

DOI: 10.5846/stxb201312052899

陆志强, 李吉鹏, 章耕耘, 马丽. 基于可变模糊评价模型的东山湾生态系统健康评价. 生态学报, 2015, 35(14): 4907-4919.

Lu Z Q, Li J P, Zhang G Y, Ma L. Ecosystem health assessment based on variable fuzzy evaluation model in Dongshan Bay, Fujian, China. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(14): 4907-4919.

基于可变模糊评价模型的东山湾生态系统健康评价

陆志强¹, 李吉鹏¹, 章耕耘¹, 马 丽^{2,*}

¹ 集美大学水产学院, 厦门 361021

² 国家海洋局第三海洋研究所, 厦门 361005

摘要: 根据东山湾海域环境污染现状和生态系统的特点, 从水质环境、沉积物环境、生物残毒以及海洋生物方面构建了东山湾生态系统健康评价指标体系, 提出了基于可变模糊评价模型的海湾生态系统健康评价方法, 并利用该方法对东山湾生态系统健康状况进行了评价。结果表明: 东山湾春季生态系统健康指数为 2.36, 秋季为 2.44, 均处于“良与中之间, 偏良”水平, 春季略优于秋季。影响东山湾生态系统健康状况的主要负面指标因子为鱼卵及仔鱼密度(春秋季健康指数均值为 4.95)、营养水平(秋季健康指数为 4.47)和底栖生物生物量(春季健康指数为 3.59)。实例研究表明该方法通过准则参数 α 和距离参数 p 的不同组合变化, 以线性与非线性相结合, 能够较客观系统、标准量化地评价海湾生态系统健康状况的优劣。

关键词: 生态系统健康; 指标体系; 可变模糊评价模型; 东山湾

Ecosystem health assessment based on variable fuzzy evaluation model in Dongshan Bay, Fujian, China

LU Zhiqiang¹, LI Jipeng¹, ZHANG Gengyun¹, MA Li^{2,*}

¹ Fisheries College of Jimei University, Xiamen 361021, China

² The Third Institute of Oceanography, State Oceanic Administration (SOA), Xiamen 361005, China

Abstract: Human activities such as overfishing, coastal development and pollution have altered bay ecosystems and eroded their capacity to provide benefits now and in the future. A systematic diagnosis of bay ecosystem health for sustainable ecological management is urgently needed. Sustainable management aims at maintaining the flow of a broad range of benefits from the bay and also requires a comprehensive and quantitative method to measure and monitor the health of bay at the level of ecosystem. A variable fuzzy evaluation model is introduced for the comprehensive evaluation of bay ecosystem health. According to the environmental pollution conditions and ecosystem characteristics in Dongshan Bay, Fujian, China, an integrated index system comprising water, sediment environment, residual toxicity in organisms and marine biota were created for evaluation of bay ecosystem health. The judgment criteria regarding the level of bay ecosystem health could be roughly classified as “excellent, good, moderate, poor, and bad”. The five levels could be further sub-classified into 13 ranks. Ecosystem health assessment of Dongshan Bay in spring and autumn based on variable fuzzy evaluation model was presented in this paper. The results showed that the score of ecosystem health index for Dongshan bay was 2.36 in spring and 2.44 in autumn, respectively. The status of Dongshan bay ecosystem health could be generally classified as “between good and moderate, mostly good”, with better level in spring than in autumn. In more detail, the scores of ecosystem health index ranged from 2.31 to 2.47 and all stations were classified as “between good and moderate, mostly good” in spring. In

基金项目: 中国海洋生物多样性保护研究(海洋生态影响评价方法研究)HD130701-13(6)

收稿日期: 2013-12-05; **网络出版日期:** 2014-10-09

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: mali@tio.org.cn

autumn, the scores of ecosystem health index ranged from 2.29 to 2.74. Only three stations (D11, D13 and D14) were classified as “between good and moderate, mostly good” and the other stations were classified as “between good and moderate, mostly moderate”. Several factors showed their positive effects on the ecosystem health status, such as heavy metals in seawater, sediment and organism, oil in seawater and sediment, zooplankton biomass, phytoplankton cells density and diversity as well as benthos diversity. The scores of health index for these indicators were all lower than 1.5 in spring and autumn. However, the health status of the ecosystem was potentially made to change to “between good and moderate, mostly moderate” by the negative factors including fish eggs and larva density (average score of health index in spring and autumn was 4.95), nutrition level (the score of health index in autumn was 4.47), and benthos biomass (the score of health index in spring was 3.59). The scores of health index for these three indicators were all higher than 3.5. Case study indicates that the ecosystem health assessment based on variable fuzzy evaluation model also provides a standardized and quantitative approach for measuring overall health condition of bay ecosystems, which can perform well and accurately evaluate the comprehensive status of the bay ecosystem health through the change of variable model parameters (the criterion and distance parameter, α and p), combining the linear and nonlinear models. Therefore, the model result is more reliable than before.

Key Words: ecosystem health; indicator system; variable fuzzy evaluation model; Dongshan Bay

海湾水域作为陆海相互作用较为剧烈的区域,其生态系统的可持续利用和健康发展受到了人为活动的严重影响。为合理利用海湾资源,科学保护海洋环境,人们对海湾生态系统健康状况进行深入了解和研究^[1-3]。

现阶段海湾生态系统健康的概念仍较为模糊、理解也不全面,还不足以清晰揭示海湾健康所应符合的标准、尺度和原则^[4]。但随着相关基础和应用的研究所,已初步形成了一些共识。比如:海湾的健康主要表现在海湾生态系统结构与功能的健康^[5];海湾生态系统健康状况评价的方法主要有指示物种法和多指标体系法。与指示物种法相比,指标体系法通过从不同尺度和角度刻画生态系统特征,反映生态系统的健康状况,其评价技术结合了物理、化学、生物和毒理学方法^[6]。然而,海湾生态系统健康评价存在着许多不确定因素,评价指标与标准之间的关系复杂,且多为非线性关系,对于评价的优劣也没有绝对分明的界限^[7]。采用精确数学方法来研究这一模糊问题存在较大困难,不能很好地表征海湾生态系统的真实状况和属性。可变模糊评价模型通过调整模型及其参数,合理地确定样本指标对各级指标标准区间的相对隶属度,有效地解决了评价中边界模糊评价结果的影响问题,提高了对样本等级评价的可信度^[8]。该模型已经应用于水质质量状况评价中^[8],而应用于海湾生态系统健康状况的评价尚未见报道。

本文借鉴国内外相对成熟的近岸海域生态系统健康评价体系,结合东山湾的环境污染现状和生态系统特点,从水质环境、沉积物环境、生物残毒以及海洋生物方面构建了东山湾生态系统健康评价指标体系,并采用可变模糊评价模型对其生态系统健康状况进行评价。将可变模糊评价模型应用于海湾生态系统健康评价中可有效地解决边界模糊评价结果的影响问题,能够较客观系统、标准量化地评价海湾生态系统健康状况的优劣,评价结果较为可信。同时,可作为一种合理而适用的海湾生态系统健康评价方法,为我国海湾生态系统健康预警体系的建立和海洋生态文明建设提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 研究区域

