

DOI: 10.19663/j.issn2095-9869.20171029003

http://www.yykxjz.cn/

李娇, 张艳, 袁伟, 公丕海, 关长涛. 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 J, Zhang Y, Yuan W, Gong PH, Guan CT. Research on artificial reef ecosystem health assessment based on fuzzy synthetic evaluation. Progress in Fishery Sciences, 2018, 39(5): 10-19

基于模糊综合评价法的人工鱼礁 生态系统健康研究*

李 娇 张 艳 袁 伟 公丕海 关长涛^①

(农业农村部海洋渔业可持续发展重点实验室 碳汇渔业实验室
中国水产科学研究院黄海水产研究所 青岛 266071)

摘要 本研究采用模糊综合评价法构建人工鱼礁生态系统健康评价模型,采用层次分析法对各项生态指标的权重进行赋值,并利用综合健康指数模型对北戴河人工鱼礁区和对照海区生态系统健康状况进行评价。根据 2013 年 7 月本底调查和 2014 年 6 月与 2015 年 5 月的跟踪调查数据,分析结果显示,人工鱼礁区和对照区的生态系统都处于健康状态,对照区在 2013 年 7 月和 2014 年 6 月的调查中健康指数均高于鱼礁区,2015 年 5 月调查时,对照区生态健康指数出现下滑,但人工鱼礁区生态系统健康呈现逐步提升的状态,综合健康指数为 0.838,属很健康状态。根据评价结果,北戴河人工鱼礁建设取得良好生态效果,生态系统处于逐步稳定健康发展的状态。本研究采用生态系统健康指数,科学评价人工鱼礁生态效应,对人工鱼礁工程建设、环境资源保护、高效管理和可持续利用具有重要意义。

关键词 人工鱼礁; 生态系统健康; 模糊综合评价; 层次分析法

中图分类号 S953.1 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2018)05-0010-10

人工鱼礁生态系统是一个受到人为调控的生态系统,鱼礁投放引起的光、音、声、水体流态等物理环境变化,为海洋生物繁殖、生长和栖息提供了有利条件,这些非生物环境和礁区生物群落之间相互影响和制约形成了鱼礁生态系统。鱼礁生态系统是一个开放式系统,和周围海区时刻进行着物质和能量的交换,礁区环境理化因子和生物因子在内力和外力共同作用下不断变化。生态系统健康是其发挥服务功能和可持续发展的前提,Rapport 等(1998)提出,生态系统

健康是指其具有稳定性和持续性。Costanza 等(1998)认为,健康生态系统受到胁迫后能在一定时间恢复,维持其组织结构和功能的平衡。生态系统健康概念的提出时间虽然很短,却得到不同领域学者的重视,广泛应用在森林、草原、海洋、湖泊等陆地和水生态系统中(Munawar *et al*, 1993; Evans, 1993; Rosenberg *et al*, 1994; Sonstegard *et al*, 1984; Xu, 1996; Malley *et al*, 1992)。因此,为提高人工鱼礁建设、开发和管理工作的科学性和可持续性,在礁区投入建设后,应定期

* 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)资助[This work was supported by Special Scientific Research Funds for Central Non-Profit Institutes, Chinese Academy of Fishery Sciences (2016HY-ZD0103)].

李 娇, E-mail: lijiao@ysfri.ac.cn

① 通讯作者: 关长涛, 研究员, E-mail: guanct@ysfri.ac.cn

收稿日期: 2017-10-29, 收修改稿日期: 2017-11-29

对人工鱼礁区生态系统健康状况进行评价。目前,国内外学者对人工鱼礁生态效应的研究多集中在单个或少量特征指标的分析上(张艳等, 2013; 王欣等, 2014), 对人工鱼礁生态效应及健康水平的综合评价研究较少, 仅有尹增强等(2012)对东海区资源保护型鱼礁生态效果进行初步评价, 佟飞等(2014)利用生态系统健康指标对俚岛人工鱼礁生态系统开展评价分析, 陈应华(2009)对大亚湾大辣甲南人工鱼礁区进行了生态系统健康状况的研究。本研究将生态系统健康指数用于人工鱼礁建设效果评价, 为人工鱼礁生态系统的可持续发展提供科学指导。

