

海洋环境影响评价及生态修复研究进展与展望

唐得昊^{1,2,3}, 夏真^{1,3}, 崔振昂¹, 甘华阳^{1,3}, 侯建梅¹, 刘兴健^{4*}

(1. 中国地质调查局 广州海洋地质调查局, 广东 广州 510075; 2. 中山大学 海洋科学学院, 广东 广州 519082;
3. 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广东 广州 511458; 4. 中国科学院 南海海洋研究所, 广东 广州 510301)

摘要:随着人们对海洋资源环境重要性认知程度的加深,海洋环境影响评价和资源环境修复成为提高海洋资源开发利用价值、维护海洋生态与环境功能的重要方式。通过从海洋工程项目的环境问题诊断、海洋环境影响评价关键内容、海洋生态修复技术方法及效果等方面系统分析了近年来国内外海洋环评和生态修复研究进展,并对近年来我国海洋环评和修复工程实践中存在的问题和未来发展需求进行了分析,提出未来海洋环评和修复研究应重点注重和聚焦以下方面:1)海洋环境影响评价中的环境基线、监测技术、全球性影响及生态服务等方面的问题;2)海洋环境保护与生态修复思路的转变,包括修复目标、修复模式、评估指标、监管技术及资金来源等方面的转变。

关键词:海洋环境影响评价;生态修复;研究进展;展望

中图分类号:X55

文献标识码:A

文章编号:1002-3682(2020)01-0001-12

doi:10.3969/j.issn.1002-3682.2020.01.001

引用格式:TANG D H, XIA Z, CUI Z A, et al. Progress and prospect of marine environmental impact assessment and ecological restoration[J]. Coastal Engineering, 2020, 39(1): 1-12. 唐得昊, 夏真, 崔振昂, 等. 海洋环境影响评价及生态修复研究进展与展望[J]. 海岸工程, 2020, 39(1): 1-12.

海洋资源是海洋环境中可以被人类利用的物质和能量以及海洋开发有关的海洋空间,包括生物、矿产、海水、空间资源及海洋能源,由此划分与资源相关的主要行业有海洋渔业、海盐及化工、滨海砂矿、油气业、海水利用、交通运输、滨海旅游等。伴随海洋工程项目产生的环境损害问题主要是污染和退化。海洋污染问题包括:入海污染物总量继续增加、污染范围不断扩大、污损事件更加频发、污染物组分变化、水体污染导致的环境灾害加剧以及污染导致的资源量衰减和退化等等;退化伴随污染发生,尤其在海岸带及近海海域的资源退化显著,主要问题包括海岸侵蚀淤积、海水入侵、沙滩泥化、地面沉降、河口港湾淤堵、湿地破坏及退化和海岸带地貌景观损毁等方面。

基于此,海洋工程项目对海水—沉积—生物环境都有一定影响,且许多影响之间具有相关性,影响的效应具有潜在性、复杂性和长期性。加上海洋工程项目开工前的现场观测并不能完全准确预测今后环境质量趋势,现今的海洋环境影响评价所依赖的数值定量模型和生物因素的不确定性、海洋污染的突发性、周边地区项目的建设等不确定因素,均能对项目的生产运营、周围海域的开发和环境质量产生一定的负面影响,一旦发生意外,其负面影响往往是灾难性的,因此实施海洋环境影响评价及生态修复工作是十分必要的。

实施海洋环境影响评价工作能对海洋工程项目实行动态的监督,其中包括对海洋工程项目产生经济影响、社会影响、环境影响不定期进行评估,对海洋工程项目运营中存在的不足适时提出合理化建议和实行补

收稿日期:2019-09-20

资助项目:国家自然科学基金项目——基于生态能质理论的大型底栖生物碳与有机碎屑碳间量化关系研究——以南海北部近岸海域为例(41806130);南方海洋科学与工程广东省实验室(广州)人才团队引进重大专项——粤港澳大湾区海岸线及滩涂湿地千年至十年尺度环境演变(GML2019ZD0209);中国地质调查局项目——海南福建等近海重点区矿产资源调查(DD20201175),海南岛东北部沿海地区综合地质调查(DD20190308)和珠江口伶仃洋地区综合地质调查(DD20190289)

作者简介:唐得昊(1986-),女,工程师,博士,主要从事海洋生态方面研究. E-mail: tangdehao2002@163.com

* **通讯作者:**刘兴健(1982-),男,助理研究员,博士,主要从事海洋环境工程方面研究. E-mail: liuxingj1236@163.com

(王佳实 编辑)

救措施,弥补该海洋工程项目运行中造成的不良影响,及时从中汲取经验与教训,为今后类似工程建设,相关政策的制定及管理的实施提供科学依据。

本文从海洋工程项目的环境问题诊断、海洋环境影响评价关键内容、海洋生态修复技术方法及效果等方面系统分析了近年来国内外海洋环评和生态修复研究进展,为未来我国海洋环评和修复研究提供参考。

1 海洋环境影响评价及生态修复研究进展

1.1 海洋工程项目的环境问题诊断及环境影响评价工作进展

海洋环境影响评价需要在海洋工程项目尚未开工建设前期,通过对区域环境现状及施工项目过程进行分析,比照当地海洋区域规划以及环境规划内容,对项目的可行性和潜在环境影响问题进行诊断、分析、评估,明确项目建设可行性,并从环境保护的角度提出相关的对策建议,为管理决策部门提供依据,同时也尽可能避免对施工者和社会、经济、环境造成一些不应有的损失。

伴随海洋经济迅速发展,人类开发利用海洋资源的活动集中于浅海近岸区域,与之相关的海洋工程建设包括围海造陆、港口建设、跨海桥梁、海砂开采等。该区域属于海洋生态系统向陆地生态系统过渡区,海洋特性突出,环境敏感而脆弱。滨海湿地、红树林、珊瑚礁和河口区等大量典型海洋生态系统分布于此,具备高生产力和生物多样性丰富特征,也是海洋生物生长、繁殖的重要场所。沿岸线呈带状分布的海洋工程建设往往会改变原有海域的水体—沉积理化环境,对海水质量、水动力条件、地质地貌单位、近岸生态系统结构功能产生影响。同时,海洋工程建设的时间一般较长,对海域自然环境和生态功能的影响明显^[1]。

此外,海洋勘探、油气和矿产开采等过程对远岸及深海环境也会造成不利影响。例如,对海洋表层环境的潜在影响有:表层水体中悬浮颗粒物增加和光衰减,同时影响浮游植物光合作用;表底水层间的扰动使得营养盐浓度高的底层水与表层水混合,造成表层营养盐浓度增加,表层氧的供应减少,以及重金属等有害物质再悬浮,被生物吸收和积累等^[2],这些因素将影响上层生物的摄食、呼吸、生长和代谢功能,进而影响上层水体环境和生态系统结构功能,但不足以危及上层生态系统。相比而言,海洋勘探和开采工程对海底环境的影响更为直接。集矿机在海底移动、挖搅时形成厚达 50 m 的悬浮物絮状层和底层羽状流,对近底层水体—沉积物的理化环境、地质地貌环境以及生境产生影响,同时降低工程范围内大、小型底栖生物和微生物的密度和多样性水平,对海底底质环境和生态系统造成显著影响^[3]。

