAR K M, HALLAM S J. Microbial ecology of expanding oxygen minimum zones[J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2012, 10(6): 381—394.
- [19] BEAUGRAND G, BRANDER K M, LINDLEY J A, et al. Plankton effect on cod recruitment in the North Sea[J]. *Nature*, 2003, 426: 661—664.
- [20] CHEUNG W W L, LAM V W Y, SARMIENTO J L, et al. Projecting global marine biodiversity impacts under climate change scenarios[J]. *Fish and Fisheries*, 2009, 10: 235—251.
- [21] VOSS R, QUAAS M F, STIASNY M H, et al. Ecological-economic sustainability of the Baltic cod fisheries under ocean warming and acidification[J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 238: 110—118.
- [22] GREENWOOD O, MOSSMAN H L, SUGGITT A J, et al. Using in situ management to conserve biodiversity under climate change[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2018, 53(3): 885—894.
- [23] 周健,王玮,吴志宏,等.山东沿海赤潮灾害基本特征及防控对策建议[J].海洋环境科学,2020,39(4):537—543.
- [24] 国家海洋局北海分局.北海区海洋灾害公报(年报)[Z].2018—2020.
- [25] KAHRU M, SAVCHUK O P, ELMGREN R. Satellite measurements of cyanobacterial bloom frequency in the Baltic Sea: Interannual and spatial variability[J]. *Marine Ecology Progress*, 2007, 343(1): 15—23.
- [26] SAVCHUK O P. Large-scale nutrient dynamics in the Baltic Sea, 1970—2016 [J]. *Frontiers in Marine Science*, 2018, 5: 00095.
- [27] IMAI I, YAMAGUCHI M, HORI Y. Eutrophication and occurrences of harmful algal blooms in the Seto Inland Sea, Japan[J]. *Plankton and Benthos Research*, 2006, 1(2): 71—84.
- [28] YAMAMOTO T. The Seto Inland Sea-eutrophic or oligotrophic? [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2003, 47: 37—42.
- [29] NISHIKAWA T, HORI Y, NAGAI S, et al. Nutrient and phytoplankton dynamics in Harima-Nada, Eastern Seto Inland Sea, Japan During a 35-Year Period from 1973 to 2007[J]. *Estuaries and Coasts*, 2010, 33(2): 417—427.
- [30] YOSHIE N, GUO X, FUJII N, et al. Ecosystem and nutrient dynamics in the Seto Inland Sea, Japan[J]. *Interdisciplinary Studies on Environmental Chemistry, Modeling and Analysis of Marine Environmental Problems*, 2011, 5: 39—49.
- [31] 韩广轩,牛振国,栾兆擎,等.河口三角洲湿地健康生态圈构建:理论与方法[J].应用生态学报,2018,29(8):2787—2796.
- [32] O'LEARY B C, ROBERTS C M. Ecological connectivity across ocean depths: Implications for protected area design [J]. *Global Ecology and Conservation*, 2018, 15: e00431.
- [33] ZHANG H, JARI I, ROBERTS D L, et al. Extinction of one of the world's largest freshwater fishes: Lessons for conserving the endangered Yangtze fauna[J]. *Science of The Total Environment*, 2019, 710: 136242.
- [34] TREVES A, SANTIAGO-ÁVILA F J, LYNN W S. Just preservation[J]. *Biological Conservation*, 2019, 229: 134—141.
- [35] SMETACEK V, ZINGONE A. Green and golden seaweed tides on the rise[J]. *Nature*, 2013, 504: 84—88.
- [36] FRANKLIN J F. Preserving biodiversity: species, ecosystems, or landscapes? [J]. *Ecological Applications*, 1993, 3(2): 202—205.
- [37] 肖洋,张路,张丽云,等.渤海沿岸湿地生物多样性变化特征[J].生态学报,2018,38(3):909—916.
- [38] 全为民,沈新强,罗民波,等.河口地区牡蛎礁的生态功能及恢复措施[J].生态学杂志,2006,25(10):1234—1239.
- [39] BECK M W, BRUMBAUGH R D, AIROLDI L, et al. Oyster reefs at risk and recommendations for conservation, restoration, and management[J]. *BioScience*, 2011, 61(2): 107—116.
- [40] 黎伟.环渤海沿岸湿地保护措施[J].林业调查规划,2009,34(2):100—103.
- [41] 刘键,陈尚,夏涛,等.黄河三角洲湿地景观格局变化及其对生态系统服务的影响[J].海洋科学进展,2008,26(4):464—470.
- [42] SCYPHERS S B, POWERS S P, HECK K L, et al. Oyster reefs as natural breakwaters mitigate shoreline loss and facilitate fisheries[J]. *PLoS one*, 2011, 6(8): e22396.
- [43] 王锁民,崔彦农,刘金祥,等.海草及海草场生态系统研究进展[J].草业学报,2016,25(11):149—159.
- [44] GRABOWSKI J H, HUGHES A R, KIMBRO D L, et al. How habitat setting influences restored oyster reef communities [J]. *Ecology*, 2005, 86(7): 1926—1935.
- [45] HECK K L, CARMITHERS T J B, DUARTE C M, et al. Trophic transfers from seagrass meadows subsidize diverse marine and terrestrial consumers[J]. *Ecosystems*, 2008, 11: 1198—1210.
- [46] RODRIGUEZ-PEREZ A, JAMES M, DONNAN D W, et al. Conservation and restoration of a keystone species: Understanding the settlement preferences of the European oyster (*Ostrea edulis*) [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2019, 138: 312—321.
- [47] 李晓炜,赵建民,刘辉,等.渤海黄渔业资源三场一通道现状、问题及优化管理政策[J].海洋湖沼通报,2018,5:147—157.
- [48] PUSCEDDU A, BIANCHELLI S, MARTÍN J, et al. Chronic

