

海洋工程建设生态损失补偿方法探究

杨凌雁, 梁书秀, 孙昭晨

(大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要: 本文从资金补偿和生态修复补偿两方面介绍了生态损失补偿方法在海洋开发建设中的应用。资金补偿主要探讨了基于生态系统服务功能和基于生态修复的两种生态损失补偿资金核算方法的研究; 生态修复补偿介绍了从工程结构自身出发构造具备生态效果的结构形式的原位生态修复补偿以及在异地进行生态重建营造新的栖息地的异位生态修复补偿。最后依据 HEA 估算了不同海洋工程的补偿规模。

关键词: 海洋工程生态损失补偿; 资金补偿; 生态修复补偿; HEA

中图分类号: X196 文献标识码: A 文章编号: 1007-6336(2020)04-0630-08

Research on compensation for ecological loss caused by marine engineering construction

YANG Ling-yan, LIANG Shu-xiu, SUN Zhao-chen

(Dalian University of Technology State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian 116024, China)

Abstract: This paper introduces the application of compensation method for ecological loss caused by Marine engineering construction from two aspects: financial compensation and ecological restoration compensation. Two methods of ecological loss compensation fund accounting are discussed in the part of financial compensation, based on the ecosystem service function and based on the ecological restoration respectively. Ecological restoration compensation mainly introduces two different ways: the in situ ecological restoration compensation of structural forms with ecological effects from the engineering structure itself, and the heterotopic ecological restoration compensation of constructing new habitats in other places for ecological reconstruction. Last the compensation scale of different marine engineering is estimated based on HEA.

Key words: ecological loss compensation for marine engineering; financial compensation; ecological restoration compensation; HEA

生态补偿是以保护自然生态环境、促进人与自然和谐发展为目的, 将环境外部成本内部化, 并运用政府和市场手段, 调节生态保护利益相关者之间利益关系的公共制度^[1]。国内外关于生态补偿的研究在森林、流域、矿产等领域比较成熟, 而在海洋领域起步较晚, 且多从宏观角度考虑海洋生态补偿的实施问题。Cowell^[2]对英国 Cardiff 海湾拦河坝建设中的湿地补偿进行了分析, 并探讨了海洋生态补偿中的资源替代性问

题; Elliott 等^[3]针对填海造地给海洋生境造成的永久性损害, 从理论上研究了海洋生态补偿问题, 认为海洋生态补偿可分为经济补偿、资源补偿和生境补偿; Palerm^[4]在鹿特丹港口扩建规划中提出依据《生境指令》(Habitat Directive), 通过环境影响评价和公众参与确定海洋生态补偿措施, 包括修建海床保护区和鸟类栖息地、修复邻近滩涂的沙滩以及补偿周边居民的财产损失。

国内学者关于海洋生态补偿问题也开展了

收稿日期: 2019-04-25, 修订日期: 2019-06-15

基金项目: 国家重点研发计划—辽东湾污染防治与生态环境修复关键技术研究(2019YFC1407700)

作者简介: 杨凌雁(1993-), 女, 辽宁大连人, 硕士研究生, 研究方向为海洋生态补偿, E-mail: yangly_dluter@163.com

通讯作者: 梁书秀, 博士, 教授, E-mail: sxliang@dlut.edu.cn

探索性研究,学者们普遍认为基于环境的外部性内部化原则,海洋生态补偿可分为海洋生态保护补偿和海洋生态损失补偿^[5-6],分别于2016年和2018年印发的《山东省海洋生态补偿管理办法》和《厦门市海洋生态补偿管理办法》就是从这两个方面制定了海洋生态补偿管理办法。海洋生态保护补偿是一种正外部性的内部化手段,补偿主体是政府,补偿客体是海洋生态保护者和建设者,例如我国21世纪初由国家拨出专项资金支持的海洋渔业减船转产工程^[7]。海洋生态损失补偿是一种负外部性的内部化手段,补偿主体是合法利用海洋资源的海洋开发利用者,而补偿客体是代表整个社会的自然资源受托方的政府。所以对于合法建设的海洋工程,开发利用者履行的生态补偿责任属于海洋生态损失补偿。

海洋开发利用者可通过两种方式履行海洋生态损失补偿责任,一种是资金补偿,根据对合法建设的海洋工程所造成的海洋生态损失,向政府缴纳一定的补偿资金,把修复主体责任转移给政府,由政府统筹组织实施生态修复工程;另一种是生态修复补偿,开发者主动履行修复责任,自己组织实施生态修复工程或委托专门的生态修复公司实施生态修复工程。例如美国2008年针对湿地生态损失提出的三种补偿方案:湿地补偿银行、替代费补偿、申请者负责另建一处湿地,湿地补偿银行属于第一种资金补偿行为,只是补偿客体是湿地银行的建设者,包括政府、机构、非营利性组织或个人^[8],而替代费补偿和申请者负责另建一处湿地则属于第二种生态修复补偿行为。无论是资金补偿还是生态修复补偿,最终都应落实到整治修复受损的海洋生态环境,维护海洋生态环境的良性循环发展。本文依据现有的研究成果重点探讨资金补偿核算方法和生态修复补偿方法。

