

DOI:10.19663/j.issn2095-9869.20181221001

http://www.yykxjz.cn/

赵荣荣, 公丕海, 张艳, 袁伟, 关长涛, 史佰佰, 谢振辉, 李娇. 长岛挡浪岛人工鱼礁区生态系统健康评价. 渔业科学进展, 2019, 40(6): 09-17

Zhao RR, Gong PH, Zhang Y, Yuan W, Guan CT, Shi BB, Xie ZH, Li J. Ecosystem health assessment of artificial reef area in Long Island. Progress in Fishery Sciences, 2019, 40(6): 09-17

长岛挡浪岛人工鱼礁区生态系统健康评价*

赵荣荣^{1,2} 公丕海² 张艳² 袁伟²
关长涛² 史佰佰³ 谢振辉⁴ 李娇^{2①}

(1. 浙江海洋大学 国家海洋设施养殖工程技术研究中心 舟山 316000; 2. 中国水产科学研究院黄海水产研究所 农业农村部海洋渔业可持续发展重点实验室 青岛市海水鱼类种子工程与生物技术重点实验室 青岛 266071; 3. 上海海洋大学海洋科学学院 上海 201306; 4. 西南大学动物科技学院 西南大学渔业资源环境研究中心 重庆 400716)

摘要 本研究从理化环境、生物群落结构和生态系统功能3个层面,运用模糊综合评价法构建了人工鱼礁区生态系统健康评价模型。基于2013~2015年山东长岛挡浪岛人工鱼礁区5个航次调查结果,对挡浪岛人工鱼礁区、辐射区和对照区的生态系统开展健康评价。结果显示,人工鱼礁区及辐射区的生态系统为健康状态,对照区为亚健康状态。三者的生态健康指数为鱼礁区(0.783)>辐射区(0.646)>对照区(0.594)。与未投礁时相比,鱼礁区和辐射区的生态系统均脱离了亚健康状态且逐步提升,但对照区仍处于亚健康状态且发展不稳定。健康评价研究表明,挡浪岛人工鱼礁区生态系统比对照区更稳定,并带动辐射区提高了系统健康水平,表明挡浪岛人工鱼礁建设在生态环境修复和海洋渔业资源养护方面已取得一定效果。

关键词 人工鱼礁; 生态系统健康; 模糊综合评价法; 层次分析法

中图分类号 S953.1 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2019)06-0009-09

生态系统健康的概念由 Rappor(1989)首次提出,其基本内涵是生态系统本身具有自我维持与更新的能力。此概念提出后,迅速得到国内外重视。目前,生态系统健康评价在森林、海草场、河流、城市等不同领域已被广泛应用(Evans, 1993; Malley *et al*, 1992; Munawar *et al*, 1993; Rosenberg *et al*, 1994; Sonstegard *et al*, 1984; Xu, 1996),但对于海洋牧场的生态健康评价仍处于初步探索阶段(唐伟尧等, 2018)。

人工鱼礁作为保护、增殖海洋渔业资源、发展海洋经济的重要手段,在海洋渔业发展中的作用不断凸

显。其作为一种人为的外来投放物,投放到海域后,会通过一系列的理化过程影响海洋的生物和非生物环境(Willia, 2009),对海洋生态系统的影响状况需进行长期调查、监测并作出系统的科学评价。

目前,关于人工鱼礁生态系统健康评价的研究已有报道。陈应华(2009)对大亚湾大辣甲南人工鱼礁生态系统健康进行了评价;杨进(2011)也对大亚湾区域生态系统健康进行了研究;尹增强等(2012)对东海区资源保护型人工鱼礁生态效果评价体系进行了研究;佟飞等(2014)对荣成俚岛人工鱼礁区生态系统健康进

* 中国水产科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费(2016HY-ZD0103)和蓬莱溢油生物资源养护与渔业生态修复项目共同资助 [This work was supported by Special Scientific Research Funds for Central Non-Profit Institutes, Chinese Academy of Fishery Sciences (2016HY-ZD0103), and Bioresources Conservation and Fishery Eco-Restoration for the Penglai Oil Spill]. 赵荣荣, E-mail: 15853287200@163.com

① 通讯作者: 李 娇, 高级工程师, E-mail: lijiao@ysfri.ac.cn

收稿日期: 2018-12-21, 收修改稿日期: 2019-02-25

行了评价。但以上研究对人工鱼礁生态系统健康评价均集中在单个或少量因子(张艳等, 2013)。

本研究基于 2013~2015 年山东挡浪岛鱼礁区、辐射区和对照区海域的生态环境监测数据, 选取 25 个评价指标, 采用模糊综合评价法和层次分析法, 尝试建立人工鱼礁区生态系统健康评价模型, 并对该海域的生态系统健康进行综合评价。本研究有利于对人工鱼礁的生态系统健康做出更加完善的评价。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究示范区位于山东烟台市长岛县西北侧海域(120°38'47"~120°39'21"E, 37°59'17"~37°59'56"N), 距蓬莱渔港北偏西方向约 20 km, 距长岛县渔港西北方向 10 km。研究示范区总面积约为 100 hm², 包括核心建礁区和辐射区。鱼礁区水深为 15~20 m, 水温范围为 3.3℃~27.5℃, 平均水温为 15.4℃。

