

山东半岛近岸海域生态系统健康综合评价

李 虎^{1,2}, 宋秀贤¹, 俞志明¹, 梁玉波³, 吴在兴^{1,2}

(1. 中国科学院 海洋研究所 海洋生态与环境科学重点实验室, 山东 青岛 266071; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 国家海洋环境监测中心, 大连 116023)

摘要: 为了构建基于多指标体系的生态系统健康评价方法, 作者在调研了大量国内外文献的基础上, 通过实证研究和量化分析, 对山东半岛近岸海域生态系统健康的现状做出了较为客观的评价。在综合考虑影响海洋生态系统健康的各种因素的基础上, 构建了山东半岛近岸海域生态系统健康评价指标体系, 从陆源压力、水质状态和生物响应 3 个方面对山东半岛近岸海域生态系统健康和环境压力进行分析。结果显示: 2006 年山东半岛近岸海域生态健康状况基本呈现由外海到近岸逐渐变差的态势, 其中生态健康状况较差的海域主要集中在莱州湾西南部、烟台北部海域、威海的沿岸海域以及山东半岛东南部海域。

关键词: 海洋生态系统健康; PSR 框架; 综合评价; 山东半岛

中图分类号: X826 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2014)10-0040-06

doi: 10.11759/hyxx20130313002

目前, 海洋生态系统健康问题已经成为困扰世界沿海国家的首要环境问题之一。为了深化对海洋生态健康状况问题的认知, 国际上已经有不少学者尝试建立海洋生态系统健康的监测、评价和管理体系^[1-3]。中国的生态系统健康评价研究起步较晚, 目前主要针对的是水质、富营养化、生物多样性等单一要素的评价^[4, 5], 然而海洋生态系统是一个庞大的、各个要素关联交错的复合体, 因此这些单一要素的评价通常缺乏对海洋生态健康状况的总体把握。所以, 单一要素的评价体系已经不能满足中国海洋生态综合管理的需求, 亟须建立一套符合中国海域特点的海洋生态系统健康评价体系。

山东半岛区位优势优越, 海洋生物资源和土地资源丰富, 是中国东部沿海发展潜力最大的地区之一。然而随着区域经济的快速发展, 山东半岛的海洋生态环境正承受着巨大的环境压力, 沿岸海域的生态系统健康受到严重威胁。为此, 作者在借鉴近年来国外海洋生态系统健康评价方法的基础上, 结合山东半岛的地域特点和国内外现有的环境评价标准, 较为客观地评价山东半岛近海的生态系统健康状况, 旨在为山东省“蓝区”的发展决策提供指导性的建议。

1 海洋生态系统健康评价方法

1.1 研究区域

山东半岛幅员辽阔, 境内大部分是波状丘陵地

形, 平原、盆地交错罗列其间; 其拥有 3 122 km 的海岸线, 滩涂广袤, 海洋生物资源和土地资源十分丰富。作者选择了受陆源压力影响较大的近岸海域作为评价区域, 其地域跨度较大, 北起山东半岛西北部的黄河入海口, 南至山东半岛东南部的琅琊湾, 涵盖了山东半岛沿岸较大的典型河口、海湾及其邻近海域(由于妃姆角附近海域数据比较缺乏, 不足以支撑该海域的生态健康评价, 本文评价过程中予以剔除), 研究范围如图 1 阴影部分所示。

1.2 数据来源

本文的数据主要来源于 2006 年中国近岸海域“908”专项调查中山东半岛近岸海域的生物生态与化学调查资料, 调查项目包括水质数据(营养盐、重金属和石油类等)和生物数据(浮游植物、浮游动物和底栖生物等)。此外还对山东半岛的社会和经济发展等资料进行了广泛的调查, 内容主要涉及沿岸污染物排放和海岸工程调查等。其中, 近岸海域的生物生态与化学监测按照 2007 年发布的《海洋监测规范》

