

基于恢复能力与影响周期的围海养殖工程生态损害特征及补偿标准

——以象山县水湖涂名优水产养殖区为例

冯佰香¹, 李加林^{1,2}, 龚虹波³, 何改丽¹, 黄日鹏¹, 李昌达⁴

(1. 宁波大学地理与空间信息技术系, 宁波 315211; 2. 宁波大学东海研究院, 宁波 315211;

3. 宁波大学法学院, 宁波 315211; 4. 温州市洞头区海洋生态与藻类研究院, 温州 325000)

摘要: 以宁波市象山县水湖涂名优水产围海养殖工程为研究对象, 通过构建生态服务价值损害评估指标体系, 分析了围海养殖区的生态损害特征, 并基于海域自我恢复能力, 研究了围海养殖工程的生态补偿标准和资源恢复周期。结果显示: (1) 名优水产围海养殖工程造成的生态损害总价值为 318.90 万元/a, 单位面积损害价值为 3.20 万元/hm²·a。生态损害主要以生态服务型为主, 占总量比例为 53.54%。(2) 生物资源型损害类别中, 潮间带生物损害价值最大, 为 59.71 万元, 其次为紫菜养殖和鱼卵、仔鱼, 二者损害价值量相当, 占总量比例均为 13.55%, 底栖生物和游泳生物价值损失则均较小。(3) 生态服务型损害类别中, 一级类别主要以调节服务价值为主, 占总量比例为 32.56%。二级损害类别中, 废弃物处理损害价值最大, 为 71.77 万元, 休闲娱乐损害价值也较大, 占总量比例为 12.80%, 其他类型则价值损失较小。(4) 名优水产围海养殖工程基于海域自我恢复能力的生态补偿标准为 280.90 万元/a, 单位面积补偿价值为 2.82 万元/hm²·a, 对比生态损害价值确定的补偿标准, 总量减少 11.92%。项目施工结束后, 近岸滩涂恢复速度为 4.6320 hm²/a, 约 13 年后新围大堤附近滩涂将恢复到围海前的基线水平。

关键词: 围海养殖; 生态补偿; 恢复能力; 影响周期

近年来随着中国经济的不断发展, 陆地资源日益紧缺, 海洋经济逐步成为国民经济的新增长点^[1]。海洋作为全球三大生态系统之一, 不仅为人类提供着丰富的自然资源, 还在全球气候调节、水分平衡、营养元素循环等方面发挥着重要的生态作用^[2]。而随着人类活动的不断干预, 滨海湿地及近岸海域生境丧失、资源衰减、污染加剧、富营养化、水动力条件紊乱和生物多样性减少等生态环境问题日益严峻^[3-4]。围填海造地是一种典型的海洋及海岸带人类开发利用活动, 近年来学者们对其造成的生态影响研究日益深入。总体来看研究内容主要集中在: 生态环境服务价值损害评估^[5-6], 生态补偿标准制定与补偿机制探讨^[7-9]以及围填海对海洋水动力与生态环境的影响^[10-11]等方面。研究方法主要有生态服务价值评估^[12-13]、生境等价分析^[14]、机会成本^[15]、能值分析^[16]和CVM意愿调查等方法^[17]。学者们在围填海生态补偿研究方面所做的大量工作, 多是从围填海面积及影响范围造成的价值损害角度进行生态补偿标准的建立, 而没有考虑围填海后海洋生态系统的自我恢复能力与影响周期, 这在一定程度上导致了确定的生态补偿标准偏高。本文拟以象山县水湖涂名优水产养殖区围填海工程为例, 基于围海后的生态系统恢复能力与影响周期, 探讨围

收稿日期: 2018-10-28; 修订日期: 2019-01-30

基金项目: 国家社会科学基金重大项目 (16ZDA050)

作者简介: 冯佰香 (1993-), 女, 甘肃武威人, 硕士, 主要从事海岸带环境与生态研究。E-mail: 1821453200@qq.com

通讯作者: 龚虹波 (1972-), 女, 浙江宁波人, 博士, 教授, 主要从事海洋环境治理研究。E-mail: ghb19@163.com

海养殖工程的生态补偿标准,以期丰富围海养殖工程生态损害补偿标准的研究案例。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 研究区概况

宁波市象山县水糊涂二号区块名优水产围海养殖工程(以下简称名优水产围海养殖工程)位于象山县鹤浦镇,面临东海猫头洋、南田湾,属浙江省宁波市象山县南海岸(图1)。海涂地形较平坦,北高南低,底质主要为粉质粘土和淤泥质粘土。围区内滩涂养殖主要为传统的紫菜养殖。项目区所在海域地处亚热带,四季分明,多年平均气温 $16.2\text{ }^{\circ}\text{C}$,年温差 $22.2\text{ }^{\circ}\text{C}$;雨量丰富,多年平均降雨量 1301 mm ;日照充足,多年平均日照时数 1923 h ,日照百分率 46% 。夏季多东南风,冬季多西北风。台风多发生在6-10月,并以8月最频。

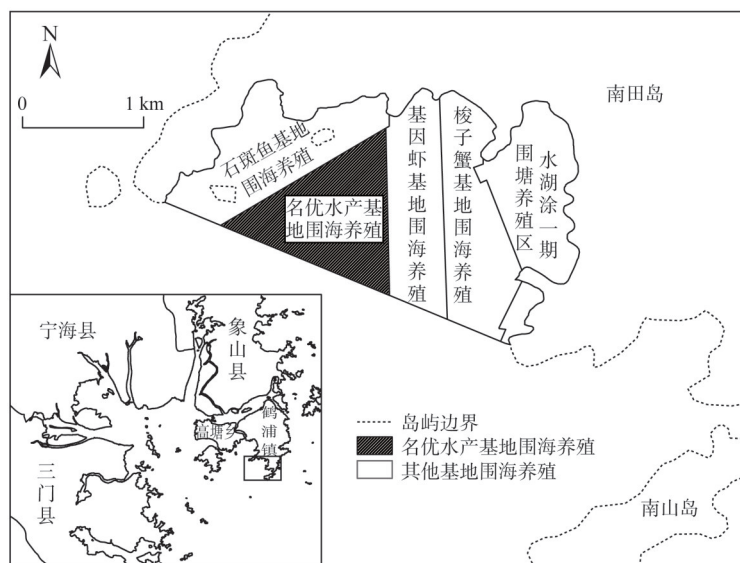


图1 研究区区位

Fig. 1 Location of the study area

根据《象山县水糊涂二期围涂养殖规划》,象山县水糊涂二号区块出让后作为名优水产养殖基地,出让海域总面积 99.5619 hm^2 ,其中围海养殖用海 84.1617 hm^2 ,透水构筑物用海 14.8066 hm^2 ,非透水构筑物用海 0.5936 hm^2 。围区划分为两个不同功能区:(1)养殖区。养殖塘面积 76.3045 hm^2 ,规划以池塘养殖南美白对虾、脊尾白虾等为主,底层混养泥蛤、缢蛭等贝类。(2)沉淀净化区。面积约 2.8667 hm^2 ,用来稀释净化养殖区排放的养殖废水。