1 生态系统健康综合评价模型的建立

1.1 评价指标

评价指标是构建生态系统健康模型的基础因子, 合理选择评价指标是提高生态系统健康评价质量的关键。评价指标应满足独立性、完备性、针对性和可

操作性原则。根据国内外对海洋生态系统健康的相关研究, 结合人工鱼礁生态系统的结构特征, 选择 pH 值、无机氮, 活性磷酸盐、化学需氧量、溶解氧、悬浮物、氮磷比、沉积物硫化物、沉积物石油类、沉积物中金属(Cu、Hg、Zn、Cd、Pb、As)、底栖生物多样性阈值、底栖生物生物量、浮游植物多样性阈值、浮游植物生物量、浮游动物多样性阈值、浮游动物生物量和渔业资源多样性阈值, 共 22 个评价指标。

1.2 评价标准和依据

人工鱼礁生态系统水质环境指标评价按照海水水质标准(GB3097-1997), 沉积物环境指标评价按照海洋沉积物质量(GB18668-2002), 生物因子评价指标按照近岸海洋生态健康评价指南(HY/T087-2005)(表 1), 对以上 3 个标准中没有包含的指标, 参考国内外相关研究成果, 氮磷比指标参照潜在性富营养化级数分类标准(表 2), 生物多样性阈值参照陈清潮等(1994)提出的分级标准(表 3)。

表 1 海湾生态系统生物评价指标
Tab.1 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 2 潜在性富营养化级数分类
Tab.2 Grade classification of potential eutrophication

氮磷比 N/P	无机氮 DIN (mg/L)	活性磷酸盐 IP (mg/L)	营养状况 Nutrient salt level	营养级 Grade
8~30	<0.2	<0.03	贫营养 Poor nutrient	I
8~30	0.2~0.3	0.03~0.045	中度营养 Medium nutrient	II
8~30	>0.3	>0.045	富营养 Rich nutrient	III
>30	0.2~0.3	-	磷限制中度营养 Medium nutrient with phosphorous limiting	IV _P
30~60	>0.3	-	磷中等限制潜在性富营养 Potential eutrophication with medium phosphorous limiting	V _P
>60	>0.3	-	磷限制潜在性富营养 Potential eutrophication with phosphorous limiting	VI _P
<8	-	0.03~0.045	氮限制中度营养 Medium nutrient with nitrogenous limiting	IV _N
4~8	-	>0.045	氮中等限制潜在性富营养 Potential eutrophication with medium nitrogenous limiting	V _N
<4	-	>0.045	氮限制潜在性富营养 Potential eutrophication with nitrogenous limiting	VI _N

表 3 生物多样性阈值分级评价标准
Tab.3 Evaluation standard for the threshold of biodiversity

评价项目 Evaluation item	评价等级 Evaluation grade				
	I	II	III	IV	V
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

1.3 指标标准化

人工鱼礁生态系统健康评价包含多个指标, 由于没有统一的度量标准, 各指标之间没有规范比较方法, 为实现指标间的可操作运算, 需对评价指标进行标准化处理。根据人工鱼礁生态系统评价指标相关分类和标准, 采用阈值法对指标进行归一化处理, 评价指标分为逆向指标、正向指标和适度指标, 3 个类型指标的计算公式如下:

逆向指标:

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

正向指标:

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

适度指标:

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

式中, x_i 表示单项指标的实测值; x_{max} 表示单项指标的最大值; x_{min} 表示单项指标的最小值; a 、 b 表示指标最佳范围阈值; k 是指数。

根据所选人工鱼礁生态系统各评价指标的性质, 按照公式 1、2、3 对其进行分类和标准化计算, 参考对海湾生态系统健康水平分级评价标准(表 4)(李纯厚等, 2013), 指标隶属度函数采用抛物线形分布, 其中, pH 值、无机氮和活性磷酸盐隶属度函数 k 值为 1, 其他指标隶属度函数的 k 值由其对应的分指数 ≥ 0.6 计算。

1.4 指标权重赋值

各指标在生态系统中的重要性存在差异, 因此需要确定所有评价指标在生态效应中的权重, 才能对生

表 4 人工鱼礁生态系统健康水平分级
Tab.4 Grade for health level of artificial reef ecosystem

项目 Item	健康指数分布 Distribution of health index					
	[0~0.2)	[0.2~0.4)	[0.4~0.6)	[0.6~0.8)	[0.8~1.0)	1.0
评价等级 Evaluation level	病态 Sick	一般病态 Sore	亚健康 Sub-healthy	健康 Healthy	很健康 Healthier	最健康 Healthiest