东山湾(117°24′—117°37′E、23°43′—23°57′N)位于福建省东南沿海的漳浦县、云霄县和东山县之间。整个海湾呈不规则布袋状伸入陆地,属窄口型半封闭海湾,封闭性较强。湾内海域面积为 247.89km²,海岸线约 110.5km,湾顶有漳江入海^[9]。海域主要功能为港口航运、农渔业、工业与城镇用海。重点保护对象是漳江口

红树林生态系统和东山珊瑚礁生态系统等^[10]。

1.2 数据来源

本文研究数据来源于 2012 年对东山湾的综合调查,其中水质监测时间为 4 月和 10 月,主要包括有机污染物、营养盐、重金属和石油类;沉积物和生物残毒监测时间为 10 月,主要包括有机污染物(生物残毒不监测)、重金属和石油类,生物残毒仅在一处站位采集样品进行分析;海洋生物调查时间为春季(4 月)和秋季(10 月),主要包括浮游植物、浮游动物和底栖生物生物量、多样性指数、鱼卵及仔鱼密度和初级生产力。调查范围和站位设置如图 1 所示。样品采集和分析均按照《海洋监测规范》(GB17378—2007)^[11]和《海洋调查规范》(GB/T12763—2007)^[12]中规定方法进行。

1.3 研究方法

1.3.1 东山湾生态系统健康评价指标体系的构建

本文以美国环境保护署发布的《全国近岸状况报告 IV》中提出的美国近岸海域状况评价体系^[13]、欧盟水框架指令提出的欧盟近岸海域生态质量状况评价体系^[14]和《近岸海洋生态健康评价指南》(HY/T087—2005)^[15]为参考,综合考虑海湾生态系统易受近岸人类活动和陆源污染影响、是许多海洋生物物种最重要的养育场以及具有复杂多样的理化因子和更高的生态系统多样性等特点;根据东山湾海域环境污染现状和生态系统特点收集数据资料,从水质环境、沉积物环境、生物残毒以及海洋生物方面选取 17 个状态指标构建了东山湾生态系统健康评价指标体系(表 1)。

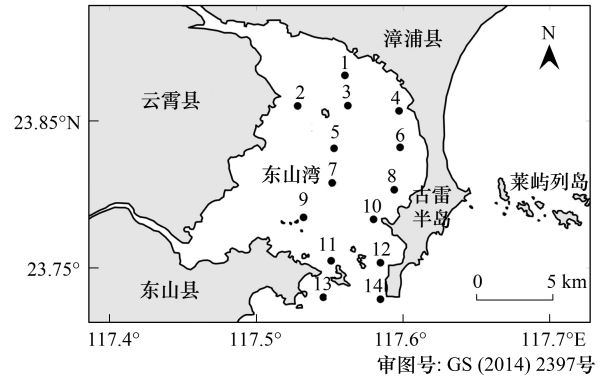


图 1 东山湾生态调查站位图

Fig.1 Sampling stations for the ecological survey in Dongshan Bay

表 1 东山湾生态系统健康评价指标体系
Table 1 Indicator system for ecosystem health assessment in Dongshan Bay

目标层 Objective level	准则层 Criterion level	指标层 Index level
东山湾生态系统健康评价指标体系(A) Indicator system for ecosystem health assessment in Dongshan Bay (A)	水质环境(B1)	有机污染指数(C1)
		营养水平指数(C2)
		海水重金属指数(C3)
		海水石油类(C4)
	沉积物环境(B2)	沉积物总有机碳(C5)
		沉积物重金属指数(C6)
		沉积物石油类(C7)
	生物残毒(B3)	生物体重金属指数(C8)
		生物体石油类(C9)
	海洋生物(B4)	浮游植物细胞密度(C10)
		浮游植物多样性指数(C11)
		浮游动物生物量(C12)
		浮游动物多样性指数(C13)
		底栖生物生物量(C14)
		底栖生物多样性指数(C15)
		鱼卵及仔鱼密度(C16)
		初级生产力(C17)

(1) 有机污染指数^[16]

$$A = \frac{C_{\text{COD}}}{C'_{\text{COD}}} + \frac{C_{\text{IN}}}{C'_{\text{IN}}} + \frac{C_{\text{IP}}}{C'_{\text{IP}}} - \frac{C_{\text{DO}}}{C'_{\text{DO}}}$$

式中, A 为有机污染指数; C_{COD} 、 C_{IN} 、 C_{IP} 、 C_{DO} 分别为化学耗氧量 (mg/L)、无机氮 (mg/L)、活性磷酸盐 (mg/L)、溶解氧 (mg/L) 的实际测量值; C'_{COD} 、 C'_{IN} 、 C'_{IP} 、 C'_{DO} 分别各因子相应的一类海水水质标准值 (GB3097—1997)。

(2) 营养水平指数^[16]

$$E = \frac{C_{\text{COD}} \times C_{\text{IN}} \times C_{\text{IP}}}{1500}$$

式中, E 为营养水平指数; C_{COD} (mg/L)、 C_{IN} (μg/L)、 C_{IP} (μg/L) 分别为化学耗氧量、溶解态无机氮、活性磷酸盐的实际测量值。

(3) 重金属指数^[17]

$$A_i = \frac{C_i}{C_o}$$

$$P = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{C_o}$$

式中, A_i 为第 i 种重金属的相对污染指数; P 为重金属的综合污染指数; C_i 为第 i 种重金属的实测浓度值; C_o 为第 i 种重金属的评价标准值。

(4) 生物多样性指数选用 Shannon-Weaver 多样性指数^[11]。

$$H' = - \sum_{i=1}^S P_i \log_2 P_i$$

式中, S 为样品中的种类总数, P_i 为第 i 种的个体数与样品中的总个体数的比值。

(5) 初级生产力 采用叶绿素 a 浓度估算, 按照 Cadee 和 Hegeman 提出的简化公式计算^[18]。

$$P = \frac{(C_a \times D \times Q)}{2}$$

式中, P 为初级生产力 (mg C / m² d), C_a 为叶绿素 a 浓度 (mg / m³), D 为光照时间 (h), Q 为同化系数 (mg C mg⁻¹ Chl h⁻¹)。根据以往调查结果, 东山湾春季和秋季同化系数取值为 4.85 和 3.92。

1.3.2 东山湾生态系统健康评价指标体系指标权重值的确定

由于不同的评价指标对海湾生态系统健康综合评价指数的贡献是不一样的, 因此指标体系中权重值设置的合理性是决定评价结果可靠性的一个重要因素^[8]。本文采用考虑权重折衷系数的权重确定方法, 即将主观权重与客观权重相结合, 公式如下:

$$w = (1 - \alpha) q_i + \alpha p_i$$

式中, w 为海湾生态系统健康评价指标体系指标权重, α 为权重折衷系数, $0 \leq \alpha \leq 1$; $P = (p_1, p_2, \dots, p_n)$ 为主观权重, 由层次分析法确定; $Q = (q_1, q_2, \dots, q_n)$ 为客观权重, 采用改进熵值法^[19]确定。层次分析法和熵值法均属于确定指标权重的常用方法^[20-21]。本文权重折衷系数采用 $\alpha = 0.5$ ^[22-23]。