1.2 研究方法

1.2.1 生态损害评估方法

生态损害指标可划分为生物资源损害和生态服务损害两大类。本文在参考李京梅等构建的围填海造地生态损害指标体系基础上^[18],结合研究区实际,构建了围海养殖工程生态损害评估指标体系(表1)。

表1 围海养殖工程生态损害评估指标体系及方法

Table 1 Index system and methods of ecological damage assessment of the aquaculture project

损害类型	一级指标	二级指标	评估方法	方法说明
生物资源损害	养殖损害	紫菜	$V_{11}=S\times Q\times P$	V_{11} 为紫菜养殖的损害价值(万元); S 为养殖面积(hm^2); Q 为单位面积养殖网数量(张/ hm^2); P 为养殖产品的单位数量市场价格(万元/张)
		养殖		
	资源损害	底栖生物	$V_{21}=S\times M\times c\times P$	V_{21} 为底栖生物损害价值(万元); S 为围海面积(hm^2); M 为底栖生物平均生物量(t/hm^2); c 为底栖生物转为渔业资源的营养级转化率(%); P 为渔业资源当年市场平均价格(万元/t)
		潮间带生物	$V_{23}=S\times M\times P$	V_{23} 为潮间带生物损害价值(万元); S 为围海工程占用的潮间带面积(hm^2); M 为潮间带生物平均生物量(t/hm^2); P 为潮间带生物资源商品价格(万元/t)
		鱼卵仔鱼	$V_{24}=S\times H\times M\times b\times P$	V_{24} 为鱼卵与仔鱼损害价值(万元); S 为围海面积(hm^2); H 为平均水深(m); M 为鱼卵、仔鱼平均分布密度(尾/ m^3); b 为鱼卵与仔鱼折算为鱼苗的换算比例,鱼卵生长到商品鱼苗按1%成活率计算,仔鱼生长到商品鱼苗按5%成活率计算(%); P 为当年鱼苗的市场价格(万元/尾)
生态服务损害		游泳生物	$V_{25}=S\times M\times P$	V_{25} 为游泳生物的损害价值(万元); S 为围海面积(hm^2); M 为渔业资源平均资源重量值(t/hm^2); P 为当年渔业资源市场平均价格(万元/t)
	调节服务	气体调节	$V_{31}=(1.63C_{\text{CO}_2}+1.20C_{\text{O}_2})\times X\times S$	V_{31} 为气体调节损害价值(万元); C_{CO_2} 为固定 CO_2 的成本, C_{O_2} 为人工制氧的成本(万元/t); X 表示浅海、潮间带的净初级生产力($\text{t}/\text{hm}^2\cdot\text{a}$); S 为围海工程占用的浅海、潮间带面积(hm^2)
		干扰调节	$V_{32}=[(1+\rho n)\times L\times P]/n$	V_{32} 干扰调节服务损害价值(万元); ρ 为每年维护海堤的成本占海堤工程总造价的比例(%); L 为围海占用岸线总长度(km); P 为海堤工程造价(万元/km); n 为海堤使用年限(年)
		废弃物处理	$V_{33}=\sum_{i=1}^n C_i\times X_i\times S$	V_{33} 为废弃物处理的损害价值(万元); X_i 表示第 <i>i</i> 种污染物单位面积的环境容量(t/hm^2); C_i 为第 <i>i</i> 种污染物的处理成本(万元/t); S 为围海面积(hm^2)
	支持服务	养分循环	$V_{41}=(C_N\times X_N+C_P\times X_P)\times S\times H$	V_{41} 为营养物质循环的损害价值(万元); C_N 、 C_P 为N、P的去除成本(万元/t); X_N 、 X_P 为单位面积海水的N、P环境容量(t/hm^2); S 为浅海面积(hm^2)
		生物多样性	$V_{42}=B\times S$	V_{42} 为生物多样性维持损害价值(万元); B 为同一地区或者相近地区单位面积海域生物多样性的价值(万元/ $\text{hm}^2\cdot\text{a}$); S 为围海面积(hm^2)
	文化服务	休闲娱乐	$V_{51}=\frac{I\times r}{S_1}\times S_2$	V_{51} 为休闲娱乐服务的损害价值(万元); I 为当地旅游经济的总收入(万元); r 为旅游净收入占总收入的比例(%); S_1 为旅游经济涉及的收益总面积(hm^2); S_2 为围海面积(hm^2)
		科研文化	$V_{52}=B\times S$	V_{52} 为科研文化服务的损害价值(万元); B 为单位面积海域的科研文化服务价值(万元/ $\text{hm}^2\cdot\text{a}$); S 为围海面积(hm^2)

1.2.2 海域恢复能力与资源影响周期评估方法

原有海洋生态系统在围海工程结束后,通过一定时间的调整,堤外海侧水沙动力条

件将重新达到平衡,并逐渐形成新的滩涂生态系统,恢复一定的生态服务功能,随着时间累积系统生态服务会逐渐达到损害前的初始水平。滩涂面积的不断淤积增加,会逐渐补偿已受损的滩涂资源,使系统面积经过一定时间自然恢复到初始水平,计算方法如下:

$$T = \frac{S_B}{v_R} \quad (1)$$

式中: T 为资源恢复周期(年); S_B 为滩涂生态系统受损面积(hm^2); v_R 为滩涂生态系统恢复速度(hm^2/a)。

名优水产围海养殖工程涉及的海洋生态系统主要包括两个:浅海生态系统和滩涂生态系统,因此滩涂生态系统单位面积服务价值可用以下方法计算:

$$V_B = \frac{V_T - V_M \cdot S_M}{S_B} \quad (2)$$

式中: V_B 表示滩涂生态系统的单位面积服务价值(万元/ hm^2); V_T 表示海洋生态系统总服务价值(万元); V_M 表示浅海生态系统的单位面积服务价值(万元/ hm^2); S_M 为浅海生态系统面积(hm^2); S_B 为滩涂生态系统面积(hm^2)。

滩涂生态系统服务价值的恢复前提在于淤积面积的不断增长,初始恢复年份的生态服务价值增量计算方法如下:

$$V_1 = V_R \cdot S_R \quad (3)$$

式中: V_1 为初始恢复年份的生态服务价值增量(万元); V_R 为生态系统的单位面积恢复服务价值(万元/ hm^2); S_R 为生态系统恢复的面积(hm^2)。