人类对海洋资源的开发和利用是从近岸到远岸,再至深海。海洋环境影响评价和生态修复工作从海岸带及近岸海域开始起步。早在 1906 年,英国成立了治理海岸侵蚀的皇家委员会,1949 年制定了《海岸保护法》^[4];1969 年,美国颁布《国家环境政策法》,成为最早建立环评制度的国家^[5];1970 年美国和日本分别对切萨皮克湾、濑户内海的水体污染和生态环境恶化问题进行了综合整治研究^[6-7];1982 年根据《联合国海洋法公约》成立国际海底管理局(管理局),并规定委员会应向理事会提出关于保护海洋环境的建议^[8];1990 年以来,美国、日本和法国等发达国家对海岸资源环境整治和修复开展了深入的研究和探讨,以遏制人类活动影响下的海洋生态环境恶化、减少赤潮与溢油等风险;1998 年管理局制定多金属结核矿床勘探环境准则举行研讨,海洋探矿和勘探规章分别在 2010 和 2012 年获得核准,并因此决定需要制定一套环境准则;2004 年管理局开展研讨会,满足在勘探海底矿产资源期间提供环境指导意见的需要。此后,若干国家性和区域性采矿影响方案在欧洲国家、新西兰、日本、法国等区域开始立项,尤其对环境基线和监测调查的科学要求进行评估。此外,管理局还举办了一系列分类标准化研讨会(巨型动物——2013 年,德国威廉斯港;大型动物——2014 年,大韩民国蔚珍郡;小型底栖动物——2015 年,比利时根特)。2017-09-27—09-29 题为“在深海采矿合同区内设计影响参照区和保全参照区”的研讨会在德国柏林举行。2019-03 国际海底管理局法律和技术委员会印发《指导承包者评估“区域”内海洋矿物勘探活动可能对环境造成的影响的建议》中明确指出在合同形式的勘探工作计划获得核准之后以及勘探活动开始之前,承包者必须向管理局提交:1)一份影响评估书,

用于评估所有拟议活动对海洋环境的潜在影响;2)一份监测方案计划书,用于确定拟议活动对海洋环境的潜在影响,并核实矿物勘查和勘探不会对海洋环境造成严重损害;3)可用于制定环境基线的数据。这些工作都为诊断海洋工程项目的环境损害问题和海洋环评工作提供了很好的政策导向和研究依据。

我国海洋工程环境影响评价工作发展时间并不长。1973年第1次全国环境保护会议召开,环境影响评价的概念开始引入我国;1979-09我国颁布《环境保护法(试行)》,正式建立了环境影响评价制度^[9];到了1980s中期,一些研究机构开始研究投资项目可行性分析方法的同时就开展了评价方法的研究,但是将研究理论应用于实际较晚;1988年国家计委委托中国国际工程咨询公司进行第一批国家重点建设项目的环境影响评价,标志着我国环评工作的正式开始;20世纪90年代中期,随着经济体制改革和发展,环评工作得到加强,也逐渐受到重视^[10];2004年,《海洋工程环境影响评价技术导则》(GB/T 19485—2004)^[11]发布并实施,规定了海洋工程建设项目环境影响评价的工作程序、评价内容、技术方法和报告书(表)编制要求,使得海洋工程建设的环评工作有据可依。近年来,我国学者也在积极关注海洋工程项目产生的环境影响及海洋环评工作内容。例如,王春生和周怀阳以上层生态系统和底层生态系统为研究对象,讨论了深海采矿对海洋生态系统和生境的影响评价^[2-3];张秋丰等综述围填海工程对近岸海域地形地貌、水动力环境及海洋生态环境等方面产生的影响^[12];陈斯婷等围绕海洋功能区划、环境评价等级、环境容量、污染防治措施、环境事故风险评估等6个方面论述了我国海洋工程环境评价存在的技术问题^[13];张民声阐述了污染总量控制理论在海洋环评中的重要性和具体应用^[14];钱伟等从生态修复技术方法的角度梳理了当前近海污染主要问题和典型的控制方法^[15]。

1.2 海洋环境影响评价关键内容与生态修复技术方法研究

海洋环境影响评价方法主要有比较法和定量分析预测法^[1]。比较法分前后对比法和有无对比法,前者对比工程实施前后的情况,以确定项目的实际环境影响,后者比较有项目实际发生和无项目情况,以度量项目的真实环境影响。海洋环境的复杂性决定了对海洋工程进行环境影响评价必须包含定量分析过程,即对众多内容采取多项评估指标,以及多目标决策方法与模型的应用。根据《海洋工程环境影响评价技术导则》(GB/T 19485—2004)文件^[11],海洋工程环境影响评价主要内容围绕水文动力、地形地貌与冲淤、水质、沉积物、生态环境影响评价五个方向开展,每个方向都有对应的评价指标体系和定量研究方法,在此以海洋工程项目的生态环境影响评价方法和生态修复技术方法为核心内容进行论述。

1.2.1 环境基线的确定和表达

环境基线值指评价区环境参数的当前水平值,即环境现状值^[16],它只用于环境影响评价工作,是环境影响评价工作中最基础的内容。基线值需要记录的信息包括物理海洋学、化学海洋学、地质地貌、生物群落等方面。其中,生物基线主要内容有:采集原生动植物及后生动物群落数据——巨型动物、大型动物、小型底栖动物、微生物群落、底栖鱼类和食腐动物以及与资源直接相关的生物区系的数据;记录观察到的海洋哺乳动物,近水面大型动物和鸟群;记录和描述沉积物的生物扰动活动和混合状况;摄影记录手段建立图像背景资料档案;评估水柱和近海底层水内可能受作业影响的水层群落;评估物种分布状况和代表物种(尤其是微生物)基因联系;评估水层和底栖生境的食物网结构;建立时间序列测站;评估水层和底栖生境之间的联系,采集水柱上层到海床下沉通量和物质构成时间序列数据;测量沉积物群落耗氧量,作为衡量整体群落功能的指标^[17]。

环境基线研究除考虑工程本身影响外,还要考虑当地环境容量。另外,基线随时间变化而变动,简单迭加方式不可评价出拟建工程从环评开始到工程初、中、后期对环境的实际影响,因此准确表达环境基线值是环评工作的重要内容,受到国内外学者的广泛关注。陈振民等在进行环评时认为应将评价基线值看作是一个动态变量,在拟建工程的不同运行阶段内分别确定相应的评价基线,然后再与不同阶段的影响贡献迭加,结果表明动态变量更能反映实际^[18];张宇峰等以2000年东海、黄海的实测数据为例,从数理统计的角度讨论了环境基线的表达方式,结果表明稳健估计方法中的切尾均值和Winsor化均值可较准确地表达环境的基线值^[16];陈慧青论述预防原则在深海采矿活动中的运用时,认为相关部门应该建立程序措施,确保有足

够的环境基线数据和检测数据提供给管理局,为海洋矿产勘探和开采工作夯实基础^[19];Lemaire 等通过案例分析讨论了来自陆源通量的化学和生物污染基线^[20];Schiaparelli 等描述了南极海洋生物普查情况,并以此确定了南极海洋生物多样性可用的基线^[21];Henkel 等从海洋可再生能源和环境相互作用角度对俄勒冈大陆架海鸟、海洋哺乳动物、海龟和底栖生物群落进行基线评估^[22];Antunes 等考虑了环境因素对历史悠久的海洋石灰岩码头生物定植的影响,作为监测和初步定义基线研究的依据^[23];Conti 等通过对几种海洋环境生物监测中微量金属基线值的测定,探讨 South Tyrrhenian 沿海地区的质量控制方法^[24];Bennett-Martin 等绘制 Belize 沿海社区的海洋垃圾碎片图,利用地理信息系统建立了海滩上垃圾分布的基线^[25]。这些案例研究都为区域环境基线的确定和表达提供范例和依据。