主观权重值的确定主要是对准则层和指标层进行指标相对重要性的专家打分、经验明确、判断矩阵的构建及软件 YAAHP V7.5 计算得到, 判断矩阵一致性比例小于 0.1。客观权重值的确定主要是对指标层数据进行标准化处理、坐标平移、指标熵值和差异系数的计算得到。东山湾生态系统健康评价指标体系权重如表 2 所示。

生物残毒指标只有一个站位的监测值, 故客观权重以零计; 沉积物环境指标春秋两季采用同一期监测值; 鱼卵及仔鱼密度为鱼类主要产卵季节的密度。

1.3.3 东山湾生态系统健康评价指标标准值确定

东山湾生态系统健康评价指标标准值的确定, 主要参考我国现行的《海水水质标准》(GB3097—1997)^[24]、《海洋沉积物质量标准》(GB18668—2002)^[25]、《海洋生物质量标准》(GB18421—2001)^[26] 和《近岸

海洋生态健康评价指南》(HY/T087—2005)^[15]。由于我国海洋水质标准分为4级,沉积物和生物标准分为3级,所以评价标准参考国内外的研究成果做了一定调整。对于标准中不包含的指标,则根据文献^[27-28]报道中关于自然海区相关历史研究结果和专家咨询建议来设定指标标准值,东山湾生态系统健康评价指标标准值见表3。

表2 东山湾生态系统健康评价指标体系权重

Table 2 Weighting factor of ecosystem health assessment in Dongshan Bay

准则层 Criterion level	<i>p</i>	指标层 Index level	<i>p</i>	<i>q</i>		<i>w</i>	
				春季 Spring	秋季 Autumn	春季 Spring	秋季 Autumn
水质环境(B1)	0.222	有机污染指数(C1)	0.095	0.060	0.065	0.078	0.080
Water environment(B1)		营养水平指数(C2)	0.048	0.067	0.062	0.057	0.055
		海水重金属指数(C3)	0.048	0.064	0.067	0.056	0.057
		海水石油类(C4)	0.032	0.062	0.072	0.047	0.052
沉积物环境(B2)	0.111	沉积物总有机碳(C5)	0.022	0.072	0.075	0.047	0.049
Sediment environment(B2)		沉积物重金属指数(C6)	0.044	0.068	0.071	0.056	0.058
		沉积物石油类(C7)	0.044	0.064	0.066	0.054	0.055
生物残毒(B3)	0.222	生物体重金属指数(C8)	0.056	0.000	0.000	0.028	0.028
Residual toxicity(B3)		生物体石油类(C9)	0.167	0.000	0.000	0.083	0.083
海洋生物(B4)	0.445	浮游植物细胞密度(C10)	0.034	0.065	0.063	0.050	0.049
Marine biota(B4)		浮游植物多样性指数(C11)	0.034	0.084	0.072	0.059	0.053
		浮游动物生物量(C12)	0.034	0.054	0.062	0.044	0.048
		浮游动物多样性指数(C13)	0.034	0.075	0.075	0.055	0.055
		底栖生物生物量(C14)	0.068	0.063	0.053	0.066	0.061
		底栖生物多样性指数(C15)	0.068	0.081	0.073	0.075	0.071
		鱼卵及仔鱼密度(C16)	0.068	0.058	0.061	0.063	0.065
		初级生产力(C17)	0.103	0.062	0.063	0.082	0.083

表3 东山湾生态系统健康评价指标标准值

Table 3 The standard values of ecosystem health assessment index in Dongshan Bay

评价指标 Assessment index	指标标准值 standard values					参考文献 References
	优 Excellent	良 Good	中 Moderate	差 Poor	劣 Bad	
有机污染指数 Organic pollutant index	0—2.0	2.1—4.0	4.1—6.0	6.1—8.0	>8.0	[24]
营养水平指数 Nutrition level index	0—0.5	0.5—1.0	1.0—2.0	2.0—3.0	≥3.0	[27]
重金属指数 Heavy metals index	0—1.0	1.1—2.0	2.1—4.0	4.1—8.0	>8.0	[24-26]
海水石油类 Oil in seawater/(mg/L)	0—0.03	0.03—0.05	0.05—0.3	0.3—0.5	>0.5	[24]
沉积物总有机碳(×10 ⁻²) TOC in sediment	0—1.0	1.1—2.0	2.1—3.0	3.1—4.0	>4.0	[25]
沉积物石油类(×10 ⁻⁶) Oil in sediment	0—400	400—800	800—1200	1200—1500	>1500	[25]
生物体石油类 Oil in organism/(mg/kg)	0—15	15—30	30—50	50—80	>80	[26]
多样性指数 Diversity index	≥3.5	3.5—2.6	2.5—1.6	1.5—0.6	0.5—0	[27]
浮游植物细胞密度 Phytoplankton cells density/(×10 ⁶ 个/L)	0—0.5	0.6—1.0	1.1—9.0	9.1—40	≥40	[28]
浮游动物生物量 Zooplankton biomass/(mg/m ³)	≥100	100—50	50—30	30—10	10—0	[27]
底栖生物生物量 Benthos biomass/(g/m ²)	≥100	100—50	50—25	25—5	5—0	[27]
鱼卵及仔鱼密度 Fish eggs and larvae density/(个/m ³)	≥50	50—25	25—5	5—2	2—0	[15]
初级生产力 Primary productivity/(mg C m ⁻² d ⁻¹)	≥500	500—400	400—300	300—200	200—0	[27]

1.3.4 基于可变模糊评价模型的海湾生态系统健康评价

海湾生态系统健康评价存在着许多不确定因素,评价指标与标准之间的关系复杂,且许多现象呈非线性关系,对于评价的优劣没有绝对分明的界限。模糊评价法可以将一些边界不清、不易定量的因素定量化,直观反映评价指标与各级标准相对应的隶属程度,并以最大隶属度所对应的级别作为评价系统所处类别,从而更加客观、准确地反映评价系统状况与标准间的关系^[7]。然而模糊综合评价法在评价过程中存在一定的不确定性,且模型难以自我调整与验证,评价结果不能表征同一等级内的优劣状况^[29]。

陈守煜在札德模糊集合的基础上提出相对隶属度概念,建立了工程模糊集,并在可变模糊集理论上,提出了可变模糊评价模型^[30]。该模型能通过变化模型参数,合理地确定样本指标对各级指标标准区间的相对隶属度,有效地解决评价中边界模糊评价结果的影响问题,提高对样本等级评价的可信度^[8]。海湾生态系统健康可变模糊评价模型构建如下:

(1) 指标数据规格化处理

设有待识别的 n 个海湾生态系统健康评价样本集,每个样本按 m 个指标、5 个级别进行识别,其指标特征值与指标标准特征值矩阵分别为:

$$X = (x_{ij}); \quad i=1,2,\dots,m; \quad j=1,2,\dots,n$$

$$Y = (y_{ih}); \quad h=1,2,\dots,5$$

通常指标分为递增型和递减型两类,递增型和递减型指标与指标标准特征值的规格化公式分别为:

$$r_{ij} = \begin{cases} 0 & x_{ij} \geq y_{i5}(\text{递增型}), x_{ij} \leq y_{i5}(\text{递减型}) \\ \frac{y_{i5} - x_{ij}}{y_{i5} - y_{i1}} & \text{递增型或递减型} \\ 1 & x_{ij} \leq y_{i1}(\text{递增型}), x_{ij} \geq y_{i1}(\text{递减型}) \end{cases}$$

$$s_{ih} = \begin{cases} 0 & y_{ih} = y_{i5} \\ \frac{y_{i5} - y_{ih}}{y_{i5} - y_{i1}} & \text{递增型或递减型} \\ 1 & y_{ih} = y_{i1} \end{cases}$$