滩涂面积的不断增长会引起滩涂生态系统服务价值的持续增加,故滩涂生态系统价值的恢复具有累积性,其计算方法如下:

$$V_R = nV_1 + \frac{n(n-1)}{2}V_C \quad (4)$$

式中: V_R 为系统恢复的生态服务总价值(万元); V_1 为起始年份的恢复价值(万元); V_C 为每年增加的恢复价值(万元); n 表示恢复年限。

有时考虑到海洋生态损害补偿价值庞大、补偿主体无法一次性支付等情况^[7],允许分期支付补偿金额。参考如下方法计算^[7]:

$$P = \frac{1 - (1+i)^{-n}}{i} \times A \quad (5)$$

式中: P 为需支付的补偿金额(万元); i 为利率(%); A 为生态补偿总量(万元); n 为支付的年限。

1.3 数据来源

本文根据《象山县水糊涂二号区块拟出让海域使用论证报告书》(以下简称论证报告)、《2015年宁波市海洋环境公报》和《2015年象山县国民经济和社会发展统计公报》等统计数据,评估名优水产围海养殖工程的各项生态损害价值。

2 结果分析

2.1 生态损害价值估算与评价

2.1.1 生物资源损害价值

(1) 养殖损害价值

研究区沿岸海涂氮、磷丰富,且潮流畅通,十分适宜紫菜生长。研究区所在水湖涂

村是有名的紫菜养殖专业村,全村约有80%的人从事紫菜养殖。项目区未施工前海水养殖主要为传统的滩涂紫菜养殖,整个水湖涂二期围涂区域内共有约21200张紫菜养殖网,其中名优水产围海养殖工程区域内约有4800张。项目实施后,该区域滩涂资源丧失,将无法继续进行紫菜养殖,紫菜资源价值全部损失。根据海涂紫菜养殖补偿协议可知,该项目养殖资金补偿为90元每张养殖网,故名优水产围海养殖工程造成的紫菜养殖户养殖损失价值为43.20万元。

(2) 资源损害价值

① 底栖生物损害价值

围海养殖活动造成的底栖生物生态损害具有永久性,它会彻底改变海洋物理化学属性,使得底层底栖生物完全丧失生存环境,从而导致其全部死亡,并且使其所具有的价值也全部丧失。围海之前,工程区春季、秋季的生物变化如表2所示:

表2 春季和秋季生物变化表

Table 2 Biological changes in spring and autumn

季节	底栖生物密度 分布范围 /(个/m ²)	底栖生物 平均密度 /(个/m ²)	底栖生物 平均生物量 /(g/m ²)	潮间带生物 栖息密度 范围/(个/m ²)	潮间带生物 栖息平均密度 /(个/m ²)	潮间带生物 平均生物量 /(g/m ²)	鱼卵平均 分布密度 /(个/m ³)	仔鱼平均 分布密度 /(尾/m ³)
春季	10~80	37	10.5	48~264	120.5	37.47	2.57	5.34
秋季	15~90	44	12.7	44~191	100.2	33.4	1.56	4.68

注:数据来源于《象山县水湖涂二号区块拟出让海域使用论证报告书》,由宁波市海洋与渔业研究院调查所获。

2015年三门湾海域大型底栖生物调查显示,项目海域大型底栖生物共10种,其中软体动物5种,多毛类3种,甲壳类2种。优势种有不倒翁虫、红带织纹螺、西格织纹螺和日本刺沙蚕等。春季底栖生物密度分布范围为10~80个/m²,平均为37个/m²,生物量变幅为0.50~20.70 g/m²,平均生物量为10.5 g/m²。秋季底栖生物密度分布范围为15~90个/m²,平均为44个/m²,生物量分布范围为5.6~22.4 g/m²,平均生物量为12.7 g/m²。围海养殖后,围区内原有底栖生物的生境发生根本改变,底栖生物价值全部损失。按围海面积99.5619 hm²计算,底栖生物的损失个数为4.03×10⁷个,损失量为11.55 t。底栖生物最终会转化为渔业资源,按照营养级十分之一转化定律^[19],底栖生物转化为渔业资源损失量为1.155 t。三门湾2015年渔业资源的市场平均价格为12.85元/kg(宁波市海洋与渔业局),故底栖生物的损害价值为1.48万元。

② 潮间带生物损害价值

潮间带为高低潮之间的地带,高潮时被水淹没,低潮时露出水面。项目附近水域的多年平均低潮位为-1.60 m,多年平均高潮位为2.32 m,围海区高程在-2.92~2.21 m之间,为潮间带、浅海地带。项目区潮间带生物共5类32种,主要以软体和甲壳类动物为主。论证报告所调查的四个断面中,潮间带生物栖息密度分布为中潮区、低潮区和高潮区递减,高潮区生物密度较低,主要原因在于受围垦等人类活动影响,许多岸段已无高潮滩出露^[20]。围区内平均多年低潮位以上区域的养殖塘建设需进行挖深,以符合养殖的要求。据论证报告调查,需挖深面积为60.0790 hm²,平均挖深0.3 m。围区挖深使得该部分潮间带生物环境发生根本性改变,潮间带生物损失以全部丧失计算。项目海域两季潮间带生物平均生物量为78.70 g/m²,则潮间带生物损失量为47.28 t。参考已有研究中潮间带生物资源价格12.63元/kg^[18],故名优水产围海养殖工程造成的潮间带生物损害价值为59.71万元。

③ 鱼卵、仔鱼损害价值

围海工程对鱼卵、仔鱼的影响主要来自于施工期间产生的悬浮泥沙及噪音等,施工悬浮泥沙形成的大量悬浮沉积物一方面会堵塞生物的腮部造成其死亡,另一方面会造成水体严重缺氧而导致生物死亡。此外悬浮沉积物填埋、有害物质二次污染也会造成鱼类死亡。项目海域春季和秋季渔业资源均以仔鱼为主,其平均分布密度分别为 $5.34\text{尾}/\text{m}^3$ 和 $4.68\text{尾}/\text{m}^3$,其次为鱼卵,其春秋季平均分布密度分别为 $2.57\text{尾}/\text{m}^3$ 和 $1.56\text{尾}/\text{m}^3$ (表2)。根据围海面积 99.5619hm^2 ,平均水深 2m 考虑,工程造成的仔鱼损失量为 $9.32\times 10^6\sim 10.63\times 10^6$ 尾,鱼卵损失量为 $3.11\times 10^6\sim 5.12\times 10^6$ 个。换算为商品鱼苗,仔鱼数量为 4.99×10^5 尾,鱼卵数量为 0.41×10^5 尾,共 5.40×10^5 尾。鱼苗的市场价格取 $0.8\text{元}/\text{尾}$ ^[18-19],故鱼卵、仔鱼的损害价值为 43.20 万元。

④ 游泳生物损害价值

项目所在海域游泳生物主要包括鱼类、虾类、蟹类和贝类等四类,其中主要以虾蟹类为主,鱼类其次,贝类最少。项目围海总面积为 99.5619hm^2 ,其建设直接占用该区域,造成游泳生物的损失以全部丧失计算。根据论证报告中渔业资源调查结果,渔获物资源平均重量值为 $450.34\text{kg}/\text{km}^2$,则围区游泳生物的损失量为 448.37kg ,渔业资源平均市场价格按 $12.85\text{元}/\text{kg}$ 计算(宁波市海洋与渔业局),则渔业资源损害价值为 0.58 万元。