收稿日期: 2013-03-13; 修回日期: 2013-03-27

基金项目: 国家海洋局公益项目(201205001); 国家 973 项目(2010 CB428706); 山东省“两区”建设专项资金支持项目

作者简介: 李虎(1989-), 男, 山东省滕州人, 硕士研究生, 主要从事海洋生态系统健康评价研究, 电话: 0532-82898985, E-mail: lihu8918@163.com; 宋秀贤, 通信作者, E-mail: songxx@qdio.ac.cn

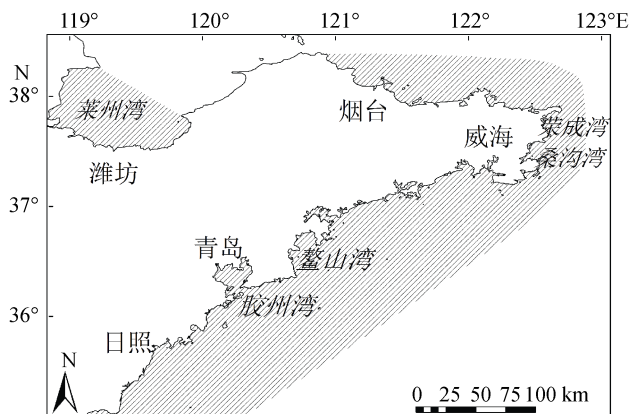


图 1 山东半岛生态系统健康评价海域范围

Fig.1 Maritime area of assessment of marine ecosystem health along the Shandong Peninsula

内的有关内容执行^[6]。

1.3 评价指标和标准

在实际的评价过程中,评价指标的筛选往往需要一个理论和实证上都行得通的概念模型^[7]。作者选用了应用最广泛的 Pressure-State-Response(PSR)模型,以山东半岛地域特点和现有资料为基础,构建了山东半岛近海生态系统健康评价指标体系。该指标体系主要由陆源压力、水质状态和生物响应 3 大类 16 个指标构成(表 1)。

各个指标的评价标准是生态系统健康评价的基础,根据欧盟水框架指令(Water Framework Directive, WFD)的定义,参考标准是指各个环境要素不受到或者极其微弱地受到人类活动干扰时的一种状态^[8]。目前,各个国家和地区的参考标准并不统一,确定参考标准的方法也不尽相同。作者对于参考标准的确定(表 1),主要基于对相关国家标准和研究成果的分析,水质状态和生物响应指标的参考标准主要参考了国家海洋局发布的《近岸海洋生态健康评价指南》以及由国家环境保护局和国家海洋局共同发布的《海水水质标准》,而陆源压力指标的参考标准则主要参考了《地表水环境质量标准》以及有关文献对于近岸海域污染物总量控制和分配方法的研究成果^[9-12]。

1.4 EQR 指数

为了量化生态系统的健康状况, WFD 提出了“Ecological Quality Ratio”指数,该指数被表述为处于 0~1 之间的一个数值,其中 1 表示生态系统健康状况良好,而 0 则表示生态系统健康状况恶劣^[13]。目前已经有一些国外研究机构和学者尝试对海洋生态健

表 1 山东半岛沿岸海域生态系统健康评价指标体系及评价标准

Tab.1 Indicators and criteria for assessment of marine ecosystem health along the Shandong Peninsula

评价要素	评价指标	评价标准
陆源压力	总氮排放量(+)	20 t/10 ⁸ m ³
	总磷排放量(+)	2 t/10 ⁸ m ³
	重金属排放量(+)	12 t/10 ⁸ m ³
	COD 排放量(+)	1500 t/10 ⁸ m ³
水质状态	COD(+)	2 mg/L
	溶解态无机氮(+)	0.2 mg/L
	溶解态无机磷(+)	0.015 μg/L
	汞(+)	0.05 μg/L
	镉(+)	1 μg/L
	石油类(+)	50 μg/L
	生物响应	底层溶解氧(-)
叶绿素 a(+)		1 μg/L
浮游植物密度(+)		1087500 尾/m ³
浮游动物密度(-)		21083 尾/m ³
底栖动物密度(-)		500 尾/m ²
鱼卵仔鱼密度(-)		50 尾/m ³