表 5 评价指标归一化函数与标准
Tab.5 Normalization function and standard of indicator

指标分类 Index category	指标 Index	隶属度函数 Fuzzy membership function	评价标准 Evaluation standard
水质环境 Water quality	pH	$EHI_{pH} = \begin{cases} 1 & 7.8 \leq pH \leq 8.5 \\ 0 & pH < 7.8, pH > 8.5 \end{cases}$	海水水质标准(GB3097-1997)
	无机氮 DIN	$EHI_{DIN} = \begin{cases} 1 & 0.2 \leq DIN \leq 0.3 \\ \left(\frac{0.3 - EHI_{DIN}}{0.3 - 0.2}\right) & 0.3 < DIN \\ 0 & IP < 0.03 \end{cases}$	海水水质标准(GB3097-1997)
	活性磷酸盐 IP	$EHI_{IP} = \begin{cases} 1 & 0.03 \leq IP \leq 0.045 \\ \left(\frac{0.045 - EHI_{IP}}{0.045 - 0.03}\right) & 0.045 < IP \\ 0 & COD < 2 \end{cases}$	海水水质标准(GB3097-1997)
	化学需氧量 COD	$EHI_{COD} = \begin{cases} 1 & 2 \leq COD \leq 3 \\ \left(\frac{3 - EHI_{COD}}{3 - 2}\right)^{0.11} & 3 < COD \\ 0 & \end{cases}$	海水水质标准(GB3097-1997)

续表 5

指标分类 Index category	指标 Index	隶属度函数 Fuzzy membership function	评价标准 Evaluation standard
水质环境 Water quality	悬浮物 SS	$EHI_{SS} = \begin{cases} 1 & SS < 0 \\ \left(\frac{10 - EHI_{SS}}{10 - 0}\right)^{0.073} & 0 \leq SS \leq 10 \\ 0 & 10 < SS \end{cases}$	海水水质标准(GB3097-1997)
		$EHI_{DO} = \begin{cases} 0 & DO < 5 \\ \left(\frac{EHI_{DO} - 5}{6 - 5}\right)^{0.11} & 5 \leq DO \leq 6 \\ 1 & 6 < DO \end{cases}$	海水水质标准(GB3097-1997)
	氮磷比 N/P	$EHI_{N/P} = \begin{cases} 0 & N/P < 8 \\ \left(\frac{EHI_{N/P} - 8}{16 - 8}\right)^{0.077} & 8 \leq N/P < 16 \\ \left(\frac{30 - EHI_{N/P}}{30 - 16}\right)^{0.071} & 16 \leq N/P \leq 30 \\ 0 & N/P > 30 \end{cases}$	潜在性富营养化分级标准(表 2)
沉积环境 Sediment quality	硫化物 Sulfide	$EHI_S = \begin{cases} 1 & S < 0 \\ \left(\frac{300 - EHI_S}{300 - 0}\right)^{0.049} & 0 \leq S \leq 300 \\ 0 & 300 < S \end{cases}$	海洋沉积物质量(GB18668-2002)
	石油类 TPHs	$EHI_{pet} = \begin{cases} 1 & pet < 0 \\ \left(\frac{500 - EHI_{pet}}{500 - 0}\right)^{0.047} & 0 \leq pet \leq 500 \\ 0 & 500 < pet \end{cases}$	海洋沉积物质量(GB18668-2002)
	铜 Cu	$EHI_{Cu} = \begin{cases} 1 & Cu < 0 \\ \left(\frac{35 - EHI_{Cu}}{35 - 0}\right)^{0.062} & 0 \leq Cu \leq 35 \\ 0 & 35 < Cu \end{cases}$	海洋沉积物质量(GB18668-2002)
	汞 Hg	$EHI_{Hg} = \begin{cases} 1 & Hg < 0 \\ \left(\frac{0.2 - EHI_{Hg}}{0.2 - 0}\right)^{0.096} & 0 \leq Hg \leq 0.2 \\ 0 & 0.2 < Hg \end{cases}$	海洋沉积物质量(GB18668-2002)
	锌 Zn	$EHI_{Zn} = \begin{cases} 1 & Zn < 0 \\ \left(\frac{150 - EHI_{Zn}}{150 - 0}\right)^{0.053} & 0 \leq Zn \leq 150 \\ 0 & 150 < Zn \end{cases}$	海洋沉积物质量(GB18668-2002)
	镉 Cd	$EHI_{Cd} = \begin{cases} 1 & Cd < 0 \\ \left(\frac{0.5 - EHI_{Cd}}{0.5 - 0}\right)^{0.082} & 0 \leq Cd \leq 0.5 \\ 0 & 0.5 < Cd \end{cases}$	海洋沉积物质量(GB18668-2002)