2.1.2 生态服务损害价值

(1) 调节服务损害价值

① 气体调节损害价值

浅海及周边滩涂生态系统的气体调节服务主要来自于海水、植被等对各种温室气体的吸收、固定,并包括它们所释放的氧气。气体调节服务价值的估算一般以海洋生态系统的初级生产力为基础^[21],依据植物光合作用方程,采用碳税法和造林成本法进行。固碳成本可根据国际碳税率标准和中国实际情况确定,此处采用中国的造林成本 $250\text{元}/\text{t}$ 和国际碳税标准 $150\text{\$/t}$ 的平均值 $770\text{元}/\text{t}$ 作为碳税标准^[5],释放 O_2 的成本采用工业制造氧气的平均生产成本,取 $420\text{元}/\text{t}$ ^[19]。项目所在滩涂、浅海的气体调节主要来自三个方面:一是浮游植物提供的初级生产力,另一是紫菜养殖的固碳效益,再有是贝类固定的碳。参考已有研究^[21-22],初级生产力取浅海 $230\text{mg}/\text{m}^2\cdot\text{d}$,潮间带 $360\text{mg}/\text{m}^2\cdot\text{d}$,2015年共365天,则项目区浅海和潮间带初级生产力分别为 33.15t 和 78.94t ,总量为 112.09t ,从而得到项目围海所造成的气体调节损害价值潮间带、浅海分别为 13.89 万元和 5.83 万元,总损害价值为 19.72 万元。

② 干扰调节损害价值

海湾的干扰调节主要包括促淤消浪和防风固岸两个方面。工程所占用的潮间带分布有少量互花米草植被,据调查波浪每传入密集的互花米草滩 1m ,波能就损失约 2.6% ^[23],其消浪效果显著。此外,三门湾每年6-10月份受台风影响较大,海岸带植被带还在一定程度上削弱着台风的强度。项目区原建有人工防护岸线,并已在靠海一侧形成稳定的近岸生态系统,围海扰乱了系统的稳定,最终导致岸线提供的干扰调节服务受损。该损失可采用影子工程法衡量,即以建设同等长度防护岸线的工程造价进行估算。项目区建设间接占用岸线的长度为 1544m ,参考已有成果海堤工程造价取 $200\times 10^4\text{元}/\text{km}$,每年维护海堤的成本占海堤工程总造价的比例取 2% ^[24],海堤使用年限取 50年 ^[25],故围海养殖造成的干扰调节损害价值为 12.35 万元。

③ 废弃物处理损害价值

海洋可通过物理、化学和生物等净化功能将径流、人类直接排入海的废水和固体废物等最终转化为无害物质^[6]。浅海N、P容量的价值在养分循环中会有体现,为避免重复计算,此处主要估算潮间带N、P容量的损害价值及围区COD环境容量的损害价值。潮间带对N、P等营养物质有截留作用,项目所占潮间带分布植被有少量互花米草,此外基本为光滩。参考前人研究^[26],淤泥光滩对TN、TP的截留效果分别为每年0.385 kg/hm²和0.042 kg/hm²。围海项目占用淤泥光滩面积按60.0790 hm²计,脱氮、除磷成本分别按2.8万元/t、22.5万元/t计算^[25],则N、P处理费用分别为647.65元和567.75元,总计0.12万元。单位面积海水COD去除量按149.52 t/km²·a计,并取COD去除成本为4300元/t,则其处理费用为64.01万元。项目区围海后用于水产养殖,在营运期间,养殖区在养殖换水过程中,过剩饵料以及养殖虾贝的排泄物经分解后会释放有机污染物COD和氮、磷等营养盐。大量养殖废水的长期排放,最终会对海洋生态环境造成污染。养殖区的养殖用海面积为84.1617 hm²,根据已有研究成果^[27],单位面积海水养殖COD、无机氮和无机磷的排放量分别为11.26 t/km²·a、0.32 t/km²·a和0.15 t/km²·a。由此计算可得围海后养殖区的COD、无机氮和无机磷的环境影响容量分别为9.48 t/a、0.27 t/a和0.13 t/a,则项目运营期所造成的废弃物处理损害价值为7.76万元/a。名优水产围海养殖工程造成的废弃物处理损害总价值为71.77万元。

(2) 支持服务损害价值

① 养分循环损害价值

海洋生物对于营养物质(N、P等)具有储存、循环和保持等作用,海洋营养物质循环一方面促进着营养元素在海陆间的动态循环,另一方面支撑着海洋生态系统的正常运转。根据论证报告,项目所在海域的无机氮和无机磷环境容量分别为0.682 mg/L和0.048 mg/L,所占用浅海面积为39.4829 hm²(潮间带部分已包含于废弃物处理损害价值中,此处不做重复计算),围海区水深平均按2 m计,则造成的N、P营养物质环境损失量分别为538.55 kg和37.90 kg。脱氮、除磷成本分别按2.8万元/t、22.5万元/t^[25]计算,则项目区营养物质循环的损害价值为2.36万元。

② 生物多样性损害价值

象山县滩涂资源丰富,近海和滩涂为海洋生物、鸟类等提供栖息地,维持着海域近岸生态系统的生物多样性。围海会导致项目区所具有的天然越冬、庇护等栖息功能彻底改变,从而使潮间带生物多样性彻底丧失,近岸生物多样性大大减少。本文参考Costanza等^[28]研究成果,取单位面积湿地的生物庇护服务价值304美元/hm²·a,折算为人民币(汇率为6.65元)为0.20万元/hm²·a。因此,名优水产围海养殖工程造成的生物多样性损害价值为19.91万元。

(3) 文化服务损害价值

① 休闲娱乐损害价值

象山县是宁波市唯一拥有海、山、岛、崖、滩、景、海产品七大特点的自然滨海游览区,旅游资源众多,观赏性强。除旅游外,近陆海岸还为人类提供观鸟、摄影、垂钓等活动的场所机会和条件,使人们得到美学体验和精神享受等服务^[25]。象山县以海洋旅游资源为主,2015年象山县旅游综合经济总收入为165.37亿元,旅游净收入按总收入的20%计算^[12],象山县区域总面积约为8000 km²,故以此估算其平均休闲娱乐价值

为0.41万元/hm²。由此计算,可得围海养殖造成的休闲娱乐损害价值为40.82万元。

② 科研文化损害价值

海洋为人类提供文学、音乐、艺术等享受与创作的机会,所提供的价值是非物质性的。因此,估算科研价值十分困难,尤其是基础科研,其经济效益不明显,而且在短期内难以见效,目前也没有现成的科研投资与经济效益比率^[21]。对于海洋科研文化价值估算主要利用科研经费投入、调查人们的支付意愿或参考已有研究成果来计算,本文参考国内研究成果^[29],取单位面积湿地生态系统平均科研价值382元/hm²·a,故项目区科研文化损害价值为3.80万元。