注: (+)表示成本型指标, (-)表示效益型指标

康状况做出了评价,其中比较知名的是赫尔辛基委员会(HELCOM)对波罗的海生态健康评价,以及 Borja 等^[14]对比斯开湾附近海域生态健康状况作出的评价。其中前者在富营养化评价、生物多样性评价以及有毒有害物质评价的基础上建立了针对海洋生态系统健康的评价方法(HOLAS),其对 EQR 指数的计算过程简单明了,作者借鉴了其评价方法的框架。

赫尔辛基委员会(HELCOM)将评价指标分为两类,分别为成本型指标(Positive Response Indicator)和效益型指标(Negative Response Indicator)。其中,成本型指标是指生态健康状况恶化过程中,其监测值逐渐增大,称为成本型指标;反之,则成为效益型指标。赫尔辛基委员会为这两种指标的 EQR 指数设计了简单的计算方法,对于成本型指标:

$$EQR_i = Refcon / AcStat \quad (1)$$

$$0 \leq EQR_i \leq 1 \quad (2)$$

其中, EQR_i 为第 i 个成本型评价指标的生态质量指数, Refcon 为第 i 个评价指标的参考标准值(Reference Condition), AcStat 为第 i 个评价指标的实际监测值(Actual Status)。对于一个成本型指标,规定其 EQR 值可达到的最大值为 1,即当实际监测值小于参考标准时规定其 EQR 值为 1。由于参考标准为固定值,所以对于成本型指标的监测值越大, EQR 指数越小,其

反映的生态健康状况越差。

同理，对于效益型指标：

$$EQR_j = AcStat / Refcon \quad (3)$$

$$0 \leq EQR_j \leq 1 \quad (4)$$

其中， EQR_j 为第 j 个效益型评价指标的生态质量指数， $Refcon$ 为第 j 个评价指标的参考标准值， $AcStat$ 为第 j 个评价指标的实际监测值。同样，规定其 EQR 值可达到的最大值为 1，当参考标准小于实际监测值时规定其 EQR 值为 1。对于效益型指标，其监测值越小， EQR 指数越小，反映的生态健康状况越差。

1.5 确定评价边界

作者对生态系统健康划分为优/良/中/差/劣 5 个等级，分别以蓝/绿/黄/橙/红 5 种颜色标识。参照 Andersen 等^[15]的方法，作者引入容许偏差(Acceptable Deviation)的概念来划分评价等级良/中之间的边界，即对于一个评价指标，在确定参考标准的同时给定一个评价者或者决策者可以接受的变动范围(以百分比计)，如果该指标在给定的变动范围内，则认为其可以被评为优/良。结合国内外评价指标阈值的确定方法^[16, 17]，对于成本型指标，通常给定+50%作为对参考标准的容许偏差，即如果监测值超出参考标准的部分小于参考标准的 50%，则认为是可接

受的；而对于效益型指标，通常给定-25%作为对参考标准的容许偏差(底栖软体动物的容许偏差变动幅度要大一些，-27%~40%)。当然，这些“+50%”和“-25%”原则在评价过程中的应用只是根据文献或经验值确定的，需要在未来的研究工作中进一步讨论和验证。目前，在符合国内外相关规定的情况下，从实用性的角度考虑，这些原则仍然是非常有意义的。

图 2a、图 2b 分别表示给定成本型和效益型指标不同的容许偏差，其所对应的不同的评价等级边界。对于成本型指标，如果将其实际监测值改写为公式(5)，那么将公式(5)代入公式(1)，可得公式(6)：