1.2.2 生态影响评价和修复技术方法

受人类活动和大型海洋工程的影响,海洋生态系统已呈现不同程度的问题,主要表现在水体污染、海洋生物非正常死亡、物种密度和多样性降低、红树林、珊瑚礁、海草床等典型生态系统退化等方面,这对保持海洋生态平衡和实现海洋资源可持续发展造成很大负面影响,因此海洋工程项目的生态影响评价在海洋环境影响评价中占有重要地位。此外,对工程影响后的区域进行生态修复也同样具有重要的生态价值和战略意义。

20 世纪 50—60 年代,环境问题开始受关注,欧洲、北美、中国等国家和地区开展了一些环境恢复和治理工程,获得了初步成效。20 世纪 70 年代开始普及,国内外生态恢复研究主要涉及森林、农田、草原、荒漠、河流、湖泊和废弃矿地等。与之相比,海洋生态修复研究的起步较晚,但近些年来备受重视和关注,国内外现已开展了大量的海洋生态修复研究与实践,本研究按生态修复研究的尺度、内容和技术方法列出三者的发展趋势和国内外生态修复实践的典型案例(表 1)。

表 1 国内外生态修复发展趋势及案例

Table 1 Development trends and cases of ecological restoration at home and abroad

内 容	发展趋势	国外案例	国内案例
修复研究 尺度	特定物种或单个生态系统的生态修复工程 →大尺度的生态修复 →微观生态修复技术 →宏观+微观综合性修复	美国德克萨斯州 Loyola 海岸带生态恢复工程:生态—海岸—工程技术三位一体,整合自然景观、岩石、海岸带填充物和原生植被建立模型,为基于岩土工程分析技术的海岸带生态系统抗蚀性评价提供方法 ^[26] 。 美国佛罗里达州红树林和潮汐沼泽恢复计划:采用人工建设潮汐流缓解公路加宽对红树林及其生境的影响,利用海藻种植补偿桥梁工程引起的海藻损失 ^[27] 。 马尔代夫等国家海岸带恢复:建立人工鱼礁促进生物量的增长,促使海岸带生物种群恢复和海岸带恢复 ^[28] 。 美国加利福尼亚自然岸线基础设施建设:牡蛎礁和鳗草床对海岸保护,提供岸线修复技术指南 ^① 。	渤海、黄海、东海海洋生物人工放流增殖工程:运用了海洋生物人工放流增殖技术,促进近海海洋生物恢复;同时在南方海区开展人工鱼礁技术试验 ^[29] 。 2003 年首次启动关于“海岸带生态修复”的国家“863 计划”课题:从生物、工程和管理 3 方面进行生境修复技术的研发,以渤海湾的淤泥质海岸带为例,修复遭到严重破坏的海岸带生态系统 ^[30] 。
修复研究 内容	从生态修复技术措施的单方面向系统化研究,涉及生态修复的监测与评价、生态修复方法措施和生态修复管理等。	Neckles 提出适合盐沼生态修复工程的监测方案,以及修复工程的生态系统监测方案个例 ^[31] 。Nienhuis 基于恢复生态学概念,描述了荷兰数百个恢复工程的成败,总结失败主要由于物理、化学或生态学原理应用不足,重新引进传统管理技术恢复半自然和文化景观 ^[32] 。Boesch 基于生态系统的管理要求,审查切萨皮克湾和路易斯安那沿海的修复和管理,并提出科学解决方案 ^[33] 。Kadowaki 等整合群落和生态系统方法为替代稳定状态和生态恢复带来新见解 ^[34] 。	张乔民,赵美霞等通过研究红树林、珊瑚礁等典型热带近岸生态系统的现状、功能和生物地貌过程,提出修复和重建的建议 ^[35-38] ;罗民波较为全面地研究了长江口底栖动物群落结构对大型工程的响应和长江河口底栖动物生态修复 ^[39] ;柴召阳等研究大型海藻养殖对近海富营养化的控制,提出近岸大型海藻养殖可以直接从海水中“拔出”大量营养物质,进而恢复近海主要生境功能 ^[40] 。

① The Case studies of natural shoreline infrastructure in coastal California. http://coastalresilience.org/wp-content/uploads/2017/11/tnc_Natural-Shoreline-Case-Study_hi.pdf

续表

内 容	发展趋势	国外案例	国内案例
修复技术方法	微生物修复技术、植物修复技术、动物修复技术	<p>微生物: Mangwani 等评价了影响多环芳烃化学参数, 利用生物膜形成海洋细菌联盟 (Biofilm-forming Marine Baterial Consortium, NCPR), 通过微生物酶代谢和分解污染物, 为微生物修复提供有效途径^[41]; 特定种类的细菌能快速降解多种污染物^[42-44]; Joo 等发现硫酸盐还原菌可有效去除海洋环境中的 Cd, Ni, Cr^[45]。</p> <p>植物: 红树植物及其根部微生物构成的红树微生态系对 PCBs 污染物有良好的修复能力^[46]; Parrish 等研究 PAHs 污染的土壤在植物修复过程中污染物的不稳定性评估^[47]; 追踪浮床植物对沿海水域有机物的去除^[48]; 美国纽约市环保局将互花米草浮垫应用于牙买加海湾生态修复; 海岸米草能减轻水体富营养化^[49]; 经济价值高的海藻 (紫菜、海带) 可控制海域富营养化^[50]。</p> <p>动物: 亚太海洋贝类礁修复项目, 典型牡蛎礁的修复^[51]; 海螺能吸收水体中过量的营养元素, 并吃掉部分微小腐蚀性生物, 利于水质保洁; 弗吉尼亚湾牡蛎净化水质; Fresh 测试贻贝在去除污染物、净化水质方面的有效性, 为进一步利用贻贝来提高牙买加湾水质提供实践基础; 菲律宾蛤对 Zn 的富集力高; 欧洲国家: “贻贝预警计划”^[52]。</p>	<p>微生物: 张信芳阐述了石油烃类的微生物代谢途径、影响因素、常规的生物修复技术以及两种海洋专性解烃菌降解石油的协同效应和过程方式^[53]; 海洋土著微生物可以有效降解农药和 POPs^[54-55]。</p> <p>植物: 重金属存在生物累积和放大效应^[56], 植物可对有机污染物超量积累^[57]; 红树植物根部对苯并芘等有机污染物有良好的修复能力^[58]; 滨海盐生植物净化海水重金属能力和机制^[59]; 林光辉证明海马齿具有很强的海洋重金属修复潜能^[60]; 碱蓬是滨海 Cu, Zn, Cd 污染严重区域修复的优选品种^[61]; 大型海藻组织中氮、磷含量可推算海藻转移水体中的氮、磷的能力^[62]。</p> <p>动物: 紫贻贝对 4 种重金属的生物富集动力学特性研究^[63]; 泥蚶体内重金属积累对生物修复的作用^[64]; 底栖生物体内 Cd, Cu, Cr 和 Zn 含量及其生物富集作用, 紫贻贝、魁蚶、褶牡蛎、菲律宾蛤以及刺海参对 Cu, Zn 和 Pb 等有较强的富集能力^[65]。</p>

相比发达国家而言,我国海洋生态影响评价和生态修复工作的发展时间并不长,评价内容和技术方法上存在不足,若能借鉴国内外典型案例经验方法,在长期发展过程中逐步改善和调整,则有利于我国海洋环境影响评价和生态修复机制体系的完善。