礁区建设在核心区海域内(约 52 hm²), 建设单位鱼礁群 9 座, 投放 HTSK-CN-3 型大型组合式鱼礁 88 个、HTR-25Si 型金字塔鱼礁 9 个、ZFT-2.0JG 加高型正方体鱼礁 180 个, 石块礁 10400 m³, 共计 21400 空 m³。

1.2 数据来源与预处理

本研究的数据类型主要包括水质、沉积物、渔业生物(地笼和刺网)、底栖生物(抓斗式采泥器)、浮游生物(大型浮游生物网)、浮游植物(小型浮游生物网)。实验设计点位为鱼礁区、辐射区和对照区各设 3 处(图 1), 但由于辐射区(S3)和对照区(C3)在多次调查航次中出现网具丢失现象, 所以对丢失站位未进行数据分析。

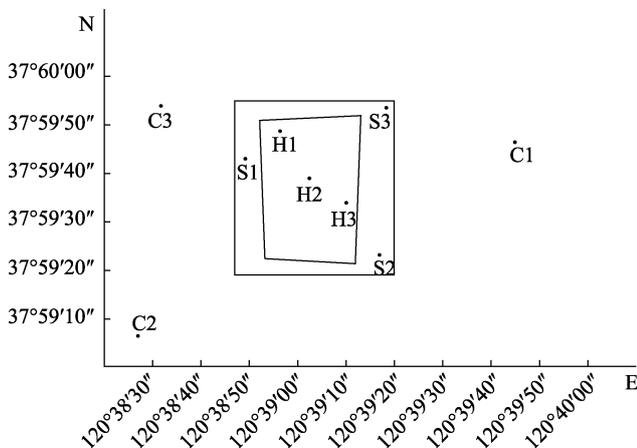


图 1 挡浪岛人工鱼礁区调查站位示意
Fig.1 Schematic diagram of the survey sites of the artificial reef area of Danglang Island

本研究的站点空间布设(图 2)分别为鱼礁区 3 个(H1、H2、H3); 辐射区 2 个(S1、S2); 对照区 2 个(C1、C2)。采样时间为 2013 年 7 月、2014 年 8~11 月、2015 年 4、7 月。实验样品在野外采集后直接现场固定保存, 带回实验室进行定性定量分析。经研究分析, 所有数据均达到本研究质量要求。

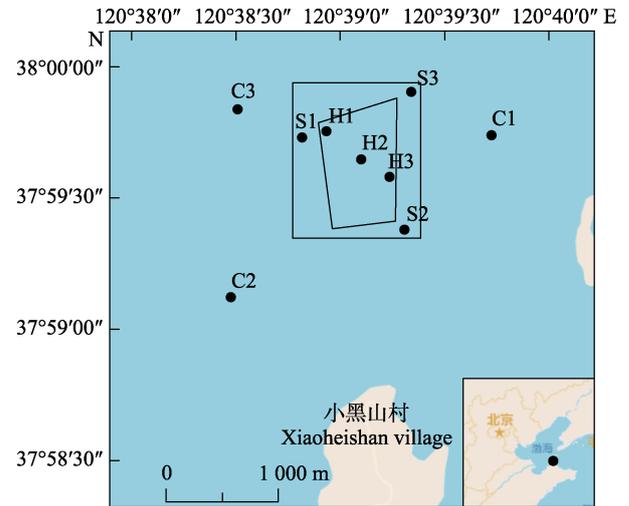


图 2 挡浪岛人工鱼礁区调查站位
Fig.2 The survey sites of artificial reef area in Danglang Island

2 人工鱼礁区生态系统健康综合评价指标体系

2.1 评价指标的选择

将人工鱼礁区的生态系统健康作为本研究核心, 其指标评价框架包括目标层、准则层和指标层(表 1)。将人工鱼礁区的生态系统健康作为目标层; 区域的评价因子作为准则层, 包括理化环境、生物群落结构和生态系统功能; 区域的评价指标作为指标层, 包括水质和沉积物共计 25 项指标。

2.2 权重的确定

本研究对各项评价因子进行权重分析, 通过计算和转化, 使各评价因子之间具有可比较性和可加性。采用层次分析法(AHP)来估算权重, 具体如下: (1)构建层次结构模型。根据本研究建立的指标评价框架由上到下依次建立层次模型; (2)判断矩阵和层次单排序的计算。将构建出的矩阵由相关专家和有实践经验的技术人员根据各指标相对于上层的相对重要性做出判断和检验; (3)层次总排序的计算。计算矩阵中指标的准则层和指标层相对于目标层的相对重要性排序

表 1 挡浪岛人工鱼礁区生态系统健康评价指标及对应权重
Tab.1 Ecosystem health assessment indicators and corresponding weights of artificial reef area in Danglang Island