$$AcStat = (1 + AcDev) \times Refcon \quad (5)$$

$$EQR_{良/中} = 1 / (1 + AcDev) \quad (6)$$

结合给定的容许偏差，可以确定出评价指标良/中之间的边界。对于差/劣之间的边界，采用公式(7)计算：

$$1 - EQR_{良/中} = EQR_{良/中} - EQR_{差/劣} \quad (7)$$

而对于优/良和中/差边界可以利用公式(8)和公式(9)计算：

$$EQR_{优/良} = (1 + EQR_{良/中}) / 2 \quad (8)$$

$$EQR_{中/差} = (EQR_{良/中} + EQR_{差/劣}) / 2 \quad (9)$$

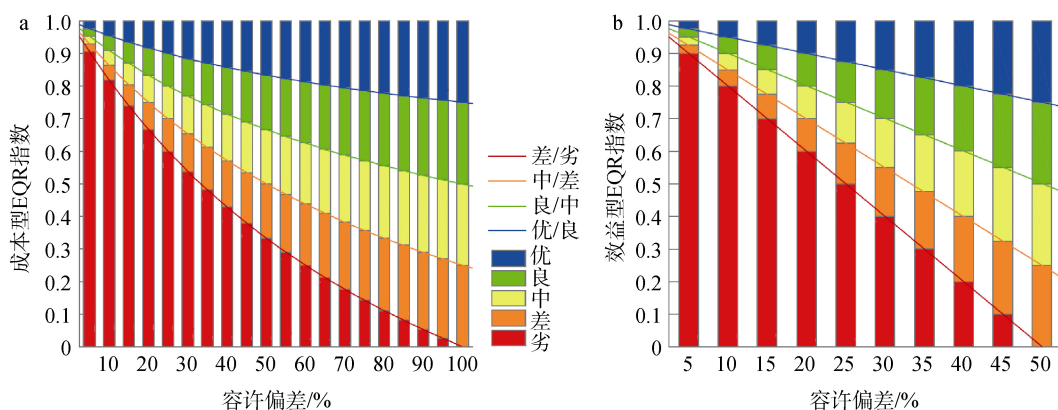


图 2 成本型和效益型指标评价等级划分方法

Fig.2 Method for setting class boundary of positive and negative response indicator

2 结果与讨论

2.1 生态系统健康特征参数的探索性数据分析

目前，探索性数据分析已被广泛地应用于河流、湖泊和近岸海域的水质及富营养化评价、污染物来源等环境质量评价的研究中^[18, 19]。作者利用主成分分析和典型相关分析对山东半岛近岸海域生态系统

健康特征进行研究，以此分析生态系统中生物因素与物理化学因素之间的关系，同时找出控制山东半岛近岸海域生态系统健康的关键因素，为生态调控决策提供科学依据。

首先，对水质状态和生物响应的 12 个指标做相关性分析，结果显示各指标之间存在较高的相关性，可以利用主成分分析进行降维。按照特征根 ≥ 1 的标准提取出 4 个主成分，能够解释 12 个原始变量所包

含信息的 75.4%。表 2 给出了各指标的因子载荷以及各个主成分的累积方差贡献率, 从表 2 中可以看出, 第一主成分(PC1)包含了原始信息的 25.4%, 其在 COD、DIN、DIP、叶绿素 a 参数上有较高载荷, 主要反映了营养盐以及初级生态响应的状况; 第二主成分(PC2)包含了原始信息的 20.1%, 其在重金属镉污染、浮游动物和鱼卵仔鱼参数上有较高载荷, 主要反映了重金属污染以及次级生态响应的状况; 第三主成分(PC3)包含了原始信息的 17.6%, 其在底层溶解氧、大型底栖生物上有较高载荷, 主要体现了底栖环境状况; 第四主成分(PC4)包含了原始信息的 12.3%, 其在重金属 Hg、浮游植物上有较高载荷, 主要反映重金属汞污染和浮游植物生物量特征。通过以上分析发现, 影响山东半岛近岸海域生态系统健康的因素主要有营养盐、重金属、浮游生物和底栖环境特征, 从这几个方面能够比较正确地监测、评价山东半岛近岸海域的生态系统健康状况。

表 2 因子载荷与解释方差

Tab.2 Factor loadings and total explained variance

评价指标	主成分			
	PC1	PC2	PC3	PC4
COD	0.399	-0.014	0.065	-0.422
DIN	0.410	-0.288	0.153	0.329
DIP	0.432	-0.305	0.251	0.090
Hg	0.093	0.209	0.095	-0.544
Cd	0.240	0.443	0.225	0.314
Oil	-0.232	0.263	0.224	0.125
DO(底层)	0.026	0.300	-0.430	0.168
Chl-a	0.483	-0.062	-0.233	-0.054
浮游植物	-0.108	-0.254	-0.112	0.403
浮游动物	0.253	0.385	-0.330	-0.042
底栖生物	-0.104	0.076	0.616	-0.118
鱼卵仔鱼	0.213	0.450	0.242	0.294
累积贡献率(%)	25.4	45.5	63.1	75.4