式中, r_{ij} 为海湾生态系统健康评价样本 j 对指标 i 特征值的规格化数; y_{i1} 、 y_{ih} 、 y_{i5} 分别为指标 i 的 1 级、 h 级、5 级标准特征值; s_{ih} 为级别 h 指标 i 标准特征值 y_{ih} 的规格化数。

(2) 综合相对隶属度的确定

可变模糊评价模型的一般形式为^[30]:

$$u_{hj} = \begin{cases} \sum_{k=\alpha_j}^{b_j} \left[\frac{\sum_{i=1}^m [w_i | r_{ij} - s_{ih} |]^p}{\sum_{i=1}^m [w_i | r_{ij} - s_{ik} |]^p} \right]^{\frac{\alpha}{p}}^{-1} & \alpha_j \leq h \leq b_j \\ 0 & 1 \leq h < \alpha_j \text{ 或 } b_j < h \leq 5 \end{cases}$$

式中, u_{hj} 为样本 j 对级别 h 的相对隶属度; w_i 为指标权重; b_j 、 α_j 分别为样本 j 的级别上限值与级别下限值,将样本 j 的 m 个指标相对隶属度分别与矩阵 $s_{\text{中}}$ 相应指标的各类标准值进行比较,可得样本 j 的级别上限值 b_j 和级别下限值 α_j 。

α 为模型优化准则参数, p 为距离参数。两者可组成模型的 4 种组合: 1) $\alpha=1, p=1$; 2) $\alpha=1, p=2$; 3) $\alpha=2, p=1$; 4) $\alpha=2, p=2$ 。

在实际评价时应根据评价对象的复杂性来确定采用弱、一般、强非线性模型,当评价对象为弱非线性时采用模型参数 $\alpha=1, p=1$; 一般非线性时采用 $\alpha=1, p=2$ 或 $\alpha=2, p=1$; 强非线性时采用 $\alpha=2, p=2$ 。考虑到海湾生态系统健康评价是一个非线性问题,且难以确定其非线性程度,故采用四种组合参数结果的均值作为评价

结果。

(3) 结果的定量化评定

基于前文计算的综合相对隶属度,按最大隶属度对应的等级作为评价结果的准则来判定海湾生态系统健康等级。为避免采用最大隶属度造成评价结果失真,本文采用级别特征值来判定评价级别。

$$H = \sum_{h=1}^5 h \cdot \left| \frac{u_{hj}}{\sum_{h=1}^5 u_{hj}} \right|$$

式中, H 为待评价样本海湾生态系统健康等级的特征值。

海湾生态系统健康状况级别的判断准则大致分为优、良、中、差、劣,可进一步细化为 13 个等级。等级优代表生态系统的生物多样性及结构稳定,各项服务功能正常发挥,没有表现出退化或者表现出极小退化迹象。等级良代表生态系统的生物多样性及结构基本稳定,主要服务功能正常发挥,表现出较小的退化。等级中代表生态系统的生物多样性及结构发生一定程度变化,主要服务功能尚能发挥,表现出中等程度的退化。等级差代表生态系统的生物多样性及结构发生较大程度变化,各项服务功能严重退化。等级劣代表生态系统的生物多样性及结构发生本质的变化,各项服务功能丧失。结合有关研究确定本文海湾生态系统健康级别判断准则如表 4 所示。

表 4 海湾生态系统健康级别判断准则

Table 4 The judgment criteria regarding the level of bay ecosystem health

H	等级 Rank	H	等级 Rank	H	等级 Rank
$0.75 < H \leq 1.25$	优	$2.5 < H \leq 2.75$	良与中之间, 偏中	$4.25 < H \leq 4.5$	差与劣之间, 偏差
$1.25 < H \leq 1.5$	优与良之间, 偏优	$2.75 < H \leq 3.25$	中	$4.5 < H \leq 4.75$	差与劣之间, 偏劣
$1.5 < H \leq 1.75$	优与良之间, 偏良	$3.25 < H \leq 3.5$	中与差之间, 偏中	$4.75 < H \leq 5.0$	劣
$1.75 < H \leq 2.25$	良	$3.5 < H \leq 3.75$	中与差之间, 偏差		
$2.25 < H \leq 2.5$	良与中之间, 偏良	$3.75 < H \leq 4.25$	差		

2 结果与分析

2.1 东山湾生态系统各指标健康水平分析

如果指标健康指数平均数低于 1.5,则它对海湾生态系统的健康会造成直接的正面影响,即正面指标因子;指标健康指数平均数高于 3.5,则它对海湾生态系统的健康会造成直接的负面影响,即负面指标因子。东山湾生态系统各指标健康指数平均值,如图 2 所示。

由图 2 可见,春季健康指数高于 3.5 的指标为底栖生物生物量(C14)和鱼卵及仔鱼密度(C16),这 2 项指标是影响春季东山湾生态系统健康状况的主要负面指标因子,即对东山湾生态系统产生不利影响,会降低东山湾生态系统健康状况的整体水平;春季健康指数低于 1.5 的指标为有机污染指数(C1)、营养水平指数(C2)、海水重金属指数(C3)、海水石油类(C4)、沉积物重金属指数(C6)、沉积物石油类(C7)、生物体重金属指数(C8)、浮游植物细胞密度(C10)、浮游植物多样性指数(C11)、浮游动物生物量(C12)和底栖生物多样性指数(C15),这 11 项指标是影响春季东山湾生态系统健康状况的主要正面指标因子,会提升东山湾生态系统健康状况的整体水平。

秋季健康指数高于 3.5 的指标为营养水平指数(C2)和鱼卵及仔鱼密度(C16),这 2 项指标是影响秋季东山湾生态系统健康状况的主要负面指标因子;秋季健康指数低于 1.5 的指标为海水重金属指数(C3)、海水石油类(C4)、沉积物重金属指数(C6)、沉积物石油类(C7)、生物体重金属指数(C8)、浮游植物细胞密度(C10)、浮游植物多样性指数(C11)、浮游动物生物量(C12)和底栖生物多样性指数(C15),这 9 项指标是影响秋季东山湾生态系统健康状况的主要正面指标因子。