目标层 Target layer A	准则层 Criterion layer B	指标层 Index layer C	权重 Weight
生态系统健康 Ecosystem health	理化环境 Physical and chemical environment	pH(水质)	0.030
		溶解氧 DO(水质)	0.024
		化学需氧量 COD(水质)	0.019
		水质石油类(水质)	0.019
		无机氮 IN(水质)	0.019
		活性磷酸盐 IP(水质)	0.030
		氮磷比 N:P(水质)	0.040
		悬浮物 SS(水质)	0.019
		硫化物 Sulfide(沉积物)	0.025
		沉积物石油类(沉积物)	0.025
		铜 Cu(沉积物)	0.025
		汞 Hg(沉积物)	0.025
		锌 Zn(沉积物)	0.025
		镉 Cd(沉积物)	0.025
		铅 Pb(沉积物)	0.025
	砷 As(沉积物)	0.025	
	生物群落结构 Biologic community structure	浮游植物密度 Phytoplankton density	0.040
		浮游植物多样性阈值 Phytoplankton diversity threshold	0.060
		浮游动物密度 Zooplankton density	0.040
		浮游动物多样性阈值 Zooplankton diversity threshold	0.060
		底栖动物生物量 Benthic biomass	0.040
		底栖动物多样性阈值 Benthic diversity threshold	0.060
		渔业资源生物量 Fishery resource biomass	0.040
		渔业资源多样性阈值 Fishery resource diversity threshold	0.060
	生态系统功能 Ecosystem function	初级生产力 Primary productivity	0.200

权值, 实际上是层次单排序的加权组合(郭金玉等, 2008; 杨进等, 2011)。由层次分析法计算得出的 25 项指标权重见表 1。

2.3 数据归一化处理

2.3.1 评价标准和依据 本研究对理化环境指标和生物生态指标的评价标准的选择遵循优先考虑国家标准; 无国家标准时, 则参考行业标准或相关研究成果(李利, 2011)。按照上述原则, 在评估理化环境因子时, 主要参考《海水水质标准》(GB3097-1997)和《海洋沉积物质量》(GB18668-2002); 生物群落结构因子主要按照《近岸海洋生态健康评价指南》(HY/T087-2005)、陈清潮等(1994)提出的生物多样性阈值分级标准和李纯厚等(2013)研究的海湾生态系统生物评价为参考标准; 生态系统功能因子采用贾晓平等(2003)提出的初级生产力水平分级标准。具体相关指标及标准见表 2~表 6。

2.3.2 指标标准化 本研究在参考国内外相关资料的基础上, 主要参照尹增强等(2012)提出的将鱼礁生态效果划分为优、良、合格、较差和很差 5 种类型, 并分别赋值为 1.0、0.8、0.6、0.4 和 0.2 的计算方法; 借鉴李娇等(2018)提出的将评价指标划分为正向、逆向和适度指标 3 类的阈值法。挡浪岛人工鱼礁的生态健康体系中, 各生态指标运用以下 3 个类型中的相应隶属函数进行标准化计算。计算公式如下:

(1) 正向指标 即评价指标的数值越高, 对海洋生态系统健康越有利。本研究选取溶解氧(DO)、浮游植物多样性阈值、浮游动物多样性阈值、底栖动物多样性阈值、渔业资源多样性阈值和初级生产力, 这些指标的标准值按公式(1)计算:

$$x = \begin{cases} 0 & x_i < x_{\min} \\ \left(\frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \right)^k & x_{\min} \leq x_i \leq x_{\max} \\ 1 & x_i > x_{\max} \end{cases} \quad (1)$$

(2) 逆向指标 即评价指标的数值越低, 对海洋生态系统健康越有利。本研究选取化学需氧量(COD)、无机氮(IN)、油类、活性磷酸盐(IP)、悬浮物(SS)、硫化物、水质及沉积物中石油类、Cu、Hg、Zn、Cd、Pb、As, 这些指标的标准值按公式(2)计算:

$$x = \begin{cases} 1 & x_i < x_{\min} \\ \left(\frac{x_{\max} - x_i}{x_{\max} - x_{\min}} \right)^k & x_{\min} \leq x_i \leq x_{\max} \\ 0 & x_i > x_{\max} \end{cases} \quad (2)$$

(3) 适度指标 即评价因子的数值过高或过低都不利于海洋生态系统健康。本研究选取 pH、氮磷比(N:P)、浮游植物密度、浮游动物密度、底栖生物生物量和渔业资源生物量, 这些指标的标准值按公式(3)计算:

表2 挡浪岛人工鱼礁区生态系统健康评价标准
Tab.2 Standards for health assessment of artificial reef ecosystem in Danglang Island

指标类别 Indicator category	指标 Indicator	评价标准 Assessment standard
海洋环境因子 Marine environment indicator	海水水质单项指标质量氮磷比	海水水质标准(GB3097-1997)潜在性富营养化分级标准
	海洋沉积物单项指标质量	海洋沉积物质量(GB18668-2002)
	浮游植物密度	近岸海洋生态健康评价指南(HY/T087-2005)
	浮游植物多样性阈值	生物多样性阈值分级标准
	浮游动物密度	近岸海洋生态健康评价指南(HY/T087-2005)
生物群落结构因子 Biology community indicator	浮游动物多样性阈值	生物多样性阈值分级标准
	底栖生物生物量	近岸海洋生态健康评价指南(HY/T087-2005)
	底栖生物多样性阈值	生物多样性阈值分级标准
	渔业资源生物量	近岸海洋生态健康评价指南(HY/T087-2005)
生态系统功能因子 Ecosystem function indicator	渔业资源多样性阈值	生物多样性阈值分级标准
	初级生产力	初级生产力水平分级

表3 海湾生态系统生物评价指标
Tab.3 Evaluation indicator for bay ecosystem organisms

评价项目 Evaluation item	评价等级 Evaluation grade		
	I	II	III
浮游植物密度 Density of phytoplankton ($\times 10^5$ ind/m ³)	1.5~15	0.3~1.5 或 15~20	<0.3 或 >20
浮游动物密度 Density of zooplankton ($\times 10^3$ ind/m ³)	4.5~12.5	3.0~4.5 或 12.5~15.0	<3.3 或 >15.0
底栖生物生物量 Biomass of benthos (g/m ²)	18.75~37.5	12.5~18.75 或 37.5~45.0	<12.5 或 >45.0