2.1.3 损害价值结果评价

根据上述计算,最终得到名优水产围海养殖工程造成的各类损害价值(表3)。总体来看,名优水产围海养殖工程造成的生态损害总价值为318.90万元/a,单位面积损害价值为3.20万元/hm²·a。在研究所划分的生物资源和生态服务两大损害类型中,损害价值主要以生态服务型为主,占总量比例的53.54%,生物资源型损害所占比例则略低。围海项目区,间接型的生态服务价值损失十分明显,围海所造成的直接型生物资源损失为其次。分析一级损害类型可知,在所划分的两类生物资源损害和三类生态服务价值损害中,主要以资源损害类型为主,其价值在五类中最大,为104.97万元,占总价值比例为32.92%;其次为调节服务损害,占比仅低于生物资源损害0.36个百分点;养殖和文化服务的损害价值基本相当,所占总量比例分别为13.55%和13.99%;支持服务损害价值最小。从二级损害类型来看,资源型损害中潮间带生物损害价值最大,占生物资源型损害价值总量的40.31%;其次为紫菜养殖和鱼卵、仔鱼,损害价值相等,占比均为29.16%;其他资源损害类型价值较小。项目区所处的象山县,滩涂资源丰富,约占宁波市滩涂资源总量的23.15%,海岸线长达925 km,丰富的滩涂和漫长的海岸线为潮间带生物提供了优越的生存环境,使其潮间带生物种类十分丰富,分布有约200种海洋生物,因此滩涂

表3 围海养殖工程造成的生态损害价值

Table 3 The value of ecological damage caused by sea reclamation project

一级损害类型	损害价值/万元	二级损害类型	损害价值/万元	占总量比例/%	占相应一级类型比例/%
养殖损害	43.20	紫菜养殖	43.20	13.55	29.16
资源损害	104.97	底栖生物	1.48	0.46	1.00
		潮间带生物	59.71	18.72	40.30
		鱼卵、仔鱼	43.20	13.55	29.16
		游泳生物	0.58	0.18	0.39
调节服务损害	103.84	气体调节	19.72	6.18	11.55
		干扰调节	12.35	3.87	7.23
		废弃物处理	71.77	22.51	42.04
支持服务损害	22.27	养分循环	2.36	0.74	1.38
		生物多样性	19.91	6.24	11.66
文化服务损害	44.62	休闲娱乐	40.82	12.80	23.91
		科研文化	3.80	1.19	2.23
总价值	318.90	—	—	100.00	—

注:浮游生物生物量较小,如浮游动物平均生物量仅为44.9 mg/m³,而浮游植物营养级转化系数较高,二者价值均较小,此处忽略不计。

围垦导致的潮间带生物损失重大。项目所处海湾为浙江省三大封闭型海湾之一的三门湾,约有30多条溪流注入其中,入湾径流带来丰富的营养物质,为海洋鱼类提供了大量饵料,加之其三面环陆,风小浪缓,是各种鱼类繁殖的优良场所^[30]。此外,三门湾渔业资源主要分布在平均水深小于10 m的水域^[31],项目区水深最大为2.92 m,因此项目施工会导致大量渔业资源的丧失。紫菜养殖为人工资源,因此其损害价值也较大。生态服务型损害二级类型中,以废弃物处理损害价值最大,占生态服务型损害价值的42.04%;其次为休闲娱乐,占比为23.91%;生物多样性、气体调节和干扰调节损害价值也较大,所占生态服务型损害价值比例分别为11.66%、11.55%和7.23%;其余类型所占比例较小,均在3%以内。潮间带对N、P等营养物质具有显著的截留作用,近岸海域自身所具备的净化能力会降解或分解COD等污染物质,而项目运营期产生的养殖废水的排放,加剧了近岸系统的废弃物处理净化压力,使得围海导致的废弃物处理损害价值较高。名优水产工程所在的三门湾,滩涂众多,旅游资源丰富,文化服务价值的实现较大。海湾作为海陆间过渡地带,不仅是地表径流、河流水的注入口,还是大气沉降等的容纳者,对气体的调节作用十分庞大。滩涂、近岸系统为海陆间过渡地带,所包含生物具有海陆二相性,种类丰富,生物多样性价值较大。

2.2 基于恢复能力与影响周期的生态补偿标准

2.2.1 恢复能力与影响周期对生态损害的影响

滩涂围垦会导致海湾纳潮量的减少,进而使潮流动力减弱,引起湾内海床侵淤特征的变化。根据论证报告,项目完成后围堤中段附近约2.18 km²范围内,流速增大10%~50%,围堤西端附近约0.09 km²范围内流速减小约10%,围堤东端约0.54 km²范围内流速减小10%~40%,越靠近围堤前沿,流速变幅越大。流速的变化,导致围堤冲淤的相应变化,根据论证报告可知,项目实施后围堤前沿淤积明显,围堤东段以东至南田岛之间的锚地区域,淤积0.4~1.6 m,南山岛东西两侧约有0.1~0.4 m淤积。

受海域来沙和海洋动力条件的影响,滩涂围垦后堤外淤涨速率加快,新围海域堤外在一定时间内将重新达到淤积平衡^[32]。淤积形成的新滩涂生态系统,会增加各种天然的生物资源和生态服务功能。参考已有成果^[32-33],项目区淤积速度平均值为0.80 m/a,潮滩外涨速率约为60 m/a(取平均值)。除去冲刷岸线,淤积岸线长度为772 m,故可得滩涂系统恢复速度为4.6320 hm²/a。海域使用年限按20年计,则最终形成的滩涂面积为92.6400 hm²。项目占用滩涂面积为60.0790 hm²,根据式(1),可得恢复原有近岸滩涂生态系统的周期为12.97年,即在海洋使用期限内滩涂资源就可恢复到原有水平。恢复的滩涂,在适宜环境条件下浮游植物发育生长、浮游动物及底栖生物逐渐繁殖,游泳生物增加,形成新的潮间带浅海生态系统,进而恢复部分生物资源和生态服务功能。因此将海域的自我恢复能力考虑到围填海工程造成的生态补偿标准的制定中,无疑是十分必要的,它可以科学合理的降低由海洋生态服务功能损害价值确定的补偿标准,也即被学者们普遍认为的系统补偿上限^[34],在一定程度上有助于解决目前海洋生态补偿所面临的标准过高、补偿积极性过低等问题。

2.2.2 基于恢复能力的生态补偿标准

传统的基于生态服务价值估算的围填海生态补偿标准建立,多将最终评估所得的损害价值直接作为补偿标准^[18],因此本文基于生态损害的围海养殖工程补偿标准为318.90万元/a,单位面积补偿标准为3.20万元/hm²·a。因直接由生态损害确定的补偿标准一般金额较

大, 补偿者无法一次性支付, 允许其进行分期支付。由论证报告可知, 名优水产围海养殖工程用海时间为20年, 则取支付年限为20年, 取2015年基准利率6.15% (5年以上), 生态补偿总量按318.90万元计, 则根据式 (5), 可得分期付款总金额为3613.63万元, 平均为180.68万元/a, 单位面积补偿金额为1.81万元/hm²·a。分期支付, 虽金额数值“减少”, 但为考虑利率的现值支付水平, 因此其“本质”是不变的。