1 资金补偿

资金补偿是指海洋资源的合法开发利用者通过向政府缴纳生态补偿金的方式赔偿对海洋生态环境造成的损失,是制约环境破坏者的一种经济手段。补偿资金核算的合理性直接影响生态损失补偿实施的可行性和有效性。国内外学

者关于补偿标准的核算开展了大量的研究,但是关于生态损失补偿标准的制定目前还没有公认的计算方法。综观国内外学者们的相关研究,海洋生态损失补偿标准的核算方法主要有基于生态系统服务功能的生态损失补偿资金核算和基于生态修复的生态损失补偿资金核算。

海洋生态系统服务是指人类直接或间接的从海洋生态系统功能中获取的各项利益,由此可见海洋生态系统与人类的利益关系通过生态系统服务功能连接^[9-10]。海洋工程的建设会破坏生态系统结构,损害海洋资源进而与其相关的生态系统服务将遭到部分甚至全部损失,最终将导致人类自身利益受到威胁。因此可以通过分析受损的生态系统服务造成的价值损失来计算补偿资金。海洋生态系统服务价值损失的计算关键由两部分组成:海洋生态系统服务价值以及海洋工程造成的生态系统服务损失程度。欧洲委员会发起的TEEB(the Economics of Ecosystems and Biodiversity)项目中针对“生态系统服务与生物多样性的经济学评估”将大自然价值的评估方法分为两大类:生物物理方法和基于偏好法^[11]。其中基于偏好法假设生态系统服务的价值依赖于人们对服务的主观偏好(即支付意愿),通过价值量评价法对生态系统服务进行评估,评估方法主要包括三大类:直接市场评估法、替代市场评估法和假想市场评估法。直接市场评估法适用于可以从直接相关的市场交易中获得的生态系统服务价值,包括市场价格法、影子工程法、防护与恢复费用法、机会成本法等。如果缺少这样的信息,则价格信息必须从平行的市场交易中获取,这些交易间接地与服务价值相关联,包括旅行费用法、享乐评价法等。如果生态系统服务的直接价格信息和间接价格信息都无法获取,则需要创建一个假想市场来获取价格信息,包括条件价值评估法、投标博弈法、成本选择法、德尔菲法等。三类方法的选取应当按照直接市场评估法、替代市场评估法、假想市场评估法的顺序,首选直接市场评估法,如果条件不符合再依次考虑另外两类评估方法。基于偏好法能很好地反映生态系统服务为人类提供的福祉,大多数学者都采用该方法评估海洋生态系统服务的价

值量^[12-16]。不同的海洋工程用海方式不同,对海洋生态系统服务造成的损失程度也不同,如果对损失程度进行准确、严谨的评估,应当采用模型模拟或者现场调查的方式,但是模型模拟需要较高的技术支持且存在较多不可控因素,而现场调查耗时长、成本高,都不是理想的办法。所以多数学者采用专家评估法^[1, 6, 17],该方法成本低、操作快捷且有专家的支撑使得结果可信度高容易接受。但是海洋生态系统服务损失价值量评估理论和方法仍需进一步提高,且实践表明,其评估结果往往偏高^[18-19],与现实补偿能力有较大差距,因此隋吉学等^[1, 6, 20-21]认为该评估结果可作为补偿的参考和理论上限值,而郝林华等^[1]则在此基础上充分考虑用海企业的支付能力,依据差别化的补偿原则建立生态补偿系数,包括基准补偿系数、政策调整补偿系数和附加补偿系数,保证了补偿资金征收的可执行性。