表4 潜在性富营养化级数分类
Tab.4 Grade classification of potential eutrophication

级别 Level	营养级 Trophic level	无机氮 IN (mg/L)	活性磷酸盐 IP (mg/L)	氮磷比 N:P
I	贫营养 Poor nutrition	<0.2	<0.03	8~30
II	中度营养 Moderate nutrition	0.2~0.3	0.03~0.04	8~30
III	富营养 Eutrophic	>0.3	0.03~0.04	8~30
IVP	磷限制中度营养 Medium nutrient with phosphorous limiting	0.2~0.3	—	>30
VP	磷中等限制潜在性富营养 Potential eutrophication with medium phosphorous limiting	>0.3	—	30~60
VIP	磷限制潜在性富营养 Potential eutrophication with phosphorous limiting	>0.3	—	>60
IVN	氮限制中度营养 Medium nutrient with nitrogenous limiting	—	0.03~0.04	<8
VN	氮中等限制潜在性富营养 Potential eutrophication with medium nitrogenous limiting	—	>0.045	4~8
VIN	氮限制潜在性富营养 Potential eutrophication with nitrogenous limiting	—	>0.045	<4

表5 生物多样性阈值分级评价标准
Tab.5 Evaluation standards for the threshold of biodiversity

评价项目 Evaluation items	等级标准 Evaluation grade				
	1	2	3	4	5
多样性阈值 Threshold of biodiversity	<0.6	0.6~1.5	1.6~2.5	2.6~3.5	>3.5
等级 Grade	差 Poor	一般 Middle	较好 Preferable	丰富 Plentiful	非常丰富 High

表 6 初级生产力水平分级评价标准
Tab.6 The evolution standards for the lever of primary productivity

项目 Items	评价等级 Assessment grade					
	1	2	3	4	5	6
初级生产力 Primary productivity (mgC/mg·d)	<200	200~300	300~400	400~500	500~600	>600
分级描述 Classification describe	低水平 Low	中低水平 Low-Middle	中等水平 Middle	中高水平 Middle-High	高水平 High	超高水平 Superhigh

$$x = \begin{cases} 0 & x_{\min} \leq x_i \leq a \\ \left(\frac{x_i - x_{\min}}{a - x_{\min}}\right)^k & a \leq x_i \leq b \\ 1 & b \leq x_i \leq x_{\max} \\ \left(\frac{x_{\max} - x_i}{x_{\max} - b}\right)^k & b \leq x_i \leq x_{\max} \\ 0 & x_i > x_{\max} \end{cases} \quad (3)$$

式中, x 为各指标标准值; x_i 为单项指标的实测值; x_{\max} 为单项指标的最大值; x_{\min} 为单项指标的最小值; a 、 b 为指标最佳范围阈值; k 为指数。

本研究中的指标评价采用阈值抛物线型标准化处理方法建立模糊隶属函数求得, 其中, 阈值范围主要参照各自指标的生态健康评价标准, 指数的确定除去 pH、IN 和 IP 的 k 值为 1, 其他指标的 k 值均由其对应的评价值 ≥ 0.6 计算得出(杨进, 2011; 尹增强等, 2012)。

2.4 生态系统健康综合评价模型

根据计算的各项指标的标准化值和权重值, 利用模糊综合评价法(Xu *et al.*, 2004)构建一个评价模型, 对人工鱼礁区、辐射区和对照区的生态系统健康指数(Ecosystem health index, EHI)进行综合评价。

$$EHI = \sum W_i \times H_i \quad (4)$$

式中, EHI 为生态系统综合健康指数; W_i 为第 i 个指标的权重, H_i 为对应第 i 个指标的标准化值。

通过上述方法计算得到的 EHI 分布范围在 0~1 之间, 共 6 个等级(表 7)。

表 7 人工鱼礁生态系统健康水平分级
Tab.7 Grade for health level of artificial reef ecosystem

指数范围 Index range	生态系统健康水平分级 Ecosystem health level
[0~0.2)	病态 Sick
[0.2~0.4)	一般病 Sore
[0.4~0.6)	亚健康 Sub-healthy
[0.6~0.8)	健康 Healthy
[0.8~1.0)	很健康 Healthier
1.0	最健康 Healthiest

3 评价结果

基于 2013~2015 年挡浪岛人工鱼礁区、辐射区和对照区 5 个航次调查数据, 将各指标进行归一化处理, 其中, 2014、2015 年的数据处理结果均取年平均值。计算得到挡浪岛人工鱼礁区的 25 个分健康指标(表 8)。通过构建的生态系统健康评价模型, 计算得到生态系统健康综合指数(图 3)。

3.1 指标层分健康指标

2013~2015 年挡浪岛人工鱼礁区生态系统的分健康指标见表 8。从表 8 可以看出, 人工鱼礁区、辐射区和对照区的理化环境准则层中, 除 SS、N:P 的分健康指标较低外, 其他均达到较高的水平, 且 3 个区之间的差异性较小, 整体上呈现了较为健康的海洋理化环境。