对于围填海工程生态补偿标准总量的计算, 直接将生态损害价值总额作为每年的补偿金额, 并将其同用海年限结合, 计算最终的一次性补偿标准为常用手段^[18,35], 但这种计算方法忽略了围海工程结束后运营期海域的自我恢复能力。名优水产养殖工程围海结束后, 在防护大堤附近会缓慢的形成新的近岸滩涂系统, 产生和增加生物资源及生态服务功能, 因此考虑围海项目结束后海域自我恢复能力从而构建生态补偿标准将更为客观可行。名产水优围海养殖工程造成的生态损害总价值为318.90万元, 根据既有研究, 浅海服务价值按滩涂一半计^[9], 根据式 (2), 可得滩涂系统的单位面积价值为4.00万元/hm², 已知滩涂资源恢复速度为4.6320 hm²/a, 根据式 (3), 可得恢复的生态服务价值为18.53万元/a。滩涂恢复价值具有累积性, 取滩涂生态系统的年服务价值平均增量与初始年份的服务价值恢复量相等, 则根据式 (4), 可得基于恢复能力的价值恢复总额为760.00万元 (20年), 平均年恢复量为38.00万元/a, 故而考虑滩涂生态系统恢复能力的名优水产围海养殖工程的生态补偿标准为280.90万元/a, 单位面积补偿价值为2.82万元/hm²·a。

2.2.3 生态补偿标准对比分析

由表4可知, 基于滩涂恢复能力的名优水产围海养殖工程的生态补偿标准为280.90万元/a, 相比直接由养殖工程造成的生态损害确定的补偿标准, 总量减少比率为11.92%, 单位面积减少比率为11.88%。名优水产围海养殖工程造成99.5619 hm²海洋生态系统的丧失, 以生态损害确定的补偿标准计算, 一次性补偿总额为6378.00万元 (20年), 是只求社会的“单向”补偿。项目结束后, 淤积平衡会形成新的滩涂生态系统, 从而制定基于海域自我恢复能力的补偿标准, 计算一次性补偿总额为5618万元 (20年), 为社会—海洋的“双向”补偿, 这种对于人类影响和海洋自我恢复综合考虑的补偿标准, 很大程度上将会增加围海工程生态补偿的可实施性和可接受性。此外, 项目运营期新围大堤附近新淤积平衡的演进, 及水湖涂一期围海工程淤积平衡周期的叠加影响, 使围区堤外滩涂淤积速度较快, 约13年后, 近岸滩涂恢复面积将达到围垦前的基线水平。

表4 基于恢复能力与影响周期的生态补偿标准

Table 4 Compensation standards based on recovery capacity and impact cycle

生态补偿标准基于条件	总价值/(万元/a)	单位面积价值/(万元/hm ² ·a)	恢复周期/年
基于海洋生态资源与服务损害	318.90	3.20	—
基于滩涂恢复能力与影响周期	280.90	2.82	12.97

3 结论与讨论

(1) 名优水产围海养殖工程造成的生态损害总价值为318.90万元/a, 单位面积损害价值为3.20万元/hm²·a。生态损害主要以生态服务价值为主, 占总量比例为53.54%。一级损害类型中, 资源损害价值最大, 占总量比例为32.92%, 调节服务损害为其次, 占比为

32.56%。二级损害类型中,废弃物处理损害价值最大,为71.77万元,其次为潮间带生物损害,为59.71万元。

(2) 生物资源价值损害中,主要以资源损害为主,占生物资源损害价值比例为70.84%。二级类型中主要以潮间带生物、紫菜养殖和鱼卵、仔鱼损害为主,其中潮间带生物损害价值占生物资源损害价值比例为40.30%;紫菜养殖和鱼卵、仔鱼损害价值相等,占比均为29.16%。

(3) 生态服务损害主要以调节服务价值为主,其次为文化服务。二级损害类型中,废弃物处理价值损害为最大,占生态服务型损害价值比例为42.04%;其次为休闲娱乐价值损害,占比为23.91%;生物多样性与气体调节损害价值也较大,占生态服务型损害价值比例均在11%左右;养分循环和科研文化价值损失较小。

(4) 根据传统基于生态损害价值建立的围填海工程补偿标准,研究项目的生态补偿标准为318.90万元/a,单位面积补偿价值为3.20万元/hm²·a。基于滩涂资源自我恢复能力的生态补偿标准为280.80万元/a,单位面积补偿价值为2.82万元/hm²·a,比之由生态损害价值直接确定的补偿标准,总量减少38万元/a,单位面积减少比例为11.88%。考虑近岸滩涂的恢复周期,滩涂恢复速度为4.6320 hm²/a,约用时13年可恢复到围海前的基线水平。

(5) 一般而言,生态损害价值为生态补偿的最高标准,其包括了各种有形或无形的生态服务价值,而基于恢复能力与影响周期所确定的生态补偿标准,更为全面地考虑到围海工程的整个周期,提高了补偿的可行性。部分学者在建立围填海生态补偿标准时,有时还会考虑不同用海类型的修正系数,如根据顾亦等^[8]研究,取围海养殖修正系数为0.5,透水构筑物为0.3,非透水构筑物为0.8,这将直接导致补偿标准的差异。如何解决不同估算方法确定的生态补偿标准差异问题,这也是目前学界研究的难点之一。未来研究应需进一步探讨如何建立统一、公认的生态补偿标准。

参考文献(References):

- [1] 余建斌. 海洋经济成为我国经济新的增长点. 人民日报, 2007-04-10(001). [YU J B. Marine economy has become a new economic growth point in China. People's Daily, 2007-04-10(001).]
- [2] 隋吉学. 海洋工程生态补偿探究. 北京: 海洋出版社, 2016. [SUI J X. Research on Ecological Eompensation of Marine Engineering. Beijing: China Ocean Press, 2016.]
- [3] 吴姗姗, 刘容子, 齐连明, 等. 渤海海域生态系统服务功能价值评估. 中国人口·资源与环境, 2008, 102(2): 65-69. [WU S S, LIU R Z, QI L M, et al. Value assessment of marine ecosystem service in Bohai sea. China Polulation, Resources and Environment, 2008, 102(2): 65-69.]
- [4] 崔保山, 谢湑, 王青, 等. 大规模围填海对滨海湿地的影响与对策. 中国科学院院刊, 2017, 32(4): 418-425. [CUI B S, XIE T, WANG Q, et al. Impact of large-scale reclamation on coastal wetlands and implications for ecological restoration, compensation, and sustainable exploitation framework. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2017, 32(4): 418-425.]
- [5] 张慧, 孙英兰. 青岛前湾填海造地海洋生态系统服务功能价值损失的估算. 海洋湖沼通报, 2009, 31(3): 34-38. [ZHANG H, SUN Y L. Loss appraisal on the value of marine ecosystem services of sea reclamation for Qianwan. Transactions of Oceanology and Limnology, 2009, 31(3): 34-38.]
- [6] 王衍, 孙士超. 海南洋浦围填海造地的海洋生态系统服务功能价值损失评估. 海洋开发与管理, 2015, 32(7): 74-80. [WANG Y, SUN S C. Evaluation of loss of value of marine ecosystem services in reclaimed land in Yangpu, Hainan province. Ocean Development and Management, 2015, 32(7): 74-80.]
- [7] 郭臣. 胶州湾围填海造陆生态补偿机制研究. 青岛: 中国海洋大学, 2012. [GUO C. Study on ecological compensation