续表 5

指标分类 Index category	指标 Index	隶属度函数 Fuzzy membership function	评价标准 Evaluation standard
沉积环境 Sediment quality	砷 As	$EHI_{As} = \begin{cases} 1 & As < 0 \\ \left(\frac{20 - EHI_{As}}{20 - 0}\right)^{0.067} & 0 \leq As \leq 20 \\ 0 & 20 < As \end{cases}$	海洋沉积物质量(GB18668-2002)
	铅 Pb	$EHI_{Pb} = \begin{cases} 1 & Pb < 0 \\ \left(\frac{60 - EHI_{Pb}}{60 - 0}\right)^{0.058} & 0 \leq Pb \leq 60 \\ 0 & 60 < Pb \end{cases}$	海洋沉积物质量(GB18668-2002)
浮游植物 Phytoplankton	密度($\times 10^5$) Density	$EHI_{phy} = \begin{cases} 0 & phy < 0.3 \\ \left(\frac{EHI_{phy} - 0.3}{1.5 - 0.3}\right)^{0.043} & 0.3 \leq phy < 1.5 \\ 1 & 1.5 \leq phy \leq 15 \\ \left(\frac{20 - EHI_{phy}}{20 - 15}\right)^{0.039} & 15 < phy \leq 20 \\ 0 & phy > 20 \end{cases}$	近岸海洋生态健康评价指南 (HY/T087-2005)
	多样性阈值 Threshold of biodiversity	$EHI_{div} = \begin{cases} 0 & div < 0.6 \\ \left(\frac{EHI_{div} - 0.6}{3.5 - 0.6}\right)^{0.7} & 0.6 \leq div \leq 3.5 \\ 1 & div < 3.5 \end{cases}$	生物多样性阈值评价标准 (陈清潮等, 1994)
浮游动物 Zooplankton	密度($\times 10^3$) Density	$EHI_{zoo} = \begin{cases} 0 & zoo < 3.0 \\ \left(\frac{EHI_{zoo} - 3.0}{4.5 - 3.0}\right)^{0.069} & 3.0 \leq zoo < 4.5 \\ 1 & 4.5 \leq zoo \leq 12.5 \\ \left(\frac{15 - EHI_{zoo}}{15 - 12.5}\right)^{0.065} & 12.5 < zoo \leq 15 \\ 0 & zoo > 15 \end{cases}$	近岸海洋生态健康评价指南 (HY/T087-2005)
	多样性阈值 Threshold of biodiversity	$EHI_{div} = \begin{cases} 0 & div < 0.6 \\ \left(\frac{EHI_{div} - 0.6}{3.5 - 0.6}\right)^{0.7} & 0.6 \leq div \leq 3.5 \\ 1 & div < 3.5 \end{cases}$	生物多样性阈值评价标准 (陈清潮等, 1994)
底栖生物 Benthos	生物量 Biomass	$EHI_{ben} = \begin{cases} 0 & ben < 12.5 \\ \left(\frac{EHI_{ben} - 12.5}{18.75 - 12.5}\right)^{0.079} & 12.5 \leq ben < 18.75 \\ 1 & 18.75 \leq ben \leq 37.5 \\ \left(\frac{45 - EHI_{ben}}{45 - 37.5}\right)^{0.077} & 37.5 < ben \leq 45 \\ 0 & ben > 45 \end{cases}$	近岸海洋生态健康评价指南 (HY/T087-2005)
	多样性阈值 Threshold of biodiversity	$EHI_{div} = \begin{cases} 0 & div < 0.6 \\ \left(\frac{EHI_{div} - 0.6}{3.5 - 0.6}\right)^{0.7} & 0.6 \leq div \leq 3.5 \\ 1 & div < 3.5 \end{cases}$	生物多样性阈值评价标准 (陈清潮等, 1994)