生物群落结构准则层的分健康指标结果显示, 3 年来, 3 个区域的浮游植物密度一直保持在高水平; 浮游植物、浮游动物、底栖动物的多样性阈值基本维持中等状态且逐年增长; 鱼礁区和辐射区的渔业资源生物量和生物多样性阈值均呈增长趋势, 其增长幅度鱼礁区明显大于辐射区, 相反对照区则出现轻微的下降趋势。

生态系统功能准则层中初级生产力的分健康指标结果显示, 2013~2015 年 3 个区域均有所增长, 但总体上处于中等偏下的水平。2013 年辐射区和对照区的健康指数略高于鱼礁区, 到 2015 年鱼礁区则明显超过其他 2 个区。

3.2 生态系统健康综合指数

挡浪岛 2013~2015 年的生态系统健康综合指数见图 3。从图 3 可以看出, 鱼礁区、辐射区的 EHI 随着投礁时间的增长而逐渐增大, 且鱼礁区的增长幅度明显大于辐射区, 对照区则呈先减小后增大的趋势。在 2013 年本底调查时, 3 个区域的 EHI 差别不大, 且对照区高于鱼礁区和辐射区, 到 2014、2015 年, 即投礁后 1~2 年, 健康指数则均呈鱼礁区 > 辐射区 > 对照区。

表8 生态系统健康指标分布
Tab.8 Distribution of ecosystem health index

指标 Index	归一化值 (人工鱼礁区) Normalization value (Artificial reef area)			归一化值 (辐射区) Normalization value (Radiation area)			归一化值 (对照区) Normalization value (Control area)		
	2013	2014	2015	2013	2014	2015	2013	2014	2015
	pH	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
溶解氧 DO	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
化学需氧量 COD	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.158	1.000
水质石油类 Water quality TPHs	0.997	0.999	0.999	0.998	0.997	0.999	0.986	0.989	0.895
无机氮 DIN	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
活性磷酸盐 IP	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.000	1.000
氮磷比 N:P	0.875	0.000	0.907	0.000	0.925	0.000	0.950	0.925	0.000
悬浮物 SS	0.000	0.947	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
硫化物 Sulfide	0.998	0.994	0.992	0.988	0.996	0.990	0.996	0.995	0.960
沉积物石油类 Sediment TPHs	0.970	0.997	0.999	0.980	0.986	1.000	0.960	0.988	0.960
铜 Cu	0.990	0.964	0.974	0.991	0.960	0.880	0.992	0.960	0.920
汞 Hg	0.988	0.980	0.995	0.976	0.980	0.995	0.990	0.961	0.960
锌 Zn	0.976	0.983	0.991	0.960	0.987	0.992	0.991	0.960	0.960
镉 Cd	0.997	0.984	0.960	0.986	0.960	0.984	0.996	0.996	0.881
铅 Pb	0.996	0.982	0.982	0.995	0.983	0.992	0.997	0.988	0.960
砷 As	0.895	0.967	0.989	0.883	0.960	0.881	0.921	0.960	0.960
浮游植物密度 Phytoplankton density	0.976	0.979	0.989	0.976	0.974	0.750	0.992	0.989	0.986
浮游植物多样性阈值 Phytoplankton diversity threshold	0.333	0.466	0.552	0.334	0.411	0.413	0.350	0.351	0.383
浮游动物密度 Zooplankton density	0.000	0.025	0.993	0.000	0.250	0.998	0.000	0.250	0.988
浮游动物多样性阈值 Zooplankton diversity threshold	0.000	0.184	0.333	0.000	0.000	0.406	0.000	0.167	0.333
底栖动物生物量 Benthic biomass	0.000	0.896	0.968	0.000	0.250	0.512	0.000	0.254	0.899
底栖动物多样性阈值 Benthic diversity threshold	0.300	0.467	0.467	0.516	0.333	0.483	0.533	0.267	0.266
渔业资源生物量 Fishery resource biomass	0.675	0.725	0.825	0.675	0.523	0.552	0.775	0.751	0.652
渔业资源多样性阈值 Fishery resource diversity threshold	0.483	0.666	0.833	0.467	0.552	0.667	0.521	0.450	0.353
初级生产力 Primary productivity	0.200	0.412	0.635	0.205	0.332	0.442	0.205	0.275	0.223

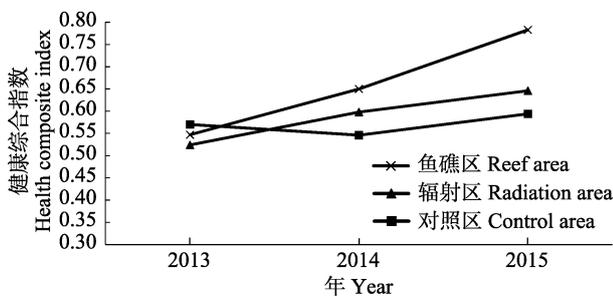


图3 挡浪岛人工鱼礁区生态系统健康综合指数

Fig.3 Ecosystem health composite index of artificial reef ecosystem in Danglang Island

4 讨论

4.1 生态系统健康综合评价指标的优化

本研究建立的挡浪岛人工鱼礁区健康评价指标体系,建立了3个准则层和25项评价指标,以使构建的评价系统更加全面,对人工鱼礁在资源环境修复和生态健康方面进行科学的分析与评价。