- mechanism of Jiaozhou bay sea reclamation project. Qingdao: Ocean University of China, 2012.]
- [8] 顾奕. 围填海区海洋生态补偿标准研究. 南京: 东南大学, 2015. [GU Y. Study on marine ecological compensation standard in reclamation. Nanjing: Southeast University, 2015.]
- [9] 于淑玲, 崔保山, 闫家国, 等. 围填海区受损滨海湿地生态补偿机制与模式. 湿地科学, 2015, 13(6): 675-681. [YU S L, CUI B S, YAN J G, et al. Ecological compensation mechanisms and models of damaged coastal wetlands in reclamation areas. Wetland Science, 2015, 13(6): 675-681.]
- [10] 于任翔. 日照海州湾围填海工程对水动力及冲淤环境的影响研究. 青岛: 中国海洋大学, 2013. [YU R X. Study of the effect of the reclamation works on marine hydrodynamics and environment erosion and deposition in the Haizhou Bay of Rizhao city. Qingdao: Ocean University of China, 2013.]
- [11] 索安宁, 张明慧, 于永海, 等. 曹妃甸围填海工程的环境影响回顾性评价. 中国环境监测, 2012, 28(2): 105-111. [SUO A N, ZHANG M H, YU Y H, et al. Post project environmental retrospective evaluation of reclamation in Caofeidian. Environmental Monitoring in China, 2012, 28(2): 105-111.]
- [12] 隋玉正, 李淑娟, 张绪良, 等. 围填海造陆引起的海岛周围海域海洋生态系统服务价值损失: 以浙江省洞头县为例. 海洋科学, 2013, 37(9): 90-96. [SUI Y Z, LI S J, ZHANG X L, et al. Appraisal on the value loss of marine ecosystem services about island reclamation: A case study of Dongtou. Marine Sciences, 2013, 37(9): 90-96.]
- [13] 姜忆涓, 李加林, 龚虹波, 等. 围填海影响下海岸带生态服务价值损益评估: 以宁波杭州湾新区为例. 经济地理, 2017, 37(11): 181-190. [JIANG Y M, LI J L, GONG H B, et al. Ecosystem service value assessment of coastal zone caused by reclamation: A case study of Ningbo Hangzhou bay new zone. Economic Geography, 2017, 37(11): 181-190.]
- [14] 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. 海洋环境科学, 2016, 35(1): 13-19. [XU Z H, LI J M, YANG X. Ecological damage assessment of Luoyuan bay reclamation based on habitat equivalency analysis. Marine Environmental Science, 2016, 35(1): 13-19.]
- [15] 苗丽娟, 于永海, 关春江, 等. 机会成本法在海洋生态补偿标准确定中的应用: 以庄河青堆子湾海域为例. 海洋开发与管理, 2014, 31(5): 21-26. [MIAO L J, YU Y H, GUAN C J, et al. Application of opportunity cost method in determination of marine ecological compensation rates: A case study of Qingduizi Bay of Zhuanghe river. Ocean Development and Management, 2014, 31(5): 21-26.]
- [16] 王显金, 钟昌标. 沿海滩涂围垦生态补偿标准构建: 基于能值拓展模型衡量的生态外溢价值. 自然资源学报, 2017, 32(5): 742-754. [WANG X J, ZHONG C B. Construction of ecological compensation standard for tidal flat reclamation: Based on the spillover ecological value measured by expansion emergy synthesis model. Journal of Natural Resources, 2017, 32(5): 742-754.]
- [17] 肖建红, 王敏, 刘娟, 等. 基于生态标签制度的海洋生态产品生态补偿标准区域差异化研究. 自然资源学报, 2016, 31(3): 402-412. [XIAO J H, WANG M, LIU J, et al. Study on the regional difference of eco-compensation standards for the marine ecological products based on marine fisheries' eco-label schemes. Journal of Natural Resources, 2016, 31(3): 402-412.]
- [18] 李京梅, 王颖梅. 围填海造地生态补偿指标体系的建立与应用. 生态经济, 2016, 32(6): 183-188. [LI J M, WANG Y M. The establishment and application of eco-compensation index system for land reclamation. Ecological Economy, 2016, 32(6): 183-188.]
- [19] 李洋, 黄鹄, 佟智成. 钦州保税港区围填海工程生态损失及其补偿价值研究. 钦州学院学报, 2016, 31(1): 17-21. [LI Y, HUANG H, TONG Z C. Study on ecological loss and compensation value of enclave reclamation project in Qinzhou Free Trade Port Area. Journal of Qinzhou University, 2016, 31(1): 17-21.]
- [20] 刘敏, 侯立军, 许世远, 等. 长江河口潮滩表层沉积物对磷酸盐的吸附特征. 地理学报, 2002, 57(4): 397-406. [LIU M, HOU L J, XU S Y, et al. Carbon and nitrogen stable isotopes as tracers to source organic matter in the Yangtze Estuary. Acta Geographica Sinica, 2002, 57(4): 397-406.]
- [21] 石洪华, 郑伟, 丁德文, 等. 典型海洋生态系统服务功能及价值评估: 以桑沟湾为例. 海洋环境科学, 2008, 27(2): 3-6. [SHI H H, ZHENG W, DING D W, et al. Valuation of typical marine ecosystem services: A case study in Sanggou Bay. Marine Environmental Science, 2008, 27(2): 3-6.]
- [22] 史定刚, 关万春, 艾为明, 等. 三门核电站周边海域叶绿素a及初级生产力时空分布. 浙江农业学报, 2014, 26(5): 1303-1308. [SHI D G, GUAN W C, AI W M, et al. Spatial-temporal distribution of chlorophyll-a and primary productiv-