续表 5

指标分类 Index category	指标 Index	隶属度函数 Fuzzy membership function	评价标准 Evaluation standard
渔业资源 Fishery resources	多样性阈值 Threshold of biodiversity	$EHI_{div} = \begin{cases} 0 & div < 0.6 \\ \left(\frac{EHI_{div} - 0.6}{3.5 - 0.6} \right)^{0.7} & 0.6 \leq div \leq 3.5 \\ 1 & div > 3.5 \end{cases}$	生物多样性阈值评价标准 (陈清潮等, 1994)

态系统健康状态做出准确判断。研究人员在权重分配问题上进行了大量的研究, 将权重确定方法分为专家法、数学法及二者相结合。专家法主要有层次分析法、灰色关联度法等(胡婕, 2007)。本研究选用层次分析法对各项指标进行赋权, 该方法是一种多目标、多准则的决策方法(Guelph, 1998; 郭金玉等, 2008), 已广泛用于不同生态系统健康评价, 其原理是将复杂问题通过层次划分成具体指标使其条理化, 由专家根据客观实际对每个层次上的各项指标进行模糊判断, 再利用数学方法判断每层指标对上一层级的贡献率, 通过层次递阶得到基础指标对研究对象的贡献率, 即各项指标的权重。

1.5 生态系统健康综合评价模型

根据各项指标归一化值及其对应的权重, 利用模糊综合评价法(Xu *et al*, 2004)建立人工鱼礁生态系统综合健康指数模型, 得到:

$$EHI = \sum_i W_i \times EHI_i \quad (4)$$

式中, EHI 是生态系统综合健康指数; W_i 是第 i

个指标的权重; EHI_i 是第 i 个指标的分指数, 综合健康指数 EHI 的分布范围为 [0, 1], 综合健康指数对应的生态系统健康状况见表 4。

2 评价模型在人工鱼礁生态系统中的应用

2.1 北戴河人工鱼礁区建设概况

北戴河人工鱼礁示范区海域选址在北戴河国家级水产种质资源保护区外公共水域, 符合海洋功能区划要求, 无海底管道线、倾倒地和军事禁区, 是规划中的海洋牧场、休闲渔业和旅游用海。具体地理位置为图 1 中 B1、B2、B3、B4 四点连线所围区域, 地理坐标见表 6。示范区 2013 年 9 月开始投建, 2014 年 12 月完成全部建设, 投放金字塔型鱼礁 40 个、正方形鱼礁 1131 个、星型鱼礁 1044 个和石块礁 14169.4 空方, 总建设面积 58 ha, 共投礁 26567.76 空方。

2.2 现场调查与数据采集

根据人工鱼礁区建设海区地理位置及海洋调查规范(GB12763.1-2007), 采用大面调查法, 人工鱼礁

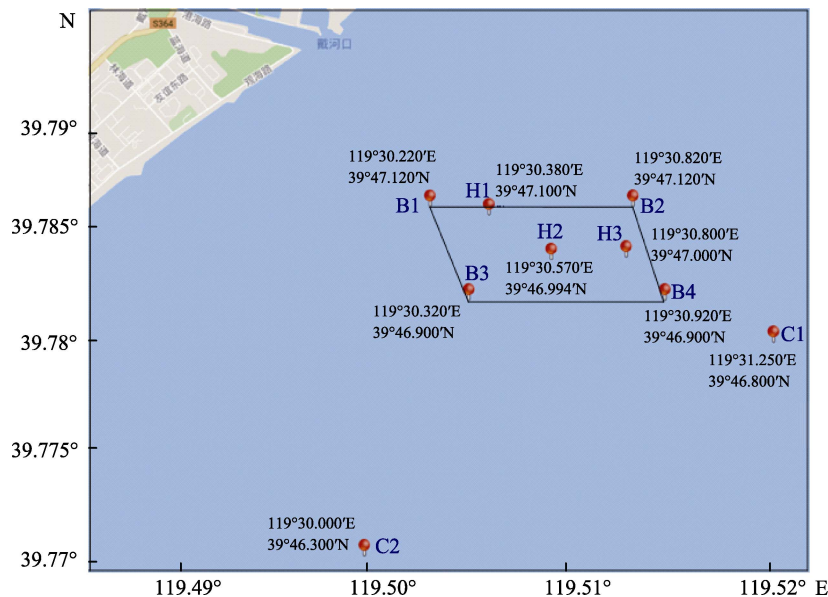


图 1 北戴河生态人工鱼礁区地理位置

Fig.1 Geographic position of ecological artificial reef in Beidaihe area

区设置 3 个站位 H1、H2、H3, 设置 2 个对照站位 C1、C2 (图 1)。对照点 C1、C2 距离礁区的最近距离分别为 600 和 1200 m。

2.3 评价结果

利用生态系统综合评价模型评价北戴河生态人工鱼礁系统建设效果进行, 将 2013 年 7 月、2014 年 6 月和 2015 年 5 月的调查数据进行归一化处理, 采用层次分析法对各指标权重进行赋值, 得到鱼礁区