与尹增强等(2012)建立的指标体系相比增加了海洋沉积物指标。由于“蓬莱 19-3 油田溢油污染”对山

东长岛在内的大部分渤海海域的生态环境造成了一定影响(郭楠等, 2015; 胡建平, 2016), 长岛海域的 SS 增多、N:P 水平波动较大, 因此, 把水质和沉积物中的石油类含量及其他沉积物指标作为一项评价标准是十分必要的。本海域调查结果显示, 沉积物的重金属指标监测中并无超标现象, 水质和沉积物中的石油类和硫化物均符合国家标准, 这也为整个生态环境提供了一定的恢复条件。

与李娇等(2018)建立的指标体系相比增加了初级生产力指标。海洋初级生产力是海洋生物生产的基础, 支撑着海洋生态系统的物质循环和能量流动, 决定着海洋渔业资源的生物容量, 即渔业资源量(虞聪达等, 2009)。鱼礁区海域的叶绿素和脱镁叶绿素在 2013~2015 年夏季呈逐年递增的变化趋势, 可见人工鱼礁的建设对海域初级生产力具有一定的促进作用, 这也将为海区的渔业资源增长做准备。

与佟飞等(2014)建立的指标体系相比, 增加了地笼和刺网的渔业资源指标。根据地笼和刺网的渔业资源调查结果发现, 在指标体系中建立了渔业资源的生物量和多样性阈值这 2 项指标, 对研究本海域的资源变化和评价鱼礁区的增养殖效果具有重要意义。通过 1 次本底调查和 4 次跟踪调查发现, 投礁后挡浪岛人工鱼礁区和邻近海域游泳生物、底栖动物、浮游生物的种类数量有了一定的增加, 如鱼类由 2013 年的 6 种增加到 2014 年的 11 种和 2015 年的 15 种, 属于过路性鱼类和恋礁性鱼类, 特别是恋礁性鱼类大泷六线鱼(*Hexagrammos otakii*)和许氏平鲉(*Sebastes schlegelii*)。调查还发现, 浮游生物和底栖生物的丰度和生物量也有明显的增加, 常见种增多, 稀有种也有出现, 在一定程度上说明浮游动物群落和底栖动物群落趋于稳定。张虎等(2005)对海州湾人工鱼礁养护效果研究表明, 人工鱼礁对渔业资源增长具有积极意义, 这与本研究结果一致。

4.2 人工鱼礁区的生态系统健康效果

根据挡浪岛建礁后的 EHI 显示, 2014 年鱼礁区(0.650)>对照区(0.598)、2015 年鱼礁区(0.783)>对照区(0.594)。与其他学者的相关研究结果比较, 佟飞等(2014)研究表明, 荣成俚岛建礁后 EHI 为鱼礁区(0.647)>对照区(0.641); 李娇等(2018)研究表明, 北戴河建礁后的 EHI 2014 年为鱼礁区(0.787)>对照区(0.807)、2015 年为鱼礁区(0.838)>对照区(0.671), 其研究结果相一致, 即建礁后的 EHI 鱼礁区>对照区, 且鱼礁区的 EHI 逐年上升。由于生态系统本身具有复杂性及各指标之间的权重赋值差异会引起一定的综

合评价差异, 但变化趋势基本一致, 均为鱼礁区的健康指数状况变好。表明鱼礁建设对于生态系统健康具有一定的积极作用。

本研究中除设置鱼礁区和对照区外, 还增设了辐射区, 辐射区设于鱼礁区外围 800 m 范围内(杨齐等, 2005), 可以对人工鱼礁生态效应进行更客观、更全面的评价。根据调查结果显示, 建礁后辐射区效果逐渐好于对照区, 并在 2015 年摆脱亚健康状态达到了健康状态。说明鱼礁区的建设的确对外围海域具有辐射性, 且在一定程度上带动了生态环境的改善和渔业资源的丰富, 使其生态系统更加健康。

5 结论

本研究综合考虑挡浪岛人工鱼礁区的生态状况, 选择理化环境、生物群落与生态系统结构中的 25 个指标, 构建了生态系统健康评价模型, 对人工鱼礁区及周围海域生态系统健康状况进行对比分析。结果显示, 建礁前, 人工鱼礁区、辐射区和对照区都属于亚健康状态, EHI 为对照区>鱼礁区>对照区。但建礁完成 2 年后, 鱼礁区带动辐射区由亚健康状态转变为健康状态, EHI 均呈现逐年上升趋势且增幅较大。而对照区 3 年一直未摆脱亚健康状态, 虽 2015 年的 EHI 明显高于前 2 年, 但总体状态并不稳定, 2014 年呈现负增长, 险些成为病态环境。对照区的 EHI 明显低于鱼礁区和辐射区, 说明人工鱼礁的建设正在逐步发挥作用, 人工鱼礁的建设利于溢油污染海域生态逐步恢复。为促进人工礁区生态系统健康稳定发展, 应开展增殖放流和移(种)植大型藻类等措施, 促进海洋生物增殖, 即可较快实现保护和修复区域性海洋生态环境的目的, 营造出“海底森林”的效果, 扩增海洋碳汇功能, 将产生良好的海洋生态效益。人工鱼礁区作为动态发展的生态系统, 环境、生物变化受到周围大尺度环境和人为调控的影响, 因此, 对人工鱼礁的综合调查和评价应是一个长期的过程, 应持续调查监测和进一步完善优化评价体系, 从而得到更加科学和综合的海洋牧场评价。