对参与山东半岛近岸海域生态健康评价的水质状态和生物响应两组 12 个指标进行典型相关分析, 结果显示第一组典型变量(V1, W1)和第二组典型变量(V2, W2)具有显著的相关关系, 其典型相关系数分别为 0.9806 和 0.8404。图 3 以折线图的形式比较直观地展示了第一组和第二组典型变量对应的典型负载系数, 可以看出, 第一组典型变量中 DIP、重金属镉、大型底栖生物、鱼卵仔鱼的负载系数相对较大, 这说明 DIP、重金属镉是水质状态(V1)的主要指标, 而大型底栖生物、鱼卵仔鱼是生物响应指标(W1)

中与水质状态相关的主要指标, 并且 DIP、重金属镉与大型底栖生物、鱼卵仔鱼均成正相关关系; 第二组典型变量中 DIN、重金属镉、叶绿素 a、鱼卵仔鱼的负载系数较大, 这说明 DIN、重金属镉是水质状态(V2)的主要指标, 而叶绿素 a、鱼卵仔鱼是生物响应指标(W2)中与水质状态相关的主要指标, 并且 DIN 与叶绿素 a 成正相关关系, 而 DIN 与鱼卵仔鱼、重金属镉与叶绿素 a 均成负相关关系。

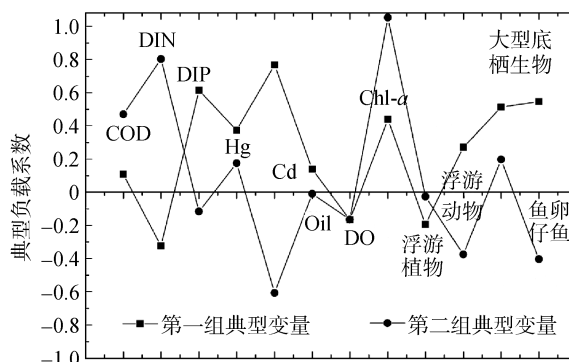


图 3 第一组和第二组典型变量的典型负载系数

Fig.3 Canonical coefficients for the first and second groups of canonical variates

2.2 综合评价结果

本文使用赋权平均的方法计算最终的生态系统健康评价结果, 对于山东半岛近岸海域生态系统健康状况, 计算最终的 EQR 指数如下:

$$EQR = \sum W_i \cdot EQR_i \quad (10)$$

其中, EQR_i 是每个评价指标的 EQR 值, W_i 是每个指标对应的权重(表 3)。确定评价指标权重的方法有很多, 如层次分析法、熵权法等, 作者使用熵权法这一客观赋权法, 详细的计算方法参考邹志红等^[20]的研究。利用 2006 年的调查数据, 山东半岛近岸海域生态系统健康评价结果如图 4 所示。

表 3 熵权法确定的各个评价指标权重

Tab.3 Weights of assessment indicators established by entropy method

评价指标	权重	评价指标	权重
总氮排放量	0.032454	镉	0.049685
总磷排放量	0.035964	石油类	0.1679
重金属排放量	0.030318	底层溶解氧	0.036484
COD 排放量	0.021263	叶绿素 a	0.12426
COD	0.11781	浮游植物密度	0.10529
溶解态无机氮	0.060294	浮游动物密度	0.022685
溶解态无机磷	0.082477	底栖动物密度	0.041813
汞	0.045171	鱼卵和仔鱼密度	0.026139