和对照各项评价指标的归一化值、权重和分健康指数 (表 6)。按照公式 4 对各项分指数进行计算, 得到 3 个航次人工鱼礁区和对照区综合健康指数显示, 3 次调查取样时, 人工鱼礁区和对照区的生态系统都达到健康状态。对照区在 2013 年 7 月和 2014 年 6 月的调查中, 健康指数都高于鱼礁区, 在 2015 年 5 月调查时, 对照区生态健康指数出现下滑, 但人工鱼礁区生态系统健康呈现逐步提升的状态, 2015 年 5 月的综合健康指数为 0.838, 属很健康状态。

表 6 生态系统分健康指标分布
Tab.6 Distribution of ecosystem health index

指标 Index	权重 Weight	归一化值(鱼礁区) Normalization value(reef area)			归一化值(对照区) Normalization value(contrast area)		
		2013-07	2014-06	2015-05	2013-07	2014-06	2015-05
		pH	0.030	1.000	1.000	1.000	1.000
无机氮 DIN	0.015	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	
活性磷酸盐 IP	0.030	1.000	1.000	0.460	1.000	1.000	
化学需氧量 COD	0.015	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	
悬浮物 SS	0.015	0.000	0.000	0.000	0.000	0.806	
溶解氧 DO	0.022	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	
氮磷比 N/P	0.040	0.933	0.000	0.000	0.951	0.953	
硫化物 Sulfide	0.021	0.998	0.998	0.999	0.997	0.997	
石油类 TPHs	0.021	0.999	0.999	0.999	0.999	0.998	
铜 Cu	0.021	0.990	0.991	0.936	0.993	0.993	
汞 Hg	0.021	0.998	0.999	0.991	0.996	0.998	
锌 Zn	0.021	0.988	0.988	0.984	0.990	0.990	
镉 Cd	0.021	0.959	0.956	0.939	0.964	0.948	
砷 As	0.021	0.998	1.000	0.975	0.997	1.000	
铅 Pb	0.021	0.977	0.985	0.967	0.985	0.986	
浮游植物丰度 Phytoplankton density	0.083	0.980	1.000	0.980	0.970	0.985	
浮游植物多样性阈值 Threshold of phytoplankton biodiversity	0.083	0.627	0.880	0.771	0.499	0.822	
浮游动物丰度 Zooplankton density	0.083	0.000	1.000	1.000	0.000	0.874	
浮游动物多样性阈值 Threshold of zooplankton biodiversity	0.083	0.755	0.609	0.556	0.656	0.348	
底栖生物生物量 Benthos biomass	0.083	1.000	0.000	0.862	0.000	0.000	
底栖生物多样性阈值 Threshold of benthos biodiversity	0.083	0.111	0.959	0.940	0.839	0.899	
渔业资源多样性阈值 Threshold of fishery resources biodiversity	0.167	0.360	0.839	0.929	0.869	0.918	

表 7 生态系统综合健康指数变化
Tab.7 Change of synthesized health index of ecosystem

	鱼礁区 Reef area			对照区 Contrast area		
	2013-07	2014-06	2015-05	2013-07	2014-06	2015-05
生态健康综合指数 EHI	0.663	0.787	0.838	0.706	0.807	0.671