参 考 文 献

- Chen QC, Huang LM, Yin JQ. Research on marine biodiversity of Nansha Islands and its adjacent sea areas I. Beijing: Ocean Press, 1994, 42-50 [陈清潮, 黄良民, 尹建强. 南沙群岛及其邻近海区海洋生物多样性研究 I. 北京: 海洋出版社, 1994, 42-50]
- Chen YH. Analysis of ecological effects of southern Dalajia

- Island artificial reef area in Daya Bay. Doctoral Dissertation of Jinan University, 2009 [陈应华. 大亚湾大棘甲南人工鱼礁区的生态效应分析. 暨南大学博士研究生学位论文, 2009]
- Evans MS. Toxic contaminants and Great Lakes ecosystem health: Current understandings and strategies for improved assessments. *Journal of Aquatic Ecosystem Health*, 1993, 2(2): 87–93
- Guo JY, Zhang ZB, Sun QY. Study and applications of analytic hierarchy process. *China Safety Science Journal*, 2008, 18(5): 148–153 [郭金玉, 张忠彬, 孙庆云. 层次分析法的研究与应用. *中国安全科学学报*, 2008, 18(5): 148–153]
- Guo N, Luo J, Bo RL. Bioaccumulation and analysis of petroleum hydrocarbons in aquatic products of Liaoning Province. *Hebei Fishery*, 2015(5): 13–25 [郭楠, 罗靳, 薄尔琳. 石油烃在辽宁省水产品中的生物富集与分析. *河北渔业*, 2015(5): 13–25]
- Hu JP, Zhang HP, Tian Y. Technical report on construction of Penglai oil compensation ecological restoration marine pasture project in Hebei Province. *Hebei Fishery*, 2016(4): 26–27 [胡建平, 张海鹏, 田洋. 河北省蓬莱溢油补偿生态修复海洋牧场项目建设技术报告. *河北渔业*, 2016(4): 26–27]
- Jia XP, Du FY, Lin Q, *et al.* Discussion on comprehensive evaluation method of ecological environment quality status of marine fisheries. *Journal of Fishery Science of China*, 2003, 10(2): 160–164 [贾晓平, 杜飞雁, 林钦, 等. 海洋渔场生态环境质量状况综合评价方法探讨. *中国水产科学*, 2003, 10(2): 160–164]
- Li CH, Lin L, Xu SN, *et al.* Establishment of integrated methodology for bay ecosystem health assessment and its application in Daya Bay. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(6): 1798–1810 [李纯厚, 林琳, 徐姗姗, 等. 海湾生态系统健康评价方法构建及在大亚湾的应用. *生态学报*, 2013, 33(6): 1798–1810]
- Li J, Zhang Y, Yuan W, *et al.* Research on artificial reef ecosystem health based on fuzzy comprehensive evaluation method. *Progress in Fishery Sciences*, 2018, 39(5): 10–19 [李娇, 张艳, 袁伟, 等. 基于模糊综合评价法的人工鱼礁生态系统健康研究. *渔业科学进展*, 2018, 39(5): 10–19]
- Li L. Health assessment of the ecosystem of Lianzhou Bay. Master's Thesis of Ocean University of China, 2011 [李利. 廉州湾海域生态系统健康评价. *中国海洋大学硕士研究生学位论文*, 2011]
- Liu SX, Sun QB, Chen XM, *et al.* Seasonal distribution characteristics of chlorophyll-*a* concentration in the coastal waters of the North Yellow Sea. *Marine Environmental Science*, 2011, 30(4): 528–532 [刘述锡, 孙钦帮, 陈素梅, 等. 北黄海近岸海域叶绿素 *a* 浓度季节分布特征. *海洋环境科学*, 2011, 30(4): 528–532]
- Malley DF, Mills KH. Whole-lake experimentation as a tool to assess ecosystem health, response to stress and recovery: The experimental lakes area experience. *Journal of Aquatic Ecosystem Health*, 1992, 1(3): 159–174
- Munawar M, Munawar IF, McCarthy L, *et al.* Assessing the impact of sewage effluent on the ecosystem health of the Toronto Waterfront (Ashbridges Bay), Lake Ontario. *Journal of Aquatic Ecosystem Health*, 1993, 2(4): 287–315
- Rapport DJ. What constitutes ecosystem health? Perspectives in Biology and Medicine, 1989, 33(1): 120–132
- Rosenberg DM, Resh VH. Fresh water biomonitoring and benthic macroinvertebrates. *Quarterly Review of Biology*, 1994, 69(2): 286–287
- Sonstegard RA, Leatherland JF. Great lakes coho salmon as an indicator organism for ecosystem health. *Marine Environmental Research*, 1984, 14(1–4): 480
- Tang WY, Tang YL, Sheng HX, *et al.* Ecosystem health assessment of Weihai Xigang artificial reef area. *Periodical of Ocean University of China (Natural Science)*, 2018, 48(3): 55–64 [唐伟尧, 唐衍力, 盛化香, 等. 威海西港人工鱼礁区生态系统健康评价. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2018, 48(3): 55–64]
- Tong F, Zhang XM, Wu ZX, *et al.* The ecosystem health assessment of artificial reef areas in Lidao Island, Rongcheng. *Periodical of Ocean University of China(Natural Science)*, 2014, 44(4): 29–36 [佟飞, 张秀梅, 吴忠鑫, 等. 荣成俚岛人工鱼礁区生态系统健康的评价. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2014, 44(4): 29–36]
- Willia SJ. Artificial reef evaluation with application to natural marine habitats. New York: CRC Press, 2009
- Xu FL. Ecosystem health assessment of Lake Chao, a shallow eutrophic Chinese lake. *Lakes and Reservoirs Research and Management*, 1996, 2(1–2): 101–109
- Xu FL, Lam KC, Zhao ZY, *et al.* Marine coastal ecosystem health assessment: A case study of the Tolo Harbour, HongKong, China. *Ecological Modelling*, 2004, 173(4): 355–370
- Yang J, Li CH, Jia XP, *et al.* Ecosystem health assessment of artificial reef area in Yangmeikeng, Daya Bay. *Ecological Science*, 2011, 30(4): 399–405 [杨进, 李纯厚, 贾晓平, 等. 大亚湾杨梅坑人工鱼礁区生态系统健康评价. *生态科学*, 2011, 30(4): 399–405]
- Yang J. Research on regional ecosystem health assessment in Daya Bay. Master's Thesis of Shanghai Ocean University, 2011 [杨进. 大亚湾区域生态系统健康评价研究. *上海海洋大学硕士研究生学位论文*, 2011]
- Yang L, Liu TY, Huang RK. Theory and practice of artificial reefs in China. Guangzhou: Guangdong Science Technology Press, 2005 [杨齐, 刘同渝, 黄汝堪. *中国人工鱼礁的理论与实践*. 广州: 广东科技出版社, 2005]
- Yin ZQ, Zhang SY. The ecological effect evaluation system of protective artificial reef in East China Sea. *Marine Fisheries*, 2012, 34(1): 23–31 [尹增强, 章守宇. 东海区资源保护型人工鱼礁生态效果评价体系的初步研究. *海洋渔业*, 2012, 34(1): 23–31]
- Yu CD, Yu CG. Research on the utilization of offshore fishery