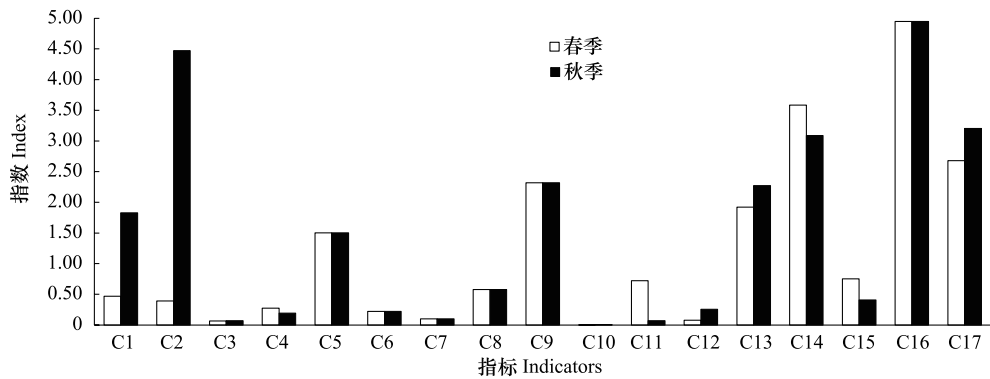


图2 东山湾生态系统各指标健康指数

Fig.2 The scores of ecosystem health index for all indicators in Dongshan Bay ecosystem

有机污染指数(C1)和营养水平指数(C2)是春秋季差别最显著的2项指标,春季健康指数均较低,秋季有明显的增加,营养水平指数(C2)增加尤为显著(由0.39升至4.47),这可能是秋季在东北季风影响下,受高营养盐、低盐度的浙闽沿岸流南下影响调查海域。

鱼卵及仔鱼密度(C16)采用鱼类主要产卵季节的密度,但指标的健康指数仍高达4.95,是影响东山湾生态系统健康的首要负面指标因子。同时,底栖生物生物量(C14)和初级生产力(C17)也对东山湾生态系统健康有负面影响。本次调查东山湾初级生产力均值为206.7 mg C m⁻² d⁻¹,与1988年的385.11 mg C m⁻² d⁻¹^[31]相比较下降了46.33%。

2.2 东山湾各站位生态系统健康水平分析

2.2.1 基于可变模糊评价模型评价结果验证

为了分析基于可变模糊评价模型的东山湾生态系统健康评价结果的可信度,本文采用模糊综合评价法对评价结果进行验证分析。具体评价结果见表5。

表5 东山湾生态系统健康水平综合评价结果

Table 5 The comprehensive evaluation results of ecosystem health assessment in Dongshan Bay

站位 Station	季节 Season	可变模糊评价模型 Variable fuzzy evaluation model							模糊综合评价 Fuzzy comprehensive evaluation
		$a = 1$	$a = 1$	$a = 2$	$a = 2$	范围 Range	平均值 Average	评价等级 Assessment grade	
		$p = 1$	$p = 2$	$p = 1$	$p = 2$				
D1	春季	2.49	2.58	2.30	2.47	2.30—2.58	2.46	良与中间,偏良	良
	秋季	2.61	2.67	2.47	2.62	2.47—2.67	2.59	良与中间,偏中	中
D2	春季	2.44	2.54	2.21	2.40	2.21—2.54	2.39	良与中间,偏良	良
	秋季	2.58	2.66	2.40	2.59	2.40—2.66	2.56	良与中间,偏中	中
D3	春季	2.50	2.60	2.29	2.50	2.29—2.60	2.47	良与中间,偏良	良
	秋季	2.64	2.70	2.50	2.66	2.50—2.70	2.62	良与中间,偏中	良
D4	春季	2.45	2.55	2.22	2.41	2.22—2.55	2.41	良与中间,偏良	良
	秋季	2.73	2.76	2.66	2.79	2.66—2.79	2.74	良与中间,偏中	中
D5	春季	2.41	2.54	2.11	2.38	2.11—2.54	2.36	良与中间,偏良	良
	秋季	2.58	2.66	2.40	2.59	2.40—2.66	2.55	良与中间,偏中	良
D6	春季	2.36	2.50	2.01	2.29	2.01—2.50	2.29	良与中间,偏良	良
	秋季	2.66	2.72	2.55	2.71	2.55—2.72	2.66	良与中间,偏中	良
D7	春季	2.42	2.56	2.14	2.42	2.14—2.56	2.39	良与中间,偏良	良
	秋季	2.57	2.66	2.37	2.58	2.37—2.66	2.54	良与中间,偏中	良
D8	春季	2.42	2.55	2.11	2.38	2.11—2.55	2.36	良与中间,偏良	良
	秋季	2.56	2.64	2.36	2.56	2.36—2.64	2.53	良与中间,偏中	良
D9	春季	2.39	2.54	2.08	2.36	2.08—2.54	2.34	良与中间,偏良	良

续表

站位 Station	季节 Season	可变模糊评价模型 Variable fuzzy evaluation model							模糊综合评价 Fuzzy comprehensive evaluation
		$a = 1$	$a = 1$	$a = 2$	$a = 2$	范围 Range	平均值 Average	评价等级 Assessment grade	
		$p = 1$	$p = 2$	$p = 1$	$p = 2$				
D10	秋季	2.53	2.63	2.32	2.53	2.32—2.63	2.50	良与中间,偏良	良
	春季	2.46	2.58	2.20	2.45	2.20—2.58	2.42	良与中间,偏良	良
D11	秋季	2.56	2.63	2.38	2.55	2.38—2.63	2.53	良与中间,偏中	良
	春季	2.40	2.51	2.18	2.35	2.18—2.51	2.36	良与中间,偏良	良
D12	秋季	2.37	2.50	2.08	2.33	2.08—2.50	2.32	良与中间,偏良	良
	春季	2.41	2.55	2.10	2.39	2.10—2.55	2.36	良与中间,偏良	良
D13	秋季	2.56	2.62	2.38	2.54	2.38—2.62	2.52	良与中间,偏中	良
	春季	2.36	2.50	2.05	2.31	2.05—2.50	2.31	良与中间,偏良	良
D14	秋季	2.37	2.49	2.02	2.29	2.02—2.49	2.29	良与中间,偏良	良
	春季	2.39	2.54	2.08	2.37	2.08—2.54	2.35	良与中间,偏良	良
均值	秋季	2.41	2.54	2.08	2.36	2.08—2.54	2.34	良与中间,偏良	良
	春季	2.41	2.53	2.15	2.37	2.15—2.53	2.36	良与中间,偏良	良
Average	秋季	2.47	2.58	2.24	2.46	2.24—2.58	2.44	良与中间,偏良	良

由表 5 可见,随着准则参数 a 和距离参数 p 的 4 种不同组合,各站位评价等级基本稳定在一个较小的范围,出现最大差异值的春季 D6 站位(最大差异值为 $0.49<0.5$)也在一个等级范围内,最后将 4 种组合参数结果的均值作为评价等级。同时,基于可变模糊评价模型的东山湾生态系统健康评价结果与模糊综合评价法基本一致。仅秋季 D3、D5、D6、D7、D8、D10 和 D12 站位评价等级与模糊综合评价法略有出入。

分析表 5 中基于可变模糊评价模型与模糊综合评价法评价结果出现偏差的原因,可能在于模糊综合评价法依据最大隶属度原则进行生态系统健康等级的判定,这样在过渡生态系统健康级别归属问题上会造成大量有用信息的丢失(如秋季 D5、D7、D8、D10 和 D12 站),直接影响评价的客观性,导致结果出现偏差。另外,模糊综合评价法按照各分级标准进行隶属度的确定,小于某一阈值的被定为一个级别,这样会导致同一级别范围内优劣差异难以体现。而基于可变模糊评价模型以级别特征值评价结果反映东山湾生态系统健康状况评价结果较为可信。级别特征值是对各站位生态系统健康等级的精确描述,能够区分生态系统健康状况的优劣。