2 我国海洋环境影响评价及生态修复存在问题与展望

2.1 我国海洋环境影响评价及修复研究存在问题

进入 21 世纪,人们逐渐认识到海洋资源环境在发展海洋经济、推动社会进步、维护生态安全方面的重大作用,各国已经开展了一些海洋工程环境评估方法和生态修复工程实践。2000 年以来,我国也已开展海洋工程环境影响评价和修复工作,发现整治和修复工作仍然面临诸多技术瓶颈和管理问题,加上海洋资源类型多样,生态系统相对复杂,人类活动破坏与干扰强烈,使得海洋资源环境问题极为复杂和突出。目前,我国海洋环境影响评价和修复工作中,尚存许多问题,主要表现在:

2.1.1 海洋环境影响评价内容的科学性和管理的规范性问题

我国海洋环境影响评价内容本身存在问题:1)环境基线问题。海洋环境系统的开放性和不确定性决定了环境系统的随机性、离散性、突变性,因此基线值是一个变化的值域范围。我国海洋环评过程一般是先预测工程的影响,再迭加工程所在区域的环境现状,然后与环境标准比较后确定影响,此过程中环境基线值是一个固定的常量,这也影响了环评结果的准确性和有效性;2)总量控制问题。海洋环评过程中的总量控制应该根据工程特点和所在海域的环境现状及特征,预测、分析和控制项目施工和生产阶段的污染方式和排放总量,并由此给出明确总量控制方案和建议。现实过程中的总量控制一般以国家或者地方规定为标准,局限于指出建设项目投产后的污染情况,未能结合特定海域环境保护标准提出污染排放细则,更是忽略了定量评估污染后可能造

成的损失^[14];3)替代方案问题。替代方案要求另外一个方案可以在对立的角度完全替代评价方案,并有同样的效果。我们现有规定中所采取的办法是对比几种方案后择优选择,这与替代方案有根本差异,进而影响海洋环评活动的充分性、全面性^[66];4)监测和防治问题。《海洋工程环境影响评价技术导则》(GB/T 19485—2014)^[67]明确了现状调查和监测的具体规范、点位、频次和时间等,但在实际海洋工程环评中,现状监测覆盖范围往往过大,造成资源浪费,应该从建设项目的类型和特点出发,主次分明、有的放矢的监测和防治。

我国海洋环境影响评价制度和管理体系上存在问题有:1)海洋管理部门审核缺位问题。与海洋环评相关的主要法律和规范有《中华人民共和国海洋环境保护法》、《中华人民共和国海域使用管理法》、《防治海洋工程建设项目污染损害海洋环境管理条例》、《中华人民共和国防治海岸工程建设项目污染损害海洋环境管理条例》、《海洋工程环境影响评价技术导则》(GB/T 19485—2004)^[11]等。海洋环评的对象分为海岸工程与海洋工程,并分别由不同的行政机关管理^[68]。海洋环境影响报告书由海洋环境行政主管部门核准,并报环境保护行政主管部门备案,接受环境行政主管部门监督,但海岸工程建设项目的环境影响报告书仍由环境保护行政主管部门审查批准。在整个海岸工程环评过程中,海洋管理部门审核缺位问题依然存在;2)海洋环境影响评价的约束力度不够。现行的海洋环评体制仍有重审批轻监管现象,海洋环评较少关注项目运营所产生的实际影响和所采取的减缓措施的有效性,并且大部分环境影响评价行为是线性的,在管理上缺乏信息和指令的反馈,监管体系不完善造成环评约束力度不够;3)公众参与受限。随着国家对海洋保护的投入加大,公众对海洋环境保护的意识提高,以及环境影响评价审批制度严格,环评单位所承担的责任和风险也在提高,部分环评单位和项目的环境影响报告不会完全公开,环评内容缺乏公众调查和交流,特别是与利益相关者之间的沟通和协调,但从工程实施后大量群众上访事件可以看到现行的海洋环评制度缺乏复核利益相关者的环节,而公众参与正是海洋环评工作的重要内容。

2.1.2 生态修复技术方法和成果应用及转化力度的问题

与陆源生态修复相比,海洋生态修复的研究起步较晚,但国内外也开展了很多海洋生态修复工作和实践,研究类型不断增多,修复内容不断丰富,技术方法也在提升改善。我国海洋生态修复主要针对海水水体、滨海湿地、以及沿海沙滩的退化诊断研究,已经使用生物操纵技术和沉水植物重建技术等解决退化和污染问题^[69],而对于修复的其他环节如生态修复监测、生态修复效果评估及修复管理等方面的研究相对较少,大多停留在小尺度、局部范围内或集中于某一生物群落或物种,缺乏从整体生态系统水平、大尺度的生态修复研究。可见,我国海洋生态修复工作已经取得积极的成效,但由于该项工作起步较晚,难点较大,生态修复技术和内容多处在理论研究阶段和低层次的人工生态修复层面,相关技术方法体系亟待完善,成果应用和转化力度需要加强。

相比欧美国家而言我国生态修复技术比较粗放,特别是场地修复以传统异位阻隔填埋为主,欧盟国家的原位和异位修复技术比重相当,而美国的原位修复技术占比接近70%。据统计,2010—2015年中央财政支持实施的海岛整治修复工程类项目中,包括岸线整治、基础设施建设、污水防治在内的人工修复手段占比为70%,其他已实施的海岸修复工程项目也多为人工岸段建设,未能充分体现生态修复技术方法^[70],海洋自然修复研究和实践不足。

2.1.3 后期持续监测和生态修复资金投入的保障性问题

生态修复工程,尤其是污染类的生态修复项目耗资巨大,资金短缺会使很多修复工程难以持续,因此形成多渠道投入机制尤为重要。目前我国仍以财政拨款为主的形式治理环境污染,修复监督制度中对污染者的问责制需要完善。面对海洋环境污染问题,地方财政压力较大,缺少稳定财政支撑来源;金融政策和投融资公共平台的缺乏,难以提高金融机构的积极性;再加上生态修复项目的内容有时会与区域海洋经济的发展有矛盾,没有建立生态修复利益共享机制,对社会资本参与的吸引力不够^[71]。

2.2 我国海洋环境影响评价与生态修复研究展望

2.2.1 我国海洋环境影响评价工作展望

为贯彻落实党中央、国务院关于生态文明建设和“放管服”改革的有关决策部署,加强和改进海洋工程环

境影响评价管理,2017年,国家海洋局对《海洋工程环境影响评价管理规定》(简称《规定》)进行了修订,修订坚持生态优先、放管结合、优化公开以及顺法承规的原则涉及20项内容。尽管修订后的环境影响评价指令有所改进,仍可重点关注和进一步完善环境基线、监测技术、全球性影响及生态服务等方面的问题。

首先,环境基线值的获取要求高质量的调查数据和标准化的调查手段。修订后的《规定》增加了关于工程选址(选线)和建设应当符合海洋主体功能区规划与海洋生态红线制度的规定,但海洋主体功能区划和生态红线如何科学制定本身也值得商榷。一些重要的地理区域,比如“滨海湿地”很多时候涵盖和包括了“岸线区域”和“河口”,仍然缺乏充分的环境基线值以及涵盖所有环境影响评价所需的一些细节资料,加上很多“深海采矿和勘探海域”的环境基线值仍然需要更系统细致的调查和监测资料,所以环境基线信息对于判断海洋工程项目带来的环境变化和量化影响至关重要。环境影响评价需要足够的高质量 and 可靠的数据来确定基线,但是对大面积的区域进行抽样和调查是耗时和昂贵的,且根据海洋工程项目的区位和规模,有不同的方法来确定海洋环境中的基线,因此建议监管机构采用标准调查方法和手段,以提高结果的可比性并整合评价。