- resources and management of marine fishing operations in Southern Zhejiang. Beijing: Ocean Press, 2009, 14 [虞聪达, 俞存根. 浙江南部外海渔业资源利用与海洋捕捞作业管理研究. 北京: 海洋出版社, 2009, 14]
- Zhang H, Zhu KW, Tang JH. The effect of fishery resource enhancement in the artificial reef area in the Haizhou Gulf. *Marine Fisheries*, 2005, 27(1): 38–43 [张虎, 朱孔文, 汤建华. 海州湾人工鱼礁养护资源效果初探. *海洋渔业*, 2005, 27(1): 38–43]
- Zhang Y, Chen JF, Guo F, *et al.* Variation of seawater quality at the artificial reef area in Laizhou Bay. *Progress in Fishery Sciences*, 2013, 34(5): 1–7 [张艳, 陈聚法, 过锋, 等. 莱州人工鱼礁海域水质状况的变化特征. *渔业科学进展*, 2013, 34(5): 1–7]

(编辑 陈 严)

Ecosystem Health Assessment of Artificial Reef Area in Long Island

ZHAO Rongrong^{1,2}, GONG Pihai², ZHANG Yan², YUAN Wei²,
GUAN Changtao², SHI Baibai³, XIE Zhenhui⁴, LI Jiao^{2①}

(1. College of National Marine Facilities Culture Engineering Technology Research Center, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316000; 2. Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Key Laboratory of Sustainable Development of Marine Fisheries, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Qingdao Key Laboratory for Marine Fish Breeding and Biotechnology, Qingdao 266071; 3. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306; 4. School of Animal Science and Technology, Research Center of Fishery Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716)

Abstract In this study, we used a fuzzy synthetic evaluation to build an ecosystem-health assessment model according to offshore sea ecosystem characteristics and artificial reef construction functions from three aspects: Physicochemical environment, biological community structure and ecosystem function. To eliminate the dimension effect of sub-indexes, normalization process was used. An analytic hierarchy process was used to assign a threshold or the ecological indicator. The synthetic health index was used to assess the health status of the artificial reef areas, radiation areas and contrast areas. Sub-indexes of artificial reef ecosystem health assessments included physical, chemical, and biological factors. Assessment standards were based on seawater quality, standard marine sediment quality, and guidance for the assessment of coastal marine ecosystem health. We conducted a series of ecosystem health assessments of artificial reefs, and radiation and control areas of Danglang Island based on the survey results of 5 voyages in 2013~2015. The results showed that the ecosystem of artificial reef areas was in a healthy state, whereas the control area was in a sub-healthy state. From the highest to the lowest, the ecological health index was: The three reef area (0.783)>radiation areas (0.646)>control area (0.594). Compared with non-reefing, the ecosystems of the reef and radiant areas were all separated from the sub-healthy state and gradually improved, however, the control area was still in a sub-healthy state and its development was unstable. Therefore, the conclusion was that the ecosystem of the artificial reef areas of Danglang Island were more stable than the control areas, and ecosystem health of radiation areas, was gotten better, due to effect of reefs. The study of reef ecosystem health and scientifically assessing artificial reef ecological effects is important for the construction of reef projects, environment protection, stock enhancement, efficient administration, and sustainable development of fisheries.

Key words Artificial reef; Ecosystem health; Fuzzy synthetic evaluation; Analytic hierarchy process

① Corresponding author: LI Jiao, E-mail:lijiao@ysfri.ac.cn