海洋生态修复是指通过人工措施的辅助作用,使受损的海洋生态系统恢复至原有或与原来相近的结构和功能状态。本文所指的海洋生态修复是广义上的修复,除了对受损海洋生态系统的恢复,还包括在受影响区之外重建相似生境。基于生态修复核算海洋生态损失补偿资金是容易被人们接受也是国际上比较认可的方法,例如国际海事委员会在溢油污染损害指南中提出对于受损环境的补偿以采取或即将采取的合理恢复措施的成本为准。该方法的关键是制定合理的生态修复方案,对于损害较小,规模较小的海洋工程可优先选择在原位实施恢复措施,此时可通过恢复与防护费用法确定补偿标准;对于损害程度较大,无法在原位采取恢复措施的海洋工程则需在受影响区之外重建相似生境,此时可通过影子工程法确定补偿标准^[20]。无论是何种形式的生态修复,其内容、目标、规模都会直接影响成本的大小,进而影响补偿标准,参考国内外学者们的研究,生态修复的依据可以是相近或者等价的海洋生态资源和海洋生态系统服务。例如 Unsworth 和 Bishop^[22]针对湿地补偿建立的环境年金简易模型是以提供与受损湿地生态系统服务价值相等的新建湿地的成本作为生态补偿资金;美国国家海洋与大气管理局(National Oceanic

and Atmospheric Administration, NOAA)在《自然资源损害评估指导文件》中推荐使用的资源等价分析法和生境等价分析法分别是基于“资源-资源”、“服务-服务”的原则估算补偿修复工程的规模。现有研究中,国内学者多采用生境等价分析估算海洋工程中的填海造地工程的补偿修复规模^[23-24]。

上述两种资金补偿核算方法,基于生态系统服务功能的生态损失资金补偿核算能让人们更全面、更深入地认识到海洋工程建设对生态系统造成的损害及其与自身利益之间的密切关联,但是该方法估算的补偿资金往往高于海洋开发利用者的实际支付能力,不利于生态补偿的推行,可将其作为补偿标准的上限值;基于生态修复的生态损失补偿资金核算基本理论依据是使得受损的海洋生态系统恢复至原有的或相近的结构和功能状态所需要的生态修复成本,而补偿资金最终应当是用于海洋生态环境的整治修复,所以该方法更合情合理,也更容易被人们接受。

2 生态修复补偿

2.1 原位生态修复补偿

本文根据实施补偿措施的海域与受损海域的位置关系,将生态修复补偿分为原位生态修复补偿和异位生态修复补偿,依据前文对生态修复的论述,原位生态修复指对受损的海域生态系统实施恢复措施,异位生态修复指在受影响区之外重建相似生境,针对以上两种生态修复探讨可采用的补偿措施。

原位生态修复补偿指的是直接在受损海域范围内实施生态修复补偿措施,使得受损海域的水质、生物量、生物多样性等指标能够恢复到受损前的状态。

传统海岸结构(包括海堤、防波堤、离岸堤、潜堤等)最初是为了满足某种功能需求,比如保护沿海城镇、农田、岸滩等免受风暴潮、波浪、水流的侵袭与淘刷^[25-26],但是同时也会对海洋生态环境造成损害。随着人们环保意识的提高,研究人员越来越注重海洋工程与海洋生态环境之间的和谐,对传统的结构形式进行生态改造,使其发挥基本海岸保护功能外,还能够提供适合海洋生物着生、栖息及繁殖的空间,保证海

水水质状况,达到海岸防护与生态环境和谐共生的目的。目前已有的生态型结构形式,主要分为三大类:附加藻场型、附加生物栖息空间和海水交换型。

附加藻场型和附加生物栖息空间两种类型都是为水中生物提供栖息地来吸引更多的生物着生和繁殖,增加海域的生物丰度。其中附加藻场型主要为水生生物提供食物来源和通过消减波浪改变海流动力学为生物营造平稳的活动场所,而附加生物空间则主要是依据水生生物对栖息环境的喜好,营造特定生物群体所需要的基本生存空间。水生生物选择栖息环境时除了要考虑光照、DO、COD等因素,更偏向于选择几何特征较为安全、隐蔽、方便的孔隙洞窟作为栖息地^[27],调查研究表明通常鱼类在复杂结构中具有更高的丰富度^[28-29]。附加藻场型通过改善传统海岸结构形式来使其更适合海藻的生长和繁殖,从而增加生态效果,提升生态机能,日本水产厅渔港部将改善办法分为四类^[30]:(1)基质投入:在原有的海岸工程断面适合于海藻生长的水深处投放适合海藻生长的基质,比如生态石块、生态混凝土块等;(2)附加小段消波设施:在防波堤或者护岸附加小段消波设施,使海藻能够在适宜的水环境中生长;(3)缓坡度倾斜堤:将直立堤改为倾斜堤,或者减小斜坡堤坡度,使海藻能够附着生长;(4)潜堤:在防波堤、护岸或者岸滩的外海侧一定的距离设置潜堤或人工潜礁,为藻场营造平稳的栖息环境。附加生物栖息空间是利用原有结构物的多余空间或改变原有结构物的光滑壁面来增加生物栖息空间吸引水生生物的聚集从而达到改善水生态环境的目的,主要有以下三种措施:(1)利用栈桥的下部空间依据水生生物的生活习性在合适的水深位置设置生物床;(2)在防波堤的内港侧依据光照、盐度、壁面水生生物的附着情况在合适的水深位置开挖隔室来增加防波堤的生物栖息空间;(3)在人工防护结构的壁面上增加纹理(texture)、裂纹(crevice)、凹坑(pit)、岩池(rock-pool)、花盆状储水结构(flowerpot)等^[31-32]小型结构,为藻类和小体型生物提供生存空间。