3 讨论

本研究通过生态系统健康质量综合评价人工鱼礁建设生态效应,选择水质环境、沉积环境与生物环境中 22 个参数作为生态系统健康评价指标,建立模糊综合评价模型,并利用模型对北戴河人工鱼礁生态系统健康状况进行评价。通过对比分析人工鱼礁区建礁前后及其与对照区生态系统综合健康指数发现,随着人工鱼礁建设工程的实施完成,其生态系统健康状况逐年提升,并在 2015 年对照区健康状况下降的情况下,仍达到很健康的状态。根据模型评价结果显示,2013 年 7 月投礁前的本底调查中,对照区和拟建礁区均处于健康状态,但对照区 EHI(0.706)高于拟建礁区(0.663),本底调查时,拟建礁区水质理化指标、沉积环境指标的差异性较小,对照区底栖生物和渔业资源多样性阈值明显高于鱼礁区;2014 年 6 月调查时,对照区和鱼礁区的 EHI 均高于本底调查时的同海域,对照区处于很健康状态(EHI 值为 0.807),鱼礁区处于健康状态(EHI 值为 0.787),鱼礁区与对照区水质理化指标、沉积环境指标的差异性较小,生物资源指标中的渔业资源多样性阈值略低于对照区,其他指标高于对照区;2015 年 5 月调查时,鱼礁区的 EHI(0.838)均高于前 2 次调查,属很健康状态,对照区 EHI(0.671)显著低于鱼礁区,礁区渔业资源多样性阈值显著高于对照区,且人工鱼礁区渔业资源多样性阈值分指数呈现逐年增加: $0.929(2015) > 0.839(2014) > 0.360(2013)$,该项分指标在本底调查时显著低于对照区,项目建设中调查时略低于对照区,2015 年 5 月礁区建设完成近 1 年后调查时显著高于对照区的 0.285,这一结果显示了人工鱼礁对渔业资源的良好养护效果(表 7),与国内外学者在人工鱼礁资源养护效果方面的研究结果相一致(张虎等, 2004; Reubens *et al*, 2013; Saul *et al*, 2013; dos Santos *et al*, 2010; Abelson, *et al*, 2002; Seaman W, 2007; 焦金菊等, 2011)。另外,本调查对照站位 C1、C2 距离礁区的距离分别为 600 和 1200 m,杨齐等(2005)研究显示,单位鱼礁的主要辐射范围在 200 m 内,对感知范围较大的鱼类,在 800~1200 m 内仍有诱集效果,因此,对照区渔业资源多样性阈值出现降低的其中一个原因可能是礁体投放对周围海域的恋礁型鱼类及其他游泳动物产生的诱集作用。

4 结语

人工鱼礁投放后产生的流场效应、饵料效应、声光效应等,对礁区及临近海域的理化环境和海洋生物发挥作用,同时,人工鱼礁生态系统是一个开放的动态系统,与外围海域时刻发生着物质与能量的交换,因此,应开展长期全面的人工鱼礁调查监测,研究人工鱼礁生态系统变化过程与机理,为科学评价人工鱼礁生态效应提供数据支撑。本研究采用模糊综合评价对人工鱼礁生态系统健康状况进行评价,其结果对人工鱼礁工程建设、环境资源保护、高效管理和可持续利用具有重要意义