and intensive bottom trawling impairs deep-sea biodiversity and ecosystem functioning[J].Proceedings of the National Academy of Sciences,2014,111(24):8861—8866.

[49] CLARK M R, ALTHAUS F, SCHLACHER T A, et al. The impacts of deep-sea fisheries on benthic communities: A review[J].ICES Journal of Marine Science,2016,73:51—69.

[50] BLOMBERG B N, POLLACK J B, MONTAGNA P A, et al. Evaluating the U.S. estuary restoration act to inform restoration policy implementation: a case study focusing on oyster reef projects[J].Marine Policy,2018,91:161—166.

[51] WALLS B, TROOST K, DOUWE V D E, et al. From artificial structures to self-sustaining oyster reefs[J].Journal of Sea Research,2016,108:1—9.

[52] ZHANG Z, ZHANG H, YU D, et al. Influence of spatial heterogeneity of artificial reefs on food sources and trophic levels of marine animals based on stable isotope ratios[J].Ecological Indicators,2020,118:106779.

[53] BABCOCK C R, SHEARS T N, ALCALA C A, et al. Decadal trends in marine reserves reveal differential rates of change in direct and indirect effects[J].Proceedings of the National Academy of Sciences,2010,107(43):18256—18261.

[54] EDGAR G J, STUART-SMITH R D, WILLIS T J, et al. Global conservation outcomes depend on marine protected areas with five key features[J].Nature,2014,506:216—220.

[55] 孙吉亭,王燕岭.澳大利亚休闲渔业政策与管理制度及其对我国的启示[J].太平洋学报,2017,25(9):78—85.

[56] COOKE S J, COWX I G. The role of recreational fishing in global fish crises[J].BioScience,2004,54(9):857—859.

[57] BROWNSCOMBE J W, HYDER K, POTTS W, et al. The future of recreational fisheries: advances in science, monitoring, management, and practice[J].Fisheries Research,2019,211:247—255.

[58] STØTTRUP J G, KOKKALIS A, BROWN E J, et al. Harvesting geo-spatial data on coastal fish assemblages through coordinated citizen science[J].Fisheries Research,2018,208:86—96.

[59] BASSET A, BARBONE E, ELLIOTT M, et al. A unifying approach to understanding transitional waters: Fundamental properties emerging from ecotone ecosystems[J].Estuarine, Coastal and Shelf Science,2013,132:5—16.

[60] PIMM S L, AYRES M, BALMFORD A, et al. Can we defy nature's end? [J].Science,2001,293:2207—2208.

[61] OJAVEER E, ALIDE L, HENN C. Highlights of zooplankton dynamics in Estonian waters (Baltic Sea)[J].ICES Journal of Marine Science,1998,55(4):748—755.

[62] 寿玮玮,宗海波,丁平兴.夏季黄河入海径流对黄河口及附近海域环流影响的数值研究[J].海洋学报,2016,38(7):1—13.

[63] 韩艳利,王新功,葛雷.黄河水量 10 年调度对生态环境影响评估[J].水资源保护,2013,29(2):76—81.

[64] 谷源泽,徐丛亮,张朝晖,等.黄河入海淡水对海洋生态调控响应研究[J].人民黄河,2019,41(8):68—75.