传统的海岸结构物会阻碍港池与外海的海

水流通性,使得内港形成半封闭的水域,从而影响港内水质环境,不利于水生生物的生存。为改善内港的水质情况,工程上通常采用物理方法,即利用潮汐或波浪能量促进海岸结构物内外港海水的交换。为了增加防波堤、护岸的海水交换机能,日本研发了水平通路型有孔堤^[33]、混合管型有孔堤、竖条型多孔堤等多种结构形式的海水交换型防波堤,韩国研发了L型通路型有孔堤^[34]、环形通路防波堤^[35],我国研发的梳式防波堤虽然最初是为了解决口门流速过大的问题但是也具有海水交换机能^[36-37]。

上述三类生态型结构形式的实际工程应用及所取得的工程效果列于表1。

2.2 异位生态修复补偿

如果受损海域的海洋环境条件不适宜水生生物的长期栖息繁殖,或者该片海域已经被批准可用于港口等其他用途,则可在其附近选择合适的地点重建遭到损害无法复原的栖息地,比如在河口海岸采取的河口水系调整管理(managed realignment)措施。

调整管理措施通过拆除海岸防护结构使其暴露于海浪中,利用潮汐洪水的作用增加潮间带区域^[41]。通过拆除原有的硬防护结构使得泥沙流动恢复到自然状态,遭到侵蚀的海滩能在自然状态下得到填补,海岸线重新恢复平衡状态(wikipedia.org),实施该项措施需要考虑的因素有:进潮量,河口形态,潮汐动力,水面高度,河面比降,沉积物特征和波候等。英国作为重要的港口国家,河口除了作为绝大多数主要港口的地理位置之外还是野生动植物的主要栖息地,二者对于英国是同等重要的。为了协调二者关系,英国一方面发展港口,一方面通过调整管理措施补偿受损的栖息地,例如表2所列举的工程实例^[42-43]。

2.3 原位生态修复补偿和异位生态修复补偿的比较分析

原位生态修复补偿和异位生态修复补偿在实际工程应用中都取得了较好的生态效果。从生态学的角度来看,海洋工程建设对海域造成了一定的生态损失,为了补偿损失量并尽可能的减小对海洋生态环境的扰动,重新构建的生态系统应当尽可能的接近原有生态系统,而原位生态修

表1 海洋生态结构工程案例

Tab.1 Marine ecological structure engineering cases

类型	改善办法	工程实例	工程效果	参考文献
附加藻场型	基质投入	台湾乌石渔港: 离岸堤的岸侧使用具有凹凸状的生态方块	增加了海水接触面积, 多种鱼类、贝类和海藻等生物在生态方块附近栖息	[30]
	附加小段斜坡堤	北海道Samani渔港: 防波堤背后增加了16m的小段斜坡堤	附加斜坡堤上长出了同周围天然藻场一样的优势种群, 海藻总量呈现跟天然藻场相同的季度变化	[38]
	潜堤	多明尼加海岸: 利用生态礁球组成离岸潜堤	保护了沙滩免受飓风的侵蚀, 在礁球上还长满了藻类, 在礁球的底部和附近也出现了多种水生生物	[39]
附加生物栖息空间	栈桥形式的生物床	日本新泻港: 在邻近护岸海域中的不同水深处设置生物床	不同水深的生物床聚集了不同的水生生物, 弥补生物损失量的同时增加了生物丰度。	-
	增加防波堤隔室	日本三岛川之江港: 在防波堤的内港侧开挖隔室增加生物栖息空间	在隔室的壁面有软体动物、环形动物等生物附着, 并吸引了大量的鱼类和大型底栖生物, 在隔室内和隔室之间形成了有机物质的良性循环	-
	改善光滑壁面	悉尼港: 在壁面上增加花盆、岩石潭	有效的减轻了直立墙海堤护岸对潮间带生物多样性造成的损失	[32, 40]
海水交换型防波堤	水平通路型有孔堤	日本Urakawa港	根据现场监测数据当发生最大波浪时, 孔洞内平均流速46.1 cm/s, 相当于10000 t/h外港海水通过通道流入内港	[33]
	L形通路型有孔堤	韩国济州岛港	通道内的流速为0~0.6 m/s, 根据当地的潮流和波浪条件, 0.1 m/s量级的流速就能够实现港内外大体积的海水交换	[34]
	梳式防波堤	大连港大窑湾	以某人工岛为原型的数值模拟结果显示5 d内人工岛内水体交换率达90%	[36]