其次,科学的海洋环境影响评价结果要求规范监测制度和提高监测技术。修订后的《规定》明确了“依据现有知识水平和技术条件,对项目实施可能产生的不良生态环境影响的性质、程度和范围不能作出科学判断”等8类不予审批的情形。可见,修订后的《规定》已经对有重大环境影响的海洋工程项目采取了限制措施。另外,2019-03实施的《建设项目环境风险评价技术导则》(HJ 169—2018)^[72]中增加了环境风险潜势初判和评价结论,改进了评价工作等级划分方法,规范了风险识别和源项分析的内容和方法,调整细化了风险防范措施内容。如果过程预测结果是对环境有重大不利影响,海洋工程开发商和责任方将有义务采取适当措施,避免、预防或减少此类影响,包括必要时进行监测,这也要求监测技术的改善和提高,因此,不应视监测为减少影响的措施,而应视为确定控制措施的有效手段。一般海洋环评工作中的监测是以项目为单位进行的,而海洋工程的环境影响结果是整体性、系统性的,有可能远超出项目施工范围甚至是行政边界,再加上海洋环境监测工作需要长时间、高消耗的投入,这要求规范综合监测和管理制度以及多部门联合统筹。

再次,海洋环境影响评价结果需考虑海洋工程项目对全球环境变化的影响。在过去的10a中,资源利用效率和可持续性、生物多样性保护、气候变化以及海洋灾害等环境问题在决策中变得更加重要,同时全球气候变化将继续对环境造成损害并危及经济发展,因而这些因素也应构成评价和决策过程中的重要指标。由于人为活动影响,全球气候变化可能加剧、掩盖或减少,使海洋环境管理更具挑战性。例如,天然气水合物的开采,可能会引发海底天然气泄漏,从而加剧全球温室效应,进而引起一系列连锁反应,因此环境影响评价要求对海洋工程项目的潜在环境影响进行评价,包括积累影响评价,并且由气候变化引起的环境基线移动也必须纳入环境影响评价和后续监测内容中。

最后,生态服务和社会效益在环境影响评价过程中是有价值的环节。描述和评价基于生态系统服务和社会商品和利益的基线,使利益相关者能够深入理解由于海洋开发、资源利用而产生的直接得失变化。生态系统服务带来的效益往往难以量化,但生态系统服务和社会效益的评价可以提高公众对海洋环境问题的理解,并通过公众参与的形式指导决策。2019-01开始施行新修订的《环境影响评价公众参与办法》更加明确了生态环境主管部门的审查义务和内容,强化对公众参与开展情况的监督,有利于海洋环境评价和修复工作向深度公众参与的方式发展。

2.2.2 我国海洋生态保护与修复工作思路的转变

我国海洋保护与修复工作需从局部化、单一化向系统化、层次化方向转变。海洋生态保护与修复是自然资源统一管理的重要职责之一。落实保护和修复红树林、珊瑚礁、滨海湿地、海岛、海湾、入海河口、重要渔业水域等具有典型性、代表性的海洋生态系统,需要在自然资源开发利用全过程中,实现源头保护、利用节约和破坏修复,保持山水林田湖草系统功能稳定,促进自然资本保值增值。海洋生态调查与评价是保护修复的基础,必须在海洋环境影响评价的内容中体现。通过科学调查海洋环境基线值、划定海洋功能区、确定生态脆弱区,因地制宜制定具有综合、系统且有层次的保护修复方案,使得生态修复区域内生境之间、生态系统之间以及生态系统内各群落、各种群之间物质循环与能量流动具备稳定性和可持续性,为海洋资源开发与生态环

境保护提供了翔实的科学依据,也为我国海洋生态安全提供保障^[73]。

我国海洋保护与修复目标从统一规划到分期制定,模式从人工干预到自然恢复,评价指标从单一零散到多元系统,监管从点状间断到动态连续,资金来源从中央财政到多渠道投入的转变。海洋生态修复最终目标是使受损生态系统恢复到结构功能相对稳定,面对外界干扰能进行自我调节的状态。如果修复的目标统一制定成将受损区域恢复到未开垦状态或者拥有自然结构和功能,则短期内很难实现,因此在生态修复规划的每个阶段都需要制定分期目标,并且根据修复状况进行调整和改善;人工干预为主的修复模式会对原有生态系统造成再次扰动,且工程量和资金消耗都大^[74],因此海洋生态修复须注重自然修复过程,人工干预为辅助,通过水环境综合治理、生境改善和生物多样性恢复、植被厚植和恢复等过程,达到增强海洋的自净和自我调节能力的目标;不管是海洋环境影响评价还是海洋生态保护和修复工作,其工作效果都是为了使生态、经济和社会三者共赢,因此评价指标体系需从生态、经济和社会 3 个角度考虑,生态指标包括环境和生物因子,从群落、生态系统结构功能以及景观影响等方向考虑,经济指标从海洋生态系统修复后的服务价值和经济效益等方面考虑,社会指标则是环评和修复工作带来的社会认同感、归属感以及满意度等方面考虑;遥感、GIS 系统和 GPS 等动态监测技术,加上从修复前到修复过程和修复结束后的连续监测,可为管理者和决策者提供更系统、更有效的技术支撑,有利于海洋生态修复工作的持续;修复工作的资金来源除了依靠中央财政支撑,还需引导产业投融资服务平台、商业金融机构以及社会资本的广泛参与,强化生态补偿机制,完善资金使用管理办法。

3 结 语

海洋环境影响评价和生态修复是保护海洋环境和促进资源可持续发展过程中不可或缺的重要工作。我国海洋环评和生态修复工作起步相对晚,但发展迅速,目前已经积累了大量宝贵的原始数据资料。与此同时,在机构、制度以及方法、应用等方面与发达国家仍有差距。海洋生态修复是由失衡状态变为相对平衡状态的过程,需要大量时间和空间,因此坚持保护优先和自然恢复为主,系统、科学、有序的实施海洋工程项目尤其必要。在现代海洋环境监测体系和海洋管理的背景下,我国海洋环境影响评价和生态修复工作面临机遇和挑战,快速适应和满足新形势、新要求是当前和未来一段时间的重要课题,这也要求海洋环评和生态修复工作需从制度到方法,再到监测体系和后期维护等方面的不断完善,最终能实现海洋资源、社会、经济的可持续发展。

参考文献 (References):