参 考 文 献

- Abelson A, Shlesinger Y. Comparison of the development of coral and fish communities on rock-aggregated artificial reefs in Eilat, Red Sea. *ICES Journal of Marine Science*, 2002, 59(S1): 122-126
- Chen QC, Huang LM, Yi JQ, *et al*. Biodiversity of zooplankton in Nansha archipelago. Biodiversity of halobios in Nansha archipelago and adjacent waters. Beijing: Ocean Press, 1994, 42-50 [陈清潮, 黄良民, 伊健强, 等. 南沙群岛海区浮游动物多样性研究 I 南沙群岛及其邻近海区海洋生物多样性研究. 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, Guangdong, China. Doctoral Dissertation of Jinan University, 2009 [陈应华. 大亚湾大辣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]
- Costanza R, d'Arge R, Groot R, *et al*. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Ecological Economics*, 1998, 25(1): 3-15
- dos Santos LN, Brotto DS, Zalmon IR. Fish responses to increasing distance from artificial reefs on the Southeastern Brazilian Coast. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2010, 386(1): 54-60
- 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]
- Hu J. Research on ecological environment comprehensive assessment methods for coast marine area. Master's Thesis of Dalian University of Technology, 2007 [胡婕. 沿岸海域生态环境质量综合评价方法研究. 大连理工大学硕士研究生学位论文, 2007]
- Jiao JJ, Pan YX, Sun LY, *et al.* Effect of artificial reefs on fish multiplication. *Fisheries Science*, 2011, 30(2): 79–82 [焦金菊, 潘永玺, 孙利元, 等. 人工鱼礁区的增殖鱼类资源效果初步研究. 水产科学, 2011, 30(2): 79–82]
- 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, 徐姗楠, 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]
- 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, Costanza R, McMichael AJ. Assessing ecosystem health. *Trends in Ecology & Evolution*, 1998, 13(10): 397–402
- Reubens JT, Braeckman U, Vanaverbeke J, *et al.* Aggregation at windmill artificial reefs: CPUE of Atlantic cod (*Gadus morhua*) and pouting (*Trisopterus luscus*) at different habitats in the Belgian part of the North Sea. *Fisheries Research*, 2013, 139(1): 28–34
- Rosenberg DM, Resh VH. Fresh water biomonitoring and benthic macroinvertebrates. *The Quarterly Review of Biology*, 1994, 69(2): 286–287
- Saul SE, Walter JF, Die DJ, *et al.* Modeling the spatial distribution of commercially important reef fishes on the West Florida Shelf. *Fisheries Research*, 2013, 143(1): 12–20
- Sonstegard RA, Leatherland JF. Great lakes coho salmon as an indicator organism for ecosystem health. *Marine Environmental Research*, 1984, 14(1–4): 480
- 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*, 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, 2014, 44(4): 29–36]
- Guelph UO, Smit B, Waltner-toews D, *et al.* Agroecosystem health: Analysis and assessment. *World Economy*, 1998, 25(4): 563–589
- Wang X, Sheng HX, Tang YL, *et al.* Relationships between the structure of phytoplankton community and environmental factors in three artificial reef areas of Laoshan Bay. *Progress in Fishery Sciences*, 2014, 35(4): 7–12 [王欣, 盛化香, 唐衍力, 等. 崂山湾人工鱼礁区浮游植物群落结构与环境因子的关系. 渔业科学进展, 2014, 35(4): 7–12]
- Seaman W. Artificial habitats and the restoration of degraded marine ecosystems and fisheries. *Hydrobiologia*, 2007, 580(1): 143–155
- Xu FL, Lam KC, Zhao ZY, *et al.* Marine coastal ecosystem health assessment: A case study of the Tolo Harbour, HongKong, Chian. *Ecological Modelling*, 2004, 173(4): 355–370
- Xu FL. Ecosystem health assessment of Lake Chao, a shallow eutrophic Chinese lake. *Lakes & Reservoirs: Research and Management*, 1996, 2(1–2): 101–109
- Yang L, Liu TY, Huang RK. Theory and practice of artificial reefs in China. Guangzhou: Guangdong Science Technology Press, 2005 [杨吝, 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]
- Zhang H, Zhu KW Tang JH. The effect of fishery resource enhancement in the artificial reef area in the Haizhou Gulf. *Marine Fisheries*, 2005(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(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 马瑾艳)

Research on Artificial Reef Ecosystem Health Assessment Based on Fuzzy Synthetic Evaluation

LI Jiao, ZHANG Yan, YUAN Wei, GONG Pihai, GUAN Changtao^①

(Key Laboratory of Sustainable Development of Marine Fisheries, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Carbon-Sink Fisheries Laboratory, Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071)

Abstract In this study, fuzzy synthetic evaluation was used to build a reef ecosystem-health assessment model. To eliminate the dimension effect of sub-indexes, normalization processing was used. Analytic hierarchy process was used to assign a threshold of ecological indicator. The synthetic health index was used to assess the health status of artificial reef 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 standards, marine sediment quality, and guidance for the assessment of coastal marine ecosystem health. Data and survey results of a background investigation in July 2013, and a tracing investigation in June 2014 and May 2015, were processed using the ecosystem-health synthetic assessment model. The results indicated that both reef area and contrast area are in a healthy state. The health state of the contrast area was better than that of the reef area in July 2013 before reef construction. Data from June 2014 was consistent with that from the background investigation; the health status of the contrast area was also better, which is related to the disturbance of reef construction and the evolution of the reef system. In May 2015, the health index of the contrast area declined, but that of the reef area increased to 0.838, indicating that the reef is very healthy. Health evaluation indicates that the health of the reef ecosystem in the Beidaihe demonstration area is gradually improving. According to the results obtained with the ecosystem health synthetic assessment model, the state of the reef improved with completion of construction and ecosystem stability; therefore, ecosystem health synthetic assessment is an important method for the management and development of reefs. Researching reef ecosystem health and scientifically assessing artificial reef ecological effects are significant 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: GUAN Changtao, E-mail: guanct@ysfri.ac.cn