表2 英国生态损失补偿工程实例

Tab.2 UK compensation for ecological loss project cases

工程实例	目的	主要调整措施	重建(修复)生境	工程效果	参考文献
Allfleet湿地	补偿Medway河口和Orwell河口因港口发展导致的栖息地损失	沿岸打开6个缺口, 缺口总宽度为590 m	滩涂、盐沼、盐水池	在潮间带有丰富的鱼苗, 已观察到的鸟类有38种, 2018年被正式列为特别保护区(SPA)	[42]
Chowder Ness	补偿Immingham和Hull港口发展导致的栖息地损失	拆除了至少570 m长的沿岸硬防护	泥滩、盐沼、草坪	潮间带的底栖无脊椎动物为鱼类和鸟类提供了丰富的饵料, 已观察到的鸟类有16种	[42]
Welwick	补偿Immingham和Hull港口发展导致的4 ha滩涂损失	沿岸打开两个缺口	盐沼	所形成的盐沼可有效御防海浪	[43]

复补偿相对异位生态修复补偿能够更接近这一原则。从经济学角度来看, 原位生态修复补偿是在原有结构上加以变动, 增加其生态性, 如果经过科学评估能够取得较好的生态补偿效果的话无需再占用多余的海陆空间重建生境, 可能前期对生态型结构的设计上会投入大量的科研经费, 但是一旦取得成功应用, 不仅能够减轻海洋环境的负荷也会为海洋开发者减轻很多负担。所以综合来看, 原位生态修复补偿是更生态更经济的选择, 未来海洋建设中结构性的原位生态修复补偿势在必行, 但是在无法实现原位生态修复补偿

时, 也应结合滨海人工湿地的建设积极探索异位补偿的方法。

3 基于生境等价分析法的生态修复补偿规模的估算

无论是资金补偿中基于生态修复核算补偿资金还是生态修复补偿中营造不同的生境来补偿受损的生态系统, 修复规模都是需要解决的基础性问题, 生态修复规模的估算可依据生境等价分析法(HEA)。生境等价分析法是通过确定一个补偿性或替代性的修复工程, 并基于修复工程

提供的生态功能和服务等同于受损区域所提供的功能和服务的假设, 进而估算补偿修复工程的规模, 评估出受损生态规模。参考 NOAA 建议使用的生境等价模型^[44] 确定补偿规模:

$$P = \frac{V_j}{V_p} \cdot \frac{\sum_{t=0}^B \rho_t \cdot (b^j - x_t^j) / b^j}{\sum_{t=1}^L \rho_t \cdot (x_t^p - b^p) / b^j} \cdot J \quad (1)$$

式中: P 表示补偿生境的规模(以面积表示); J 表示受损生境的规模; V_j 和 V_p 分别表示单位面积的受损生境和修复生境每年提供的服务量, 取值参考 Costanza^[15]; x_t^j 表示 t 时期末单位受损生境提供的服务量(%); x_t^p 表示 t 时期末单位修复生境提供的服务量(%); b^j 表示受损生境提供的基线服务水平, 假设为 100%; b^p 表示单位修复生境开始修复时提供服务水平(%); 折现率 $\rho_t = 1/(1+r)^{t-C}$, r 为贴现率, 取值参考《海洋溢油生态损害评估技术导则》HY/T095-2007, 本文取 3%。以年为时间单位, 各时间节点的含义如下: $t=0$, 工程开始动工, 即生境受损开始时间; $t=MI$, 受损生境服务水平降到最低; $t=B$, 受损海域恢复到基线服务水平, 假设工程所造成的损失为永久损失, 即 B 趋于 ∞ ; $t=C$, 开始计算折现率的时间, 此时 $\rho_t = 1$; $t=I$, 补偿工程开始动工; $t=M$, 补偿生境达到最大服务水平; $t=L$, 补偿生境停止生态系统服务量的输出, 假设补偿生境不会受到人为或自然破坏, 即 L 趋于 ∞ , 且假设受损的服务量呈线性递减, 补偿的服务量呈线性递增。

基于 B 趋于 ∞ 和 L 趋于 ∞ 的假设, 对补偿规模计算公式进行变形处理如下:

当 B 趋于 ∞ 时,

$$\begin{aligned} \text{令 } S_J &= J \sum_{t=0}^{\infty} \rho_t \cdot \frac{b^j - x_t^j}{b^j} \\ &= J \left(\sum_{t=0}^{t=MI} \rho_t \cdot \frac{b^j - x_{mi}^j}{b^j} + \sum_{t=MI+1}^{\infty} \rho_t \cdot \frac{b^j - x_{mi}^j}{b^j} \right) \quad (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{令 } S'_J &= J \sum_{t=MI+1}^{\infty} \rho_t \cdot \frac{b^j - x_{mi}^j}{b^j} \\ &= J \cdot \frac{1}{(1+r)^{MI}} \cdot \frac{b^j - x_{mi}^j}{b^j} \sum_{t=1}^{\infty} \frac{1}{(1+r)^t} \quad (3) \\ &= S_{MI} \sum_{t=1}^{\infty} \frac{1}{(1+r)^t} \end{aligned}$$

等式(3)两边同乘以 $(1+r)$

$$\begin{aligned} \text{则 } S'_J(1+r) &= S_{MI} \sum_{t=0}^{\infty} \frac{1}{(1+r)^t} \\ &= S_{MI} + S_{MI} \sum_{t=1}^{\infty} \frac{1}{(1+r)^t} = S_{MI} + S'_J \quad (4) \end{aligned}$$

所以 $S'_J = \frac{S_{MI}}{r}$

$$\text{则 } S_J = J \left(\sum_{t=0}^{t=MI} \rho_t \cdot \frac{b^j - x_t^j}{b^j} + \frac{1}{r(1+r)^{MI}} \cdot \frac{b^j - x_{mi}^j}{b^j} \right) \quad (5)$$

同理 L 趋于 ∞ 时

$$\begin{aligned} S_P &= \sum_{t=I}^{\infty} \rho_t \cdot \frac{x_t^p - b^p}{b^j} = \sum_{t=I}^{t=M} \rho_t \cdot \frac{x_t^p - b^p}{b^j} \\ &\quad + \frac{1}{r(1+r)^m} \cdot \frac{b^j - x_m^j}{b^j} \quad (6) \end{aligned}$$

$$\text{综上可得 } P = \frac{V_j}{V_p} \cdot \frac{S_J}{S_P} \quad (7)$$

以填海工程、非透水构筑物工程和透水构筑物工程为例, 其所在海域的生态系统服务价值参考 Costanza 对近海生态系统服务价值的评估, 所造成的海洋生态系统服务损失程度参考饶欢欢^[17] 采用专家评分法所得到的损失系数, 填海工程为 1, 非透水构筑为 0.897, 透水构筑物为 0.382, 则对应的受损生境提供的最小服务量 x_{mi}^j 为 0、0.103 和 0.618。假设填海工程的补偿生境为湿地, 非透水构筑物和透水构筑物的补偿生境为藻场, 且补偿工程与海洋工程同时动工, 海洋工程施工时间为 2 a, 补偿生境的恢复时间为 4 a, 即 $t=M-I=4$ a, 并假设通过人工种植和增殖放流, 藻场具有 20% 的初始服务水平。则单位面积的填海工程、非透水构筑物和透水构筑物的补偿规模如表 3 所示。

由于对受损生境和补偿生境生态系统服务量随时间的变化的假设偏离实际情况, 且对于生态系统服务价值量的取值参考的是 Costanza 针对 1994 年全球生态系统服务价值的评估, 所以计算结果比较粗糙, 在实际应用中应当重新估算目标海域的生态系统服务价值。另外进一步地, 通过改变补偿工程相对海洋工程的动工时间和补偿生境的恢复时间(见表 4)发现, 当补偿工程动工时间越晚, 补偿生境恢复的时间越长, 所需补偿规模越大。虽然在计算过程中, 受到参数假设取值的影响, 结果比较粗糙, 但是对于生态修复补偿工程而言具有一定的参考意义。参考补偿动工时间和补偿生境恢复时间对补偿规模的

表3 海洋工程及其补偿规模

Tab.3 Marine engineering and its compensation scale

海洋工程	海洋生态系统服务价值 V_j (\$/ha·a)	补偿生境生态系统服务价值 V_p (\$/ha·a)	S_j	S_p	补偿面积 P
填海工程	4052	14785(湿地)	33.8377	32.858	0.2822
非透水构筑物	4052	19004(藻场)	30.3533	33.303	0.1943
透水构筑物	4052	19004(藻场)	12.9287	34.061	0.0809

表4 补偿工程动工时间和补偿生境恢复时间对补偿规模的影响

Tab.4 The effect of compensation start time and habitat restoration time on compensation scale

海洋工程	补偿工程动工时间减去海洋工程动工时间/a	补偿规模	变化幅度/(%)	补偿生境恢复时间/a	补偿规模	变化幅度/(%)
	0	0.2822	0	4	0.2822	0
填海工程	1	0.2908	3.05	3	0.2780	-1.45
	2	0.2993	6.06	5	0.2864	1.45
	3	0.3085	9.32	6	0.2903	2.87