- [1] WANG Z Y. A preliminary study on the indicator system for marine environmental impact assessment audits in China[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2010. 王智勇. 我国海洋工程海洋环境影响后评价指标体系的研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010.
- [2] WANG C S, ZHOU H Y. Assessment on the potential impacts of deep-sea mining on the marine ecosystem I. Epipelagic ecosystem[J]. Marine Environmental Science, 2001, 20(1): 1-7. 王春生, 周怀阳. 深海采矿对海洋生态系统影响的评价 I. 上层生态系统[J]. 海洋环境科学, 2001, 20(1): 1-7.
- [3] WANG C S, ZHOU H Y. Assessment on the potential impacts of deep-sea mining on the marine ecosystem II. Benthic ecosystem[J]. Marine Environmental Science, 2001, 20(2): 32-36. 王春生, 周怀阳. 深海采矿对海洋生态系统影响的评价 II. 底层生态系统[J]. 海洋环境科学, 2001, 20(2): 32-36.
- [4] ZHANG M H, SUN S C, LIANG S X. Progress of coastal environment repairing and cleaning engineering research and its prospect[J]. Marine Environmental Science, 2017, 36(4): 635-640. 张明慧, 孙昭晨, 梁书秀, 等. 海岸整治修复国内外研究进展与展望[J]. 海洋环境科学, 2017, 36(4): 635-640.
- [5] DENG D Y, LI N, DAI L Y, et al. Study of foreign strategic environmental impact assessment systems[J]. Advances in Environmental Protection, 2015, 5(4): 76-81. 邓大跃, 李楠, 戴涟漪. 国外战略环境影响评价制度的借鉴意义[J]. 环境保护前沿, 2015, 5(4): 76-81.
- [6] LIU J. Comprehensive administration in Chesapeake Bay, USA[J]. World Agriculture, 1993(3): 8-10. 刘健. 美国切萨皮克湾的综合治理[J]. 世界农业, 1993(3): 8-10.
- [7] ZHAO X Q, LIN G L. Review on integrated renovation and environment optimization of resource in bay[J]. Marine Environmental Sci-

- ence, 2011, 30(5): 752-756. 赵薛强, 林桂兰. 海湾综合整治与资源环境优化研究进展[J]. 海洋环境科学, 2011, 30(5): 752-756.
- [8] The Third United Nations Conference on the Law of the Sea. United nations convention on the law of the sea[M]. Beijing: Ocean Press, 1992. 联合国第三次海洋法会议. 联合国海洋法公约[M]. 北京: 海洋出版社, 1992.
- [9] LI H W. On the improvement of environmental impact assessment system in China[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2013, (8): 168-169. 李红伟. 论我国环境影响评价制度的完善[J]. 科技创新导报, 2013, (8): 168-169.
- [10] WANG Y Z, BAO X W, WANG S G. A primary study on methods of post project analysis on marine environmental impact assessment in China[J]. Marine Environmental Science, 2010, 29(1): 139-144. 王勇智, 鲍献文, 王曙光. 我国海洋工程海洋环境影响后评价方法初探—以温州灵霓北堤工程海洋环境影响后评价为例[J]. 海洋环境科学, 2010, 29(1): 139-144.
- [11] National Center of Ocean Standards and Metrology. Technical guidelines for environmental impact assessment of marine engineering: GB/T 19485—2004[S]. Beijing: People's Republic of China National Standard Press, 2004. 国家海洋标准计量中心. 海洋工程环境影响评价技术导则: GB/T 19485—2004[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.
- [12] ZHANG Q F, JIN Y D, LI X B, et al. Progress in the impact of reclamation projects on offshore marine environment[J]. Advances in Marine Science, 2017, 35(4): 454-461. 张秋丰, 靳玉丹, 李希斌, 等. 围填海工程对近岸海域海洋环境影响的研究进展[J]. 海洋科学进展, 2017, 35(4): 454-461.
- [13] CHEN S T, GENG A C. Existed problems in the practice of environmental impact assessment of marine engineering[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2008(13): 105-106. 陈斯婷, 耿安朝. 海洋工程环境影响评价实践中存在的问题[J]. 科技创新导报, 2008(13): 105-106.
- [14] ZHANG M S. Application of total quantity control theory in marine environmental assessment[J]. Marine Development and Management, 2010, 27(1): 52-54. 张民声. 总量控制理论在海洋环评中的应用[J]. 海洋开发与管理, 2010, 27(1): 52-54.
- [15] QIAN W, FENG J X, NING C X, et al. Research progress of ecological restoration for coastal pollution[J]. China Environmental Science, 2018, 38(5): 1855-1866. 钱伟, 冯建祥, 宁存鑫, 等. 近海污染的生态修复技术研究进展[J]. 中国环境科学, 2018, 38(5): 1855-1866.
- [16] ZHANG Y F, ZHANG X Y, XU Y H. Discuss of expressions on environmental baseline[J]. Journal of Nanjing University of Technology (Natural Science), 2003, 25(2): 82-85. 张宇峰, 张雪英, 徐炎华. 海洋环境基线值表达方式的探讨[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2003, 25(2): 82-85.
- [17] CHEN Z M. Discussion on the conception of the environmental original value & the environmental background value[J]. Resources Guide, 2000(2): 158-160. 陈振民. 环境本底值背景值基线值概念的商榷[J]. 资源导刊, 2000(2): 158-160.
- [18] CHEN Z M, XIE W. Notable baseline values in environmental impact assessment[J]. Energy and Environmental Protection, 1998(3): 58-60. 陈振民, 谢薇. 环评影响评价中值得注意的基线值[J]. 能源环境保护, 1998(3): 58-60.
- [19] CHEN H Q. Application of precautionary principle in deep-sea mining and China's response[J]. Resource Development and Market, 2018, 34(8): 1105-1110. 陈慧青. 预防原则在深海采矿活动中的运用及中国的应对[J]. 资源开发与市场, 2018, 34(8): 1105-1110.
- [20] LEMAIRE N, PELLETIER E. Chemical and microbial contamination baseline in the Saguenay-St. Lawrence Marine Park (eastern Canada): concentrations and fluxes from land-based sources[J]. Archives of Environmental Contamination & Toxicology, 2013, 65: 421-433.
- [21] SCHIAPARELLI S, DANIS B, WADLEY V, et al. The Census of Antarctic Marine Life: the first available baseline for Antarctic marine biodiversity[M]//VERDE C, DI PRISCO G. Adaptation and Evolution in Marine Environments. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2013(2): 3-19.
- [22] HENKEL S K, SURYAN R M, LAGERQUIST B A. Marine renewable energy and environmental interactions: baseline assessments of seabirds, marine mammals, sea turtles and benthic communities on the Oregon shelf[M]//SHIEDS M A, PAYNE A I L. Marine Renewable Energy Technology and Environmental Interactions, Dordrecht: Springer, 2014: 93-110.
- [23] ANUNES A C, COROADO J, BOAVENTURA D, et al. The environmental factors impact on the conservation of an historic marine quay: a baseline study[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015(22): 9563-9569.
- [24] CONTI M E, MECOZZI M, FINOIA G M G. Determination of trace metal baseline values in *Posidoniaoceanica*, *Cystoseira* sp., and other marine environmental biomonitors: a quality control method for a study in South Tyrrhenian coastal areas[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015(22): 3640-3651.
- [25] BENNETT-MARTIN P, VISAGGI C C, HAWTHORNE T L. Mapping marine debris across coastal communities in Belize: developing a baseline for understanding the distribution of litter on beaches using geographic information systems[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2016, 188(557): 1-16.
- [26] JONES K, HANNA E. Design and implementation of an ecological engineering approach to coastal restoration at Loyola Beach, Kleberg County, Texas[J]. Ecological Engineering, 2004, 22(4-5): 249-261.