- ity in the surrounding areas of Sanmen bay nuclear power station. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2014, 26(5): 1303-1308.]
- [23] 任杰, 贺宝根. 盐沼水—沉积物—植物界面泥沙输移过程研究进展概述. 科技信息: 科学教研, 2007, (16): 21, 33. [REN J, HE B G. Summary of research progress on sediment transport process in salt marsh water-sediment-plant interface. *Science & Technology Information: Science and Education*, 2007, (16): 21, 33.]
- [24] 王萱, 陈伟琪, 张路平, 等. 同安湾围(填)海生态系统服务损害的货币化预测评估. 生态学报, 2010, 30(21): 5914-5924. [WANG X, CHEN W Q, ZHANG L P, et al. Predictive valuation of ecosystem services losses from sea reclamation planning projects in Tong'an Bay. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(21): 5914-5924.]
- [25] 王静, 徐敏, 张益民, 等. 围填海的滨海湿地生态服务功能价值损失的评估: 以海门市滨海新区围填海为例. 南京师大学报: 自然科学版, 2009, 32(4): 134-138. [WANG J, XU M, ZHANG Y M, et al. Coastal wetland ecological service value loss appraisal of reclamation: Take the coastal wetland reclamation of Haimen for example. *Journal of Nanjing Normal University: Natural Science Edition*, 2009, 32(4): 134-138.]
- [26] 欧维新, 杨桂山, 高建华. 盐城滩涂湿地对N、P营养物质的截留效应研究. 湿地科学, 2006, 4(3): 179-186. [OU W X, YANG G S, GAO J H. Retention effect of wetland for Nitrogen and Phosphorus nutrients in the coastal zone of the Yancheng. *Wetland Science*, 2006, 4(3): 179-186.]
- [27] 李纯厚, 黄洪辉, 林钦, 等. 海水对虾池塘养殖污染物环境负荷量的研究. 农业环境科学学报, 2004, 23(3): 545-550. [LI C H, HUANG H H, LIN Q, et al. Environmental carrying capacity of the pollutants from the prawn seawater culture ponds. *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, 23(3): 545-550.]
- [28] COSTANZA R, DARGE R, DEGROOT R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 387: 253-260.
- [29] 陈仲新, 张新时. 中国生态系统效益的价值. 科学通报, 2000, 45(1): 17-22. [CHEN Z X, ZHANG X S. The value of ecosystem benefits in China. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45(1): 17-22.]
- [30] 李新, 周青松, 俞存根, 等. 浙江三门湾春季鱼类种类组成及多样性研究. 浙江海洋学院学报: 自然科学版, 2014, 33(6): 488-494. [LI X, ZHOU Q S, YU C G, et al. Species composition and diversity of fish in spring in Sanmen Bay. *Journal of Zhejiang Ocean University: Natural Science*, 2014, 33(6): 488-494.]
- [31] 蔡萌. 三门湾鱼类和蟹类数量变化和生态特征的研究. 上海: 上海海洋大学, 2009. [CAI M. Investigation of density and ecological characteristics of fishes and crabs in the Sanmen Bay. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2009.]
- [32] 中国水利学会: 2006年学术年会// 谢亚力, 伍冬领. 三门湾滩涂围垦对海湾水动力及海床影响初步分析. 北京: 中国水利水电出版社, 2006: 146-151 [Chinese Hydraulic Engineering Society: 2006 Academic Annual Conference Papers// XIE Y L, TONG D L. Preliminary Analysis on The Impact of Sanmen Bay Reclamation on The Hydrodynamics and Seabed of The Gulf. Beijing: China Water Power Press, 2006: 146-151.]
- [33] 宁波市第五届学术大会论文集// 施慧雄. 宁波市滩涂资源及其动态变化. 杭州: 浙江大学出版社, 2008: 143-149 [Ningbo fifth academic conference proceedings// SHI H X. Tidal Flat Resources and Its Dynamic Changes in Ningbo. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2008: 143-149.]
- [34] 郑伟, 徐元, 石洪华, 等. 海洋生态补偿理论及技术体系初步构建. 海洋环境科学, 2011, 30(6): 877-880. [ZHENG W, XU Y, SHI H H, et al. Establishment of theory and technical system for marine ecological compensation. *Marine Environment Science*, 2011, 30(6): 877-880.]
- [35] 饶欢欢, 彭本荣, 刘岩, 等. 海洋工程生态损害评估与补偿: 以厦门杏林跨海大桥为例. 生态学报, 2015, 35(16): 5467-5476. [RAO H H, PENG B R, LIU Y, et al. Ecological damage assessment and compensation of marine engineering: A case study of Xinglin sea-crossing bridge, Xiamen. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(16): 5467-5476.]

Study on ecological damage characteristics and compensation standard of aquaculture project based on recovery capacity and impact cycle:

A case study of the famous aquaculture area of Shuihutu in Xiangshan county

FENG Bai-xiang¹, LI Jia-lin^{1,2}, GONG Hong-bo³, HE Gai-li¹, HUANG Ri-peng¹, LI Chang-da⁴

(1. Department of Geography & Spatial Information Techniques, Ningbo University, Ningbo 315211, Zhejiang, China; 2. East China Sea Institute, Ningbo University, Ningbo 315211, Zhejiang, China; 3. Law School, Ningbo University, Ningbo 315211, Zhejiang, China; 4. Research Institute of Marine Ecology and Algae, Dongtou District, Wenzhou City, Wenzhou 325000, Zhejiang, China)

Abstract: Scientific and reasonable marine eco-compensation standard has great significance in optimizing the allocation of marine resources and maintaining the sustainable development of the marine economy. Taking the famous aquaculture reclamation project of Shuihutu in Xiangshan county of Ningbo city as the research object, the paper constructed an index system of ecological services value damage assessment, and methods for assessing the recovery capacity of sea areas and the impact cycle of resources. The damage value and characteristics of various ecological services caused by the aquaculture project were calculated and analyzed. The eco-compensation standard and the recovery cycle of the aquaculture project based on the marine self recovery capability were determined, and the differences in the compensation standards determined directly from the ecological damage value and based on the recovery capacity were compared and analyzed. The results showed that: (1) The total value of the ecological damage caused by the famous aquaculture reclamation project is 3.189 million yuan/a, and the damage value per unit area is 32000 yuan/hm² · a. Ecological damage is mainly based on ecological services, accounting for 53.54% of the total. (2) In the category of biological resource damage, the primary category is dominated by the value of resource damage, which accounts for 32.92% of the total. In the second category, the biological damage value of intertidal biological is the highest, at 597100 yuan, followed by the damage value of seaweed farming, fish eggs and larvae, both of which have the same damage value accounting for 13.55% of the total. The value loss of benthos and swimming organisms is smaller. (3) In the category of ecological service damage, the primary category is mainly adjustment service value, accounting for 32.56% of the total. In the secondary damage category, the damage value of waste disposal is the highest, reaching 717700 yuan, while the value of recreation and entertainment is also large, accounting for 12.80% of the total damage. The other types have less value loss. (4) The eco-compensation standard of the famous aquaculture reclamation project based on the sea self-reclamation capacity is 2.809 million yuan/a, and the compensation value per unit area is 28200 yuan/hm² · a. The average compensation value to be paid in installments is 1.8068 million yuan/a and the compensation amount per unit area is 18100 yuan/hm² · a. (5) Compared with the compensation standard determined by the value of ecological damage, the total amount of eco-compensation standard based on the recovery capacity of sea areas is reduced by 11.92%, and the unit area is reduced by 11.88%. After the completion of the project, the recovery speed of nearshore intertidal zone will be 4.632 hm²/a. After a total of 12.97 years, the tidal flat near the new embankment will be restored to the baseline level which existed before the reclamation starting.

Keywords: coastal reclamation; ecological compensation; recovery capability; influence cycle