影响趋势,理论上对于补偿工程而言应当尽早开始实施并通过技术手段缩短生境的恢复时间,以获得更佳的生态补偿效果,但是生态系统有其自然变化规律,缩短生境恢复时间较难实现,并且补偿动工时间对补偿规模的影响更大。为了提高生态补偿效果、降低补偿成本、减轻用海单位的负担,补偿工程应当尽早开始实施。

4 结论

(1)资金补偿标准主要有两种核算方法:基于生态系统服务功能的生态损失补偿资金核算和基于生态修复的生态损失补偿资金核算,前者结果偏高可将其作为理论上限值,而后的核算依据合理易于被人们接受。

(2)生态修复补偿可分为原位补偿和异位补偿,前者通过在结构断面布置层次上考虑提供生物栖息空间、附加藻场以及增加结构物表面粗糙度、增加小型孔洞结构等方法进行生态修复补偿,而后者通过异地重建与海域受损之前相仿的生态系统进行生态修复补偿。两种方法的生态效果都通过工程实践得到了很好地验证,但原位补偿是更生态更经济的选择。

(3)基于HEA对海洋工程中的填海工程、非透水构筑物、透水构筑物所需的生态修复补偿规模进行了理论上的估算,并发现补偿工程动工时间越晚,补偿生境恢复的时间越长,所需补偿规模越大。为了提高生态补偿效果、降低补偿成本,用海单位应当尽早实施生态修复补偿工程。

参考文献:

- [1] 郝林华,陈尚,夏涛,等.用海建设项目海洋生态损失补偿评估方法及应用[J].生态学报,2017,37(20):6884-6894.
- [2] COWELL R. Substitution and scalar politics: negotiating environmental compensation in Cardiff Bay[J]. *Geoforum*, 2003, 34(3): 343-358.
- [3] ELLIOTT M, CUTTS N D. Marine habitats: loss and gain, mitigation and compensation[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2004, 49(9/10): 671-674.
- [4] PALERM J. The habitats directive as an instrument to achieve sustainability? An analysis through the case of the Rotterdam mainport development project[J]. *European Environment*, 2006, 16(3): 127-138.
- [5] 彭本荣,虞杰,刘岩.海洋管理经济刺激手段性质剖析[J]. *海洋开发与管理*, 2011, 28(11): 28-30.
- [6] 隋吉学.海洋工程生态补偿探究[M].北京:海洋出版社, 2016.
- [7] 国家统计局舟山调查队课题组.减船转产渔业劳动力就业出路及渔业可持续发展研究——以舟山为例[J]. *统计科学与实践*, 2018, (1): 43-46.
- [8] 李华琪.我国湿地生态补偿市场化分析——以美国湿地银行为例[C]//中国环境资源法学研究会2014年年会暨2014全国环境资源法学研讨会论文集.广州:中国环境资源法学研究会,中山大学,2014.
- [9] DE GROOT R, FISHER B, CHRISTIE M, et al. Chapter 1, Integrating the ecological and economic dimensions in biodiversity and ecosystem service valuation[M]//KUMAR P. *The Economics of Ecosystems and Biodiversity: Ecological and Economic Foundations*. London: Routledge, 2010.
- [10] HAINES-YOUNG R, POTSCHEIN M. Common international classification of ecosystem services (CICES, Version 4.1)[R]. Nottingham, UK: University of Nottingham, 2012.
- [11] PASCAL U, MURADIAN R, BRANDER L, et al. The economics of valuing ecosystem services and biodiversity[M]//KUMAR P. *Economics of Ecosystems and Biodiversity: The Ecological and Economic Foundations*.