- [27] LI H Y, MA C. Analysis of 40 Cases of multi-way ecological restoration in foreign countries[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2010, 225-228. 李洪远, 马春. 国外多途径生态恢复 40 案例解析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010, 225-228.
- [28] LI H L, LI X N, HOU X M, et al. Technology of coastal ecological restoration; research progress and existing problems[J]. Urban Environment and Urban Ecology, 2003, 16(6): 36-37. 李红柳, 李小宁, 侯晓珉, 等. 海岸带生态恢复技术研究现状及存在问题[J]. 城市环境与城市生态, 2003, 16(6): 36-37.
- [29] TANG Y Y, GAO Y, WU J C, et al. Research on the influence factors and renovation restoration strategies of coastal habitats destruction[J]. Marine Development and Management, 2018(9): 57-61. 唐迎迎, 高瑜, 毋瑾超, 等. 海岸带生境破坏影响因素及整治修复策略研究[J]. 海洋开发与管理, 2018(9): 57-61.
- [30] MENG W, WU D X. Habitat rehabilitation techniques in typical coastal zones of Bohai Sea[J]. Scientific and Technological Achievements of China, 2008(14): 56. 孟伟, 吴德星. 渤海典型海岸带生境修复技术[J]. 中国科技成果, 2008(14): 56.
- [31] NECKLES H A, DIONNE M, BURDICK D M, et al. A monitoring protocol to assess tidal restoration of salt marshes on local and regional scales[J]. Restoration Ecology, 2002, 10(3): 556-563.
- [32] NIENHUIS P H, GULATI R D. Ecological restoration of aquatic and semi-aquatic ecosystems in the Netherlands (NW Europe)[M]. Netherlands: Kluwer Academic Publisher, 2002.
- [33] BOESCH D F. Scientific requirements for ecosystem-based management in the restoration of Chesapeake Bay and Coastal Louisiana[J]. Ecological Engineering, 2006, 26(1): 6-26.
- [34] KADOWAKI K, NISHIJIMA S, KEFI S, et al. Merging community assembly into the regime-shift approach for informing ecological restoration[J]. Ecological Indicators, 2018, 85: 991-998.
- [35] ZHANG Q M. Status of tropical biological coasts of china; implications on ecosystem restoration and reconstruction[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2001, 32(4): 444-464. 张乔民. 我国热带生物海岸的现状与生态系统的修复与重建[J]. 海洋与湖沼, 2001, 32(4): 444-464.
- [36] ZHANG Q M, SHI Q, CHEN G, et al. Monitoring and health assessment of coral reef in Luhuitou, Sanya, Hainan[J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(3): 71-77. 张乔民, 施祺, 陈刚, 等. 海南三亚鹿回头珊瑚礁监测与健康评估[J]. 科学通报, 2006, 51(3): 71-77.
- [37] ZHANG Q M, SHI Q, YU K F. Review of eco-development model for mangrove land-based enclosure aquaculture in the Pearl River Estuary[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2010, 29(1): 8-14. 张乔民, 施祺, 余克服. 珠江口红树林基围养殖生态开发模式评述[J]. 热带海洋学报, 2010, 29(1): 8-14.
- [38] ZHAO M X, YU K F, SHI Q, et al. Source, distribution and influencing factors of subsidents in Luhuitou coral reef area, Sanya[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(17): 1583-1589. 赵美霞, 余克服, 施祺, 等. 三亚鹿回头珊瑚礁区沉降物的来源、分布及影响因素[J]. 科学通报, 2013, 58(17): 1583-1589.
- [39] LUO M B. The communities response of macrobenthos to huge engineering and the ecological restoration in Yangtze Estuarine, China [D]. Shanghai: East China Normal University, 2008. 罗民波. 长江河口底栖动物群落对大型工程的响应与生态修复研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2008.
- [40] CHAI Z Y, HE P M. Trend of ocean eutrophication and strategy of ecological restoration in China[J]. Science, 2013, 65(4): 48-52. 柴召阳, 何培民. 我国海洋富营养化趋势与生态修复策略[J]. 科学, 2013, 65(4): 48-52.
- [41] MANGWANI N, KUMARI S, DAS S. Marine bacterial biofilms in bioremediation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) under terrestrial condition in a soil microcosm[J]. Pedosphere, 2017, 27(3): 548-558.
- [42] BOOPATHY R, MELANCON E. Metabolism of compounds with nitro-functions by *Klebsiella pneumoniae*, isolated from a regional wetland[J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2004, 54(4): 269-275.
- [43] KHAN Z, ROMAN D, KINTZ T, et al. Degradation, phytoprotection and phytoremediation of phenanthrene by endophyte *Pseudomonas putida*, PDI[J]. Environmental Science & Technology, 2014, 48(20): 12221-12228.
- [44] PINTO M I, SALGADO R, COTTRELL B A, et al. Influence of dissolved organic matter on the photodegradation and volatilization kinetics of chlorpyrifos in coastal waters[J]. Journal of Photochemistry & Photobiology a Chemistry, 2015, 310: 189-196.
- [45] JOO J O, CHOI J H, KIM I H, et al. Effective bioremediation of cadmium (II), nickel (II), and chromium (VI) in a marine environment by using *Desulfovibrio desulfuricans*[J]. Biotechnology & Bioprocess Engineering, 2015, 20(5): 937-941.
- [46] TAM N F, YAO M W. Concentrations of PCBs in coastal mangrove sediments of Hong Kong[J]. Marine Pollution Bulletin, 2002, 44(7): 642-651.
- [47] PARRISH Z D, BANKS M K, SCHWAB A P. Assessment of contaminant lability during phytoremediation of polycyclic aromatic hydrocarbon impacted soil[J]. Environmental Pollution, 2005, 137(2): 187-197.
- [48] HUANG L, ZHUO J, GUO W, et al. Tracing organic matter removal in polluted coastal waters via floating bed phytoremediation[J]. Marine Pollution Bulletin, 2013, 71(1): 74-82.