2.2.2 东山湾各站位生态系统健康水平分析

东山湾各站位生态系统健康指数平均值如图 3 所示。

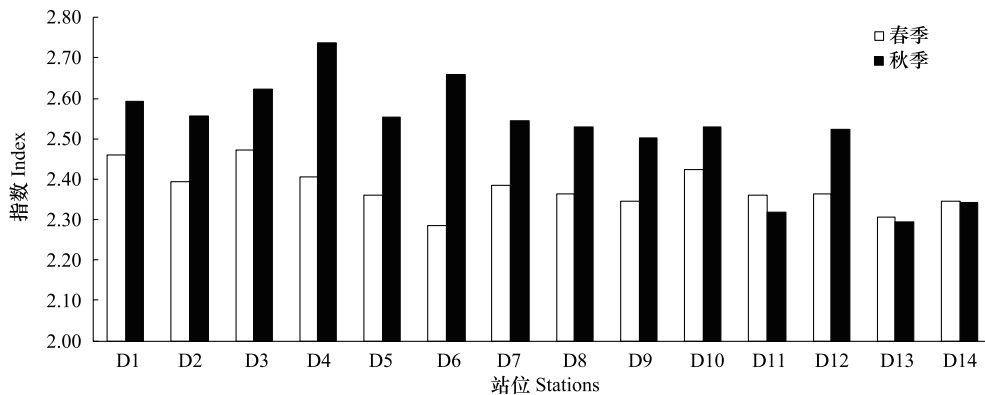


图 3 东山湾各站位生态系统健康指数

Fig.3 The scores of ecosystem health index scores in all stations of Dongshan Bay

由图 3 可见,春季东山湾各站位生态系统健康指数在 2.31—2.47 之间,所有站位生态系统健康均处于良

与中间,偏良水平。高值区主要为 D1(2.46)、D3(2.47)、D4(2.41)和 D10(2.42) 站位,其中 D1 和 D3 位于《福建省海洋功能区划(2011—2020 年)》^[10](后文简称“区划”)中划定的东山湾农渔业区,D4 位于区划划定的古雷工业与城镇建设区,D10 位于区划划定的东山湾港口航运区。

秋季东山湾各站位生态系统健康指数在 2.29—2.74 之间,其中 D11、D13 和 D14 站位生态系统健康处于良与中间、偏良水平,剩余站位生态系统健康处于良与中间、偏中水平。高值区主要为 D1(2.59)、D3(2.62)、D4(2.74)和 D6(2.66) 站位,其中 D1 和 D3 位于区划划定的东山湾农渔业区,D4 和 D6 位于区划划定的古雷工业与城镇建设区。

综合春秋季评价结果,D1(2.53)、D3(2.55)和 D4(2.57) 站位生态系统健康处于良与中间、偏中水平,剩余站位生态系统健康处于良与中间、偏良水平。高值区主要集中于区划划定的东山湾农渔业区和古雷工业与城镇建设区。处于湾口的 4 个低值区站位(D11、D12、D13 和 D14)临近东山珊瑚保护区,生态系统健康状况较好。除 D13 站位外,其余站位生态系统健康状况春季优于秋季。

2.2.3 东山湾生态系统健康综合评价结果

东山湾生态系统健康综合评价结果如图 4 所示。

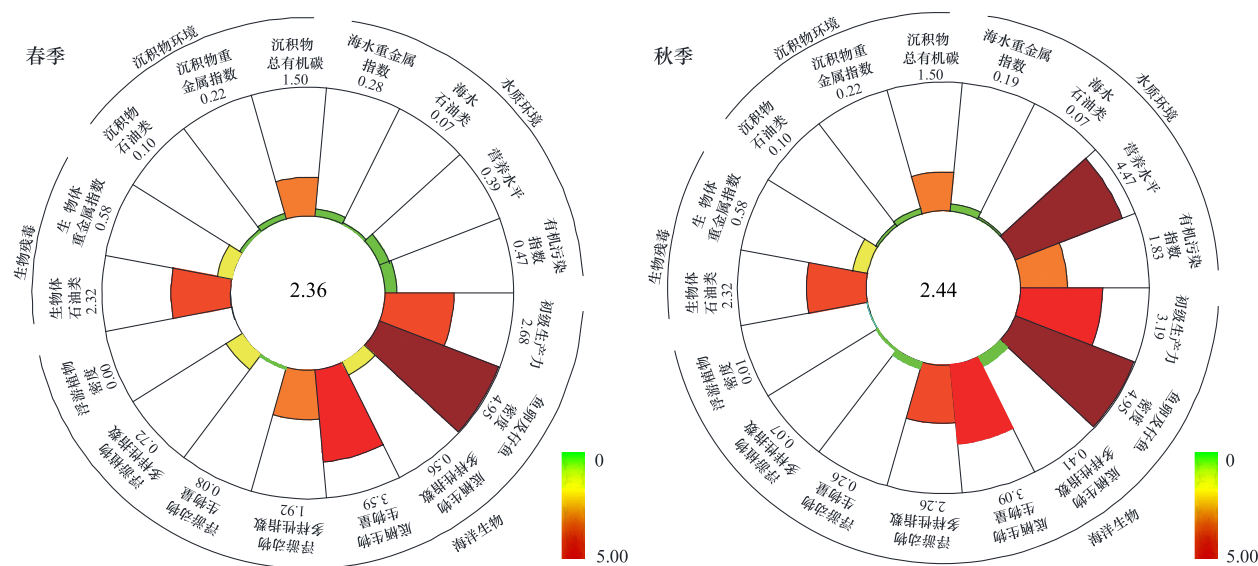


图 4 东山湾生态系统健康综合评价结果

Fig.4 The comprehensive evaluation results of ecosystem health assessment in Dongsan Bay

由图 4 可直观的看出,春秋季东山湾生态系统健康状况均处于良与中间、偏良水平,春季略优于秋季。影响春季东山湾生态系统健康状况的主要负面指标因子为鱼卵及仔鱼密度(健康指数为 4.95)和底栖生物生物量(健康指数为 3.59);影响秋季东山湾生态系统健康状况的主要负面指标因子为鱼卵及仔鱼密度(健康指数为 4.95)和营养水平指数(健康指数为 4.47)。

底栖生物生物量(C14)过低站位主要集中在航道周边和底质类型为砂和砾石,航道周边由于流急,不利于底栖生物栖息。秋季 D1、D2、D3 和 D5 站位营养水平指数(C2)明显高于其他站位,主要原因是其处于东山湾农渔业区,养殖饵料引起营养过剩。鱼卵及仔鱼密度(C16)是影响东山湾生态系统健康状况的首要负面指标因子,造成鱼卵及仔鱼密度下降的原因有很多,比如过度捕捞、港口活动、生境损失和环境污染等。现阶段将鱼类指标用于海湾生态系统健康评价的研究较少,但鱼类确实是表征海湾生态系统健康状况的重要指标^[32],本文将鱼卵及仔鱼密度纳入评价指标体系中较合理。