- London: Routledge, 2010.
- [12] 张朝晖, 叶属峰, 朱明远. 典型海洋生态系统服务及价值评估[M]. 北京: 海洋出版社, 2008.
- [13] 王其翔. 黄海海洋生态系统服务评估[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009.
- [14] 郑伟, 王宗灵, 石洪华. 典型人类活动对海洋生态系统服务影响评估与生态补偿研究[M]. 北京: 海洋出版社, 2011.
- [15] COSTANZA R, D'ARGE R, DE GROOT R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. *Ecological Economics*, 1998, 25(1): 3-15.
- [16] 索安宁, 张明慧, 于永海, 等. 曹妃甸围填海工程的海洋生态服务功能损失估算[J]. *海洋科学*, 2012, 36(3): 108-114.
- [17] 饶欢欢. 海洋生态损害评估与补偿: 理论、方法及案例[D]. 厦门: 厦门大学, 2015.
- [18] 韩秋影, 黄小平, 施平, 等. 广西合浦海草示范区的生态补偿机制[J]. *海洋环境科学*, 2008, 27(3): 283-286.
- [19] 韩美, 王一, 崔锦龙, 等. 基于价值损失的黄河三角洲湿地生态补偿标准研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 2012, 22(6): 140-146.
- [20] 苗丽娟, 于永海, 索安宁, 等. 确定海洋生态补偿标准的成本核算体系研究[J]. *海洋开发与管理*, 2013, 30(11): 68-71, 75.
- [21] 李晓光, 苗鸿, 郑华, 等. 生态补偿标准确定的主要方法及其应用[J]. *生态学报*, 2009, 29(8): 4431-4440.
- [22] UNSWORTH R E, BISHOP R C. Assessing natural resource damages using environmental annuities[J]. *Ecological Economics*, 1994, 11(1): 35-41.
- [23] 许志华, 李京梅, 杨雪. 基于生境等价分析法的罗源湾填海生态损害评估[J]. *海洋环境科学*, 2016, 35(1): 13-19.
- [24] 李京梅, 刘铁鹰. 基于生境等价分析法的胶州湾围填海造地生态损害评估[J]. *生态学报*, 2012, 32(22): 7146-7155.
- [25] 张荣. 海岸防护工程建筑物类型与效果研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
- [26] 贾春磊. 浅谈海岸防护工程技术[J]. *中国水运*, 2010, 10(11): 169-170.
- [27] 刘盈斐. 多孔隙生态护岸的实验分析与设计研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2007.
- [28] LAN C H, CHEN C C, HSUI C Y. An approach to design spatial configuration of artificial reef ecosystem[J]. *Ecological Engineering*, 2004, 22(4/5): 217-226.
- [29] WEIGHT A. Artificial reef in Newquay, UK[J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Municipal Engineer*, 2004, 157(2): 87-95.
- [30] 徐茹娟, 黄清和, 陈建志, 等. 生态型海岸保护工法研究(1/4)[M]. 台北: 交通部运输研究所, 1995.
- [31] STRAIN E M A, OLABARRIA C, MAYER-PINTO M, et al. Eco - engineering urban infrastructure for marine and coastal biodiversity: Which interventions have the greatest ecological benefit?[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2018, 55(1): 426-441.
- [32] BULLERI F, CHAPMAN M G. The introduction of coastal infrastructure as a driver of change in marine environments[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2010, 47(1): 26-35.
- [33] AKEDA S, YAMAMOTO Y, KIMURA K, et al. Design and construction of seawater exchange breakwaters[C]// *Proceedings of 26th Conference on Coastal Engineering*. Copenhagen, Denmark: ASCE, 1998.
- [34] KIM K H, SEO H, KOBAYASHI N. Field assessment of seawater exchange breakwater[J]. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 2011, 137(3): 146-149.
- [35] LEE D S, PARK W S, KOBAYASHI N. Circular channel breakwater to reduce wave overtopping and allow water exchange[C]// *Proceedings of the 24th International Conference on Coastal Engineering*. Kobe, Japan: ASCE, 1994.
- [36] 张弛, 董敏. 梳式防波堤结构在人工岛设计优化中的应用[J]. *中国水运*, 2016, 16(7): 268-269.
- [37] 牛恩宗, 马德堂, 孙绍晨. 新型梳式防波堤[J]. *土木工程学报*, 2003, 36(10): 51-55, 88.
- [38] 佐藤朱美, 足立久美子, 大澤義之, 等. 藻場造成機能を付加した沿岸構造物の藻場創出効果について[J]. *海洋開発論文*, 2004, 20: 1007-1011.
- [39] HARRIS B. Submerged reef structures for habitat enhancement and shoreline erosion abatement[R]. *Coastal Engineering Technical Note, CETN-III, U.S. Army Corps of Engineers*, 2001.
- [40] BROWNE M A, CHAPMAN M G. Ecologically informed engineering reduces loss of intertidal biodiversity on artificial shorelines[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(19): 8204-8207.
- [41] MAZIK K, MUSK W, DAWES O, et al. Managed realignment as compensation for the loss of intertidal mudflat: A short term solution to a long term problem?[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2010, 90(1): 11-20.
- [42] PENDLE M. Estuarine and coastal managed realignment sites in England -A comparison of predictions with monitoring results for selected case studies[EB/OL]. [2018.6]. http://eprints.hrwallingford.co.uk/664/1/HRPP627-Managed_realignment.pdf.
- [43] MORRIS R K A. Managed realignment as a tool for compensatory habitat creation - A re-appraisal[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2013, 73: 82-91.
- [44] ADMINISTRATION N O A. Habitat equivalency analysis: an overview[R]. Silver Spring: *Damage Assessment and Restoration Program*, 2000.