- [49] SOUSA A I, LILLEBØ A I, CAÇADOR I, et al. Contribution of *Spartina maritima* to the reduction of eutrophication in estuarine systems[J]. Environmental Pollution, 2008, 156(3): 628-635.
- [50] PATRICK C J, WELLER D E, RYDER M. The relationship between shoreline armoring and adjacent submerged aquatic vegetation in Chesapeake Bay and nearby Atlantic coastal bays[J]. Estuaries & Coasts, 2016, 39(1): 158-170.
- [51] HILLER N. Drill holes and shell repair in brachiopods from a Late Cretaceous (Maastrichtian) oyster reef, North Canterbury, New Zealand[J]. Cretaceous Research, 2014, 49: 83-90.
- [52] LI J, LUSHER A L, ROTCHELL J M, et al. Using mussel as a global bioindicator of coastal microplastic pollution[J]. Environmental Pollution, 2019, 224: 522-533.
- [53] ZHANG X F. Marine oil pollution biodegradation process and bioremediation technology prospects[J]. Environmental Science and Management, 2012, 37(5): 97-99. 张信芳. 海洋石油污染的微生物降解过程及生态修复技术展望[J]. 环境科学与管理, 2012, 37(5): 97-99.
- [54] WU X, GAN B C. New advances of microbial degradation on organophosphorus pesticides[J]. Hunan Agricultural Sciences, 2010, (19): 84-87. 吴翔, 甘炳成. 微生物降解有机磷农药的研究新进展[J]. 湖南农业科学, 2010, (19): 84-87.
- [55] SUN A L, LIU J H, SHI X Z, et al. Isolation and identification of a bacteria strain degrading pyrethroid insecticide in mariculture[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2014, 45(2): 363-369. 孙爱丽, 刘菁华, 史西志, 等. 海水养殖环境中拟除虫菊酯类农药降解菌的分离鉴定及降解特性研究[J]. 海洋与湖沼, 2014, 45(2): 363-369.
- [56] XU Y D, WEI X, XIA B, et al. Potential ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments of the eastern Laizhou Bay[J]. Advances in Marine Science, 2015, 33(4): 520-528. 徐艳东, 魏潇, 夏斌, 等. 莱州湾东部海域表层沉积物重金属潜在生态风险评价[J]. 海洋科学进展, 2015, 33(4): 520-528.
- [57] DOU Y, TANG X X, WANG Y. Research progress on ecological remediation of coastal wetland[J]. Marine Environmental Science, 2012, 31(4): 616-620. 窦勇, 唐学玺, 王悠. 滨海湿地生态修复研究进展[J]. 海洋环境科学, 2012, 31(4): 616-620.
- [58] KE L, WANG W Q, WONG T W, et al. Removal of pyrene from contaminated sediments by mangrove microcosms[J]. Chemosphere, 2003, 51(1): 25-34.
- [59] LIU Y. The research of decontamination for heavy metals of seawater by halophyte from coastal area[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2008. 刘宇. 滨海盐生植物净化海水重金属能力研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2008.
- [60] LIN G H. Ecological restoration technology of coastal wetlands and its application[M]. Ocean Press, 2014. 林光辉. 滨海湿地生态修复技术及其应用[M]. 海洋出版社, 2014.
- [61] YUAN H M, LI X G, LI N, et al. Accumulation and transportation of heavy metals by *suaeda salsa* in the northeastern coastal wetland of the Jiaozhou Bay[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2011, 42(5): 676-683. 袁华茂, 李学刚, 李宁, 等. 碱蓬对胶州湾滨海湿地重金属的富集与迁移作用[J]. 海洋与湖沼, 2011, 42(5): 676-683.
- [62] LI Y Q, TANG X X. Marine restoration ecology[M]. Qingdao: China Ocean University Press, 2016. 李永祺, 唐学玺. 海洋恢复生态学[M]. 青岛: 中国海洋大学出版社, 2016.
- [63] ZHAO S N, SUN Y, SONG Y L, et al. Kinetic features of four heavy metals bioaccumulation of mussel *mytilus edulis*[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2004, 35(5): 438-445. 张少娜, 孙耀, 宋云利, 等. 紫贻贝对4种重金属的生物富集动力学特性研究[J]. 海洋与湖沼, 2004, 35(5): 438-445.
- [64] HUO L H, LIN Z H, ZHU D L, et al. Accumulation characteristics of heavy metals in *Tegillarca granosa* under single or combined stress exposure[J]. Marine Sciences, 2012, 36(3): 54-60. 霍礼辉, 林志华, 朱东丽, 等. 单一与混合重金属在泥蚶体内的累积特征[J]. 海洋科学, 2012, 36(3): 54-60.
- [65] SHI R G, LIN J, YE Y, et al. The level and bioaccumulation of Cd, Cu, Cr and Zn in benthopelagic species from the Bering Sea[J]. Haiyang Xuebao, 2015, 34(6): 21-25. 石荣贵, 林静, 叶逸, 等. 白令海底栖生物体内 Cd、Cu、Cr、Zn 含量及其生物富集作用[J]. 海洋学报, 2014, 34(6): 21-25.
- [66] MA Y J, FENG X M. Environmental impact assessment system of marine engineering construction projects in China[J]. Modern Business Trade Industry, 2008, 20(4): 36-37. 马英杰, 封晓梅. 论我国涉海工程建设项目环境影响评价制度[J]. 现代商贸工业, 2008, 20(4): 36-37.
- [67] National Technical Committee 283 on Ocean of Standardization Administration. Technical guidelines for environmental impact assessment of marine engineering: GB/T 19485—2014[S]. Beijing: People's Republic of China National Standard Press, 2014. 全国海洋标准化技术委员会. 海洋工程环境影响评价技术导则: GB/T 19485—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- [68] LIN Z H. The marine environmental impact assessment system of Korea and its reference[J]. Hebei Law Science, 2011, 29(2): 173-179. 林宗浩. 韩国的海洋环境影响评价制度及启示[J]. 河北法学, 2011, 29(2): 173-179.
- [69] LIAO W G, DU Q, TAN H W, et al. Application status and development trend of water ecological restoration technology[J]. China

- Water Resources, 2006(17): 72-74. 廖文根, 杜强, 谭红武, 等. 水生态修复技术应用现状及发展趋势[J]. 中国水利, 2006(17): 72-74.
- [70] WANG N, WANG F, XU W B. Construction of island restoration project classification and national pattern analysis[J]. Marine Science Bulletin, 2017, 36(6): 682-688. 王娜, 王丰, 徐文斌. 海岛整治修复工程分类体系构建及全国格局分析[J]. 海洋通报, 2017, 36(6): 682-688.
- [71] ZHANG Z W, LIU Z J, LIU J H. Key issues and future direction of marine ecosystem protection and restoration in China[J]. Marine Development and Management, 2018(10): 26-30. 张志卫, 刘志军, 刘建辉. 我国海洋生态保护修复的关键问题和攻坚方向[J]. 海洋开发与管理, 2018(10): 26-30.
- [72] Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Technical guidelines for environmental risk assessment on projects: HJ 169—2018[S]. Beijing: People's Republic of China National Standard Press, 2018. 中华人民共和国生态环境部. 建设项目环境影响评价技术导则: HJ 169—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [73] SHEN G F. Ecological protection, restoration and construction under the theme of ecological civilization construction in China[J]. Land Greening, 2017(5): 16-18. 沈国舫. 中国生态文明建设主题下的生态保护、修复和建设[J]. 国土绿化, 2017(5): 16-18.
- [74] ZHANG S L, ZHANG L M, HOU H P, et al. Research overview on natural restoration of ecosystem[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2017, 31(1): 160-166. 张绍良, 张黎明, 侯湖平, 等. 生态自然修复及其研究综述[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(1): 160-166.

Progress and Prospect of Marine Environmental Impact Assessment and Ecological Restoration

TANG De-hao^{1,2,3}, XIA Zhen^{1,3}, CUI Zhen-ang¹, GAN Hua-yang^{1,3},
HOU Jian-mei¹, LIU Xing-jian⁴

(1. *Guangzhou Marine Geological Survey, China Geology Survey, Guangzhou 510075, China;*

2. *School of Marine Science, Sun Yat-sen University, Guangzhou 519082, China;*

3. *Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou), Guangzhou, 511458, China;*

4. *South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China)*

Abstract: With the increasing of the knowledge about the importance of marine resources and environment, the marine environmental impact assessment and the resource environmental restoration have been an important way to improve the exploitation and utilization of marine resources and to maintain the ecological and environmental functions of the sea. Progress in researches of marine environmental assessment and ecological restoration in the world in recent years is systematically reviewed from the aspects of environmental problem diagnosis of marine engineering projects, key contents of marine environmental impact assessment and technology and effect of marine ecological restoration. According to the problems occurring in the practices of marine environmental assessment and ecological restoration in China in recent years and based on the analysis of the requirements in the future development, it is suggested that the future researches of marine environmental assessment and ecological restoration in China should emphasize and focused on: 1) environmental baseline, monitoring technology, global impact and ecosystem services in the marine environmental impact assessment; 2) idea transformations in the marine environmental protection and ecological restoration, which include restoration objectives, restoration models, assessment indicators, regulatory technology and funding sources.

Key words: marine environmental impact assessment; ecological restoration; research progress; prospect

Received: September 20, 2019