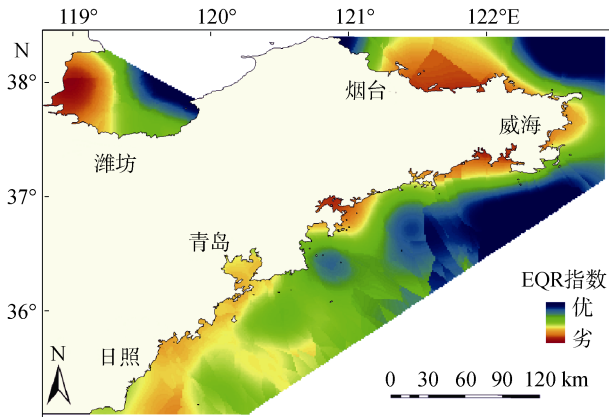


图4 山东半岛近岸海域生态系统健康评价结果

Fig.4 Assessment result of marine ecosystem health in coastal waters along the Shandong Peninsula

由图4可以看出,山东半岛近岸海域生态健康状况基本呈现由外海到近岸逐渐变差的态势,其中生态健康状况较差的海域主要集中在莱州湾西南部、烟台北部海域、威海的沿岸海域以及山东半岛东南部海域。对莱州湾海域的数据对比分析发现,致使莱州湾西南部海域生态健康恶化的主要原因是叶绿素 a 超标严重以及鱼卵仔鱼种类和数量严重偏低,而致使烟台、威海近岸海域生态健康状况较差的原因是石油类的严重超标,其最高质量浓度可达 0.133mg/L 。分析造成烟台、威海近岸海域石油类物质超标的可能原因:一方面上述海域油田管道和海上钻井平台密布,在石油勘探、开采过程中不可避免地会有石油的溢露;此外,该海域是进出渤海的重要航道,来往船只频繁,偶发的船只碰撞事故以及船舶行驶过程中都有可能向海水中排放石油类物质。对日照海域数据分析发现,该海域浮游植物丰度偏高,且浮游动物丰度偏低,其中浮游植物丰度最高可达 347.6×10^5 尾/ m^3 ,而浮游动物丰度均值仅为 637.8 尾/ m^3 ,这两者的异常是造成该海域生态健康状况偏差的主要原因。受附近陆地河流输入、黄海沿岸流以及黄海暖水团的影响,不同洋流的交会为该海域带来了丰富的营养盐,从而给浮游植物繁殖带来有利条件,导致浮游植物丰度偏高;而浮游动物丰度偏低可能与海州湾渔场的鱼群大量索饵有关。

从整体上看,叶绿素 a 、浮游动物和鱼卵仔鱼密度的评价结果较差,尤其是鱼卵仔鱼密度,在山东半岛沿岸所有采样站位中,鱼卵仔鱼密度这一指标均被评为差级。陆源污染、海水养殖、过度捕捞等关键致害因素已经造成山东半岛沿岸海域“海洋荒漠化”现象越来越严重,局部海域鱼类等生物资源退

化、生态功能衰退。“蓝区”的建设和开发过程中,必须充分考虑到海洋生态系统的承载能力,否则山东半岛海洋生态健康恶化的趋势将不会得到有效遏制。

3 结论

利用PSR模型的原理构建了山东半岛近岸海域生态系统健康评价指标体系,结合国内外的评价方法,建立了符合中国海域特点的海洋生态系统健康评价模型。

对山东半岛近岸海域生态系统健康特征参数做了探索性数据分析,分析了生态系统中生物因素与物理化学因素之间的关系,同时找出了控制山东半岛近岸海域生态系统健康的关键因素。

对山东半岛近岸海域生态健康状况做出了较为客观的评价,评价结果表明,山东半岛近岸海域生态健康状况基本呈现由外海到近岸逐渐变差的态势。整体上看,叶绿素 a 、浮游动物和鱼卵仔鱼是导致山东半岛近岸海域生态健康恶化的主要因素。

参考文献:

- [1] ICES. Report of the regional ecosystem study group of the North Sea (REGNS) [R]. Copenhagen: ICES, 2006: 111.
- [2] HELCOM. Ecosystem health of the Baltic Sea 2003–2007: HELCOM Initial Holistic Assessment [R]. Balt: Sea Environ Proc, 2010: 122.
- [3] OSPAR. Status report on the OSPAR network of marine protected areas [R]. London: OSPAR, 2011: 548.
- [4] 吴迪,王菊英,马德毅,等. 基于PSR框架的典型海湾富营养化综合评价方法[J]. 海洋与湖沼通报, 2011, 1: 131-136.
- [5] 王俊. 莱州湾浮游植物种群动态研究[J]. 海洋水产学报, 2000, 21(3): 33-38.
- [6] 国家海洋局. GB 17378-2007 海洋监测规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [7] Borja A, Dauer D M. Assessing the environmental quality status in estuarine and coastal systems: comparing methodologies and indices [J]. Ecological Indicators, 2008, 8(4): 331-337.
- [8] Anonymous. Directive 2000/60/EC of the European parliament and of the council establishing a framework for the community action in the field of water policy [J]. Official Journal of the European Communities, 2000, 327: 1-72.

- [9] 国家海洋局. HY/T 087-2005 近岸海洋生态系统健康评价指南[S]. 大连: 国家海洋环境监测中心, 2005.
- [10] 国家保护环境局. GB 3097-1997 海水水质标准[S]. 北京: 国家环境保护局, 1998.
- [11] 国家环境保护局. GB 3838-2002 地表水环境质量标准[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [12] 王芳. 近岸海域污染物总量控制方法及应用研究[D]. 天津: 天津大学, 2008.
- [13] Anonymous. Monitoring under the water framework directive: common implementation strategy for the water framework directive guidance document [R]. Brussels: European Commission, 2002: 153.
- [14] Borja A, Bald J, Franco J, et al. Using multiple ecosystem components, in assessing ecological status in Spanish (Basque Country) Atlantic marine waters [J]. Marine Pollution Bulletin, 2009, 59(1-3): 54-64.
- [15] Andersen J H, Axe P, Backer H, et al. Getting the measure of eutrophication in the Baltic Sea: towards improved assessment principles and methods[J]. Biogeochemistry, 2010, 106(2): 137-156.
- [16] 王保栋, 韩彬. 近岸生态环境质量综合评价方法及其应用[J]. 海洋科学进展, 2009, 27(3): 400-404.
- [17] Zeng C, Liu Y L, Liu Y F, et al. An integrated approach for assessing aquatic ecological carrying capacity: a case study of Wujin district in the Tai Lake Basin, China [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2011, 8: 264-280.
- [18] Vega M, Pardo R, Barrado E, et al. Assessment of seasonal and polluting effects on the quality of river water by exploratory data analysis[J]. Water Research, 1998, 32(12): 3581-3592.
- [19] 柴超, 俞志明, 宋秀贤, 等. 长江口富营养化特性的探索性数据分析[J]. 环境科学, 2007, 28(1): 53-58.
- [20] 邹志红, 孙靖南, 任广平. 模糊评价因子的熵权法赋权及其在水质评价中的应用[J]. 环境科学学报, 2005, 25(4): 552-556.

An integrative assessment of marine ecosystem health in coastal waters along the Shandong Peninsula

LI Hu^{1, 2}, SONG Xiu-xian¹, YU Zhi-ming¹, LIANG Yu-bo³, WU Zai-xing^{1, 2}

(1. Key laboratory of Marine Ecology and Environmental Science, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. National Marine Environmental Monitoring Center, Dalian 116023, China)

Received: Mar., 13, 2013

Key words: Marine ecosystem health; the PSR framework; integrative assessment; the Shandong Peninsula

Abstract: Based on extensive literature research, this article aims to make an objective assessment of marine ecosystem health along the Shandong Peninsula, through empirical research and quantitative analysis. Based on a variety of possible factors that exert pressures on the marine ecosystem health, an indicator system for assessment of marine ecosystem health in coastal waters along the Shandong Peninsula was constructed, and both the ecological status and environmental pressures were analyzed from the aspects of terrigenous pressures, water quality and biological response. The results showed that generally, the ecological status displayed a declining trend from open seas to coastal waters along the Shandong Peninsula in the year 2006, and the maritime areas with poor environmental performance were located mainly in the southwest of Laizhou Bay, northern Yantai, offshore waters of Weihai and the southeast of Shandong Peninsula.

(本文编辑: 谭雪静)