3 讨论与结论

正确地确定评价因子及其指标体系,是构建海湾生态系统健康评价模型的关键^[4]。因此有必要从众多

复杂的信息中筛选出与海湾生态系统内涵和评价目标相一致的指标,构建一个能全面反映海湾生态系统实际状态及生态系统内部联系的指标体系^[33-34]。本文指标体系的构建借鉴国内外相对成熟的近岸海域生态系统健康评价体系^[13-15],评价指标主要从生态系统结构与功能水平上进行选取,包括生物指标和非生物指标^[35],体现了指标选取应遵循的完整性和代表性原则。同时,根据东山湾海域的环境污染现状对评价指标体系进行适当调整,多数指标为常规监测指标,体现了指标选取应遵循的可取性和可比性原则。

将水质与海洋生物指标用于近岸海域生态系统健康评价有较多案例,如:美国切萨皮克湾^[36]、澳大利亚沿岸及大堡礁海域^[37]以及墨西哥东南部的沿海区域^[38]。由于近岸海域状况和监测资料的差异,评价指标应根据实际情况进行相应的调整。考虑到东山湾受陆源污染、渔业养殖和港口航运的影响,本文水质环境指标主要选取有机污染物、营养盐、重金属和石油类综合性的评价指标。有研究表明鱼类是表征海湾生态系统健康状况评价的重要指标^[39]。因此,本文海洋生物指标除了选取浮游植物、浮游动物、底栖生物和初级生产力等常规指标还增加了鱼类指标。

美国近岸海域状况评价体系^[13]和欧盟近岸海域生态质量状况评价体系^[14]中均包含沉积物环境和生物残毒指标。东山湾部分海域属于农渔业用海区域,为了保证水产养殖业健康发展,有必要将生物残毒指标列入东山湾生态系统健康评价指标体系中。结合东山湾海域环境污染特征,生物残毒指标主要包括重金属和石油类。沉积环境指标包括总有机碳、重金属和石油类。

对于海湾生态系统健康评价,指标权重值设置的合理性是决定评价结果可靠性的一个重要因素,本文采用考虑权重折衷系数的权重确定方法,将主观权重与客观权重相结合,使各种赋权方法的优点融为一体。本文东山湾生态系统健康评价指标体系中生物指标的权重值约为 0.6,符合国际上对近岸海域生态系统健康状况评价指标选取以生物指标为主的要求^[35]。在实际评价过程中,不同的海湾生态系统由于自然和人为活动影响的特殊性,产生的生态影响性质和程度也有所不同。因此有必要将主观权重与客观权重相结合,这样既可以反映一般海湾生态系统的共性,又可以反映不同评价海域的具体情况,以便得到更合理的评价结果^[40]。未来在海湾生态系统健康评价中如何更合理的确定评价指标权重折衷系数还需要根据实际情况进一步完善和调整。

本文评价指标标准值的确定,主要参考我国现行的质量标准与技术指南、国内外的研究成果中关于自然海区相关历史研究结果和专家咨询建议来设定。目前统一的评价标准可能忽略了不同研究区域背景的差异,导致评价结果的广泛适用性较差,尤其以海洋生物指标差异较显著。但不同区域标准值的确定是一个非常复杂的过程,我国海湾研究起步相对较晚,缺少详细的未受人为活动影响区域的历史监测数据,难以建立不同区域准确的参考标准值。故针对不同区域确定相应的参考标准值也是保证海湾生态系统健康评价结果合理性的重要部分^[41]。同时,本文研究结果为决策者提供了一个直观的标准量化依据,可为海洋生态文明建设提供技术支撑。通过海湾生态系统健康评估可找出海湾生态系统存在的环境问题,出台遏制近岸海域环境恶化的规划和行动计划,强化海洋污染防治与监管。有序推进受损海洋生态系统修复与恢复,探索开展提升海洋生态弹性和恢复力的生态建设工作;促进沿海地区经济发展方式转变。通过对海湾生态系统健康状况的了解,制定基于海洋资源环境承载力、符合海洋生态平衡要求的产业目录和发展指南。

本文将可变模糊评价模型应用于海湾生态系统健康评价中,同时采用模糊综合评价法对评价结果可信度进行验证分析。验证分析表明两种方法评价结果基本一致,仅秋季部分站位略有出入。分析其出现偏差的原因主要为模糊综合评价法采用最大隶属度原则进行等级的判定,导致在过渡生态系统健康级别归属问题上造成大量有用信息的丢失和同一级别范围内优劣差异难以体现。而基于可变模糊评价模型通过准则参数 α 和距离参数 p 的 4 种不同组合,将线性与非线性相结合,以级别特征值评价结果反映东山湾生态系统健康状况,该方法能够较客观精确地评价海湾生态系统健康状况的优劣,评价结果较为可信。此外,本文评价结果也与《2012 年福建省海洋环境状况公报》中“东山湾海洋环境质量整体良好”这一结论相吻合。

海湾生态系统健康评价方法正在不断的研究和发展中,然而迄今为止,还未有任何一种评估方法可以独

立地承担评估复杂生态系统(包括海湾生态系统)健康状况的重任^[42]。主要问题在于要做到因地制宜地选取指标和确定评价标准存在较大困难,这是目前相关研究的主要内容之一,也是海湾生态系统健康评价中值得关注的问题。同时,建立统一、长期的监测和预警体系也是我国海湾生态系统健康评价和管理的迫切需要。

参考文献 (References):

- [1] Halpern B S, Longo C, Hardy D, McLeod K L, Samhouri J F, Katona S K, Kleisner K, Lester S E, O'Leary J, Ranelletti M, Rosenberg A A, Scarborough C, Selig E R, Best B D, Brumbaugh D R, Chapin F S, Crowder L B, Daly K L, Doney S C, Elfes C, Fogarty M J, Gaines S D, Jacobsen K I, Karrer L B, Leslie H M, Neeley E, Pauly D, Polasky S, Ris B, St Martin K, Stone G S, Sumaila U R, Zeller D. An index to assess the health and benefits of the global ocean. *Nature*, 2012, 488(7413): 615-620.
- [2] Halpern B S, Walbridge S, Selkoe K A, Kappel C V, Micheli F, D'Agrosa C, Bruno J F, Casey K S, Ebert C, Fox H E, Fujita R, Heinemann D, Lenihan H S, Madin E M, Perry M T, Selig E R, Spalding M, Steneck R, Watson R. A global map of human impact on marine ecosystems. *Science*, 2008, 319(5865): 948-952.
- [3] Albayrak S, Balkis H, Zenetos A, Kurun A, Kuban C. Ecological quality status of coastal benthic ecosystems in the sea of Marmara. *Marine Pollution Bulletin*, 2006, 52(7): 790-799.
- [4] 戴本林, 华祖林, 穆飞虎, 徐宁, 贺玉龙. 近海生态系统健康状况评价的研究进展. *应用生态学报*, 2013, 24(4): 1169-1176.
- [5] Sherman K, Skjoldal H R. *Large Marine Ecosystems of the North Atlantic: Changing States and Sustainability*. Amsterdam: Elsevier Science Press, 2002.
- [6] Rombouts I, Beaugrand G, Artigas L F, Dauvin J C, Gevaert F, Goberville E, Kopp D, Lefebvre S, Luczak C, Spilmont N, Travers-Trolet M, Villanueva M C, Kirby R R. Evaluating marine ecosystem health: Case studies of indicators using direct observations and modelling methods. *Ecological Indicators*, 2013, 24: 353-365.
- [7] Dahiya S, Singh B, Gaur S, Garg V K, Kushwaha H S. Analysis of groundwater quality using fuzzy synthetic evaluation. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 147(3): 938-946.
- [8] 柯丽娜, 王权明, 孙新国, 孙才志, 周惠成, 王方雄. 基于可变模糊识别模型的海水环境质量评价. *生态学报*, 2013, 33(6): 1889-1899.
- [9] 刘修德. 福建省海湾数模与环境研究——东山湾. 北京: 海洋出版社, 2011.
- [10] 福建省人民政府. 福建省海洋功能区划(2011-2020年). http://www.fjof.gov.cn/_xxgk/tzgg/article.html?id=73571.
- [11] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 国家标准化管理委员会. 海洋监测规范(GB17378-2007). 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [12] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 国家标准化管理委员会. 海洋调查规范(GB/T12763-2007). 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [13] The United States Environmental Protection Agency (EPA). National Coastal Condition Report IV. <http://water.epa.gov/type/oceb/assessmonitor/nccr/index.cfm>.
- [14] The European Parliament and the Council of the European Union. On Criteria and Methodological Standards on Good Environmental Status of Marine Waters. <http://eur-lex.europa.eu/JOHtml.do?uri=OJ:L:2010:232:SOM:EN:HTML>.
- [15] 国家海洋局. 近岸海洋生态健康评价指南(HY/T087-2005). 北京: 中国标准出版社, 2005.
- [16] 蒋国昌, 王玉衡, 董恒霖, 唐仁友. 浙江沿海富营养化程度的初步探讨. *海洋通报*, 1987, 6(4): 38-46.
- [17] 国家环境保护总局. 环境影响评价技术导则 地面水环境(HJ/T2. 3-93). 北京: 中国标准出版社, 1993.
- [18] Cadée G C, Hegeman J. Primary production of the benthic microflora living on tidal flats in the dutch wadden sea. *Netherlands Journal of Sea Research*, 1974, 8(2-3): 260-291.
- [19] 张锐, 郑华伟, 刘友兆. 基于 PSR 模型的耕地生态安全物元分析评价. *生态学报*, 2013, 33(16): 5090-5100.
- [20] 叶属峰, 刘星, 丁德文. 长江河口海域生态系统健康评价指标体系及其初步评价. *海洋学报*, 2007, 29(4): 128-136.
- [21] 李建国, 刘金萍, 刘丽丽, 邵景安, 苏维词, 郭晴晴, 窦贤明, 程晓昀. 基于灰色极大熵原理的三峡库区(重庆段)生态系统健康评价. *环境科学学报*, 2010, 30(11): 2344-2352.
- [22] 王本德, 于义彬, 王旭华, 刘金禄. 考虑权重折衷系数的模糊识别方法及在水资源评价中的应用. *水利学报*, 2004, (1): 6-12.
- [23] 周荣喜, 范福云, 何大义, 邱莞华. 多属性群决策中基于数据稳定性与主观偏好的综合熵权法. *控制与决策*, 2012, 27(8): 1169-1174.
- [24] 国家环境保护总局. 海水水质标准(GB3097-1997). 北京: 中国标准出版社, 1998.
- [25] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 海洋沉积物质量(GB18668-2002). 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [26] 国家质量监督检验检疫总局. 海洋生物质量(GB18421-2001). 北京: 中国标准出版社, 2001.
- [27] 贾晓平, 杜飞雁, 林钦, 李纯厚, 蔡文贵. 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.
- [28] 况琪军, 马沛明, 胡征宇, 周广杰. 湖泊富营养化的藻类生物学评价与治理研究进展. *安全与环境学报*, 2005, 5(2): 87-91.
- [29] 王树功, 郑耀辉, 彭逸生, 陈桂珠. 珠江口淇澳岛红树林湿地生态系统健康评价. *应用生态学报*, 2010, 21(2): 391-398.

- [30] 陈守煜. 可变模糊集理论与模型及其应用. 大连: 大连理工大学出版社, 2009.
- [31] 卢振彬, 杜琦, 钱小明, 方民杰, 蔡清海, 许翠娅. 东山湾贝类养殖容量的估算. 台湾海峡, 2001, 20(4): 462-470.
- [32] Delpech C, Courrat A, Pasquaud S, Lobry J, Le Pape O, Nicolas D, Boet P, Girardin M, Lepage M. Development of a fish-based index to assess the ecological quality of transitional waters: the case of French estuaries. *Marine Pollution Bulletin*, 2010, 60(6): 908-918.
- [33] 孔红梅, 赵景柱, 姬兰柱, 陆兆华, 邓红兵, 马克明, 张萍. 生态系统健康评价方法初探. 应用生态学报, 2002, 13(4): 486-490.
- [34] Samhouri J F, Lester S E, Selig E R, Halpern B S, Fogarty M J, Longo C, Mcleod K L. Sea sick? Setting targets to assess ocean health and ecosystem services. *Ecosphere*, 2012, 3(5): article41.
- [35] Borja A, Bricker S B, Dauer D M, Demetriades N T, Ferreira J G, Forbes A T, Hutchings H, Jia X P, Kenchington R, Marques J C, Zhu C B. Overview of integrative tools and methods in assessing ecological integrity in estuarine and coastal systems worldwide. *Marine Pollution Bulletin*, 2008, 56(9): 1519-1537.
- [36] Williams M, Longstaff B, Buchanan C, Llanso R, Dennison W. Development and evaluation of a spatially-explicit index of Chesapeake Bay health. *Marine Pollution Bulletin*, 2009, 59(1-3): 14-25.
- [37] Haynes D, Brodie J, Waterhouse J, Bainbridge Z, Bass D, Hart B. Assessment of the water quality and ecosystem health of the Great Barrier Reef (Australia): conceptual models. *Environmental Management*, 2007, 40(6): 993-1003.
- [38] Herrera-Silveira J A, Morales-Ojeda S M. Evaluation of the health status of a coastal ecosystem in southeast Mexico: Assessment of water quality, phytoplankton and submerged aquatic vegetation. *Marine Pollution Bulletin*, 2009, 59(1-3): 72-86.
- [39] Sheaves M, Johnston R, Connolly R M. Fish assemblages as indicators of estuary ecosystem health. *Wetlands Ecology and Management*, 2012, 20(6): 477-490.
- [40] Halpern B S, Longo C, Mcleod K L, Cooke R, Fischhoff B, Samhouri J F, Scarborough C. Elicited preferences for components of ocean health in the California Current. *Marine Policy*, 2013, 42: 68-73.
- [41] Borja A, Dauer D M, Gremare A. The importance of setting targets and reference conditions in assessing marine ecosystem quality. *Ecological Indicators*, 2012, 12(1): 1-7.
- [42] 李晴新, 朱琳, 陈中智. 灰色系统法评价近海海洋生态系统健康. 南开大学学报: 自然科学版, 2010, 43(1): 39-43.