

Doi :10.11840/j.issn.1001-6392.2017.01.014

河北省曹妃甸近岸海域春季生态系统健康现状评价

程林¹, 王欣平^{2,4}, 王艳霞¹, 田海兰¹, 石雅君³, 刘西汉^{1,3}

(1. 河北省科学院地理科学研究所, 河北 石家庄 050021; 2. 河北师范大学 资源与环境科学学院 河北省环境演变与生态建设实验室, 河北 石家庄 050024; 3. 中国科学院烟台海岸带研究所 中国科学院和山东省海岸带环境过程重点实验室, 山东 烟台 264003; 4. 天津海景科技有限公司, 天津 300384)

摘 要: 基于 2014 年 5 月的现场调查, 从水质、底质和生物三个方面构建了曹妃甸近岸生态系统的健康评价指标体系, 利用模糊综合评价法评价曹妃甸近岸海域各站点健康水平和综合健康水平。评价结果显示: 底质优于水质和生物, 综合健康评价结果为亚健康。采用反距离权重 (IDW) 空间插值法绘制的水质、底质和生物的健康状况空间分布图以及综合健康水平空间分布图。水质、底质和生物的健康水平空间变化趋势差别较大, 综合健康分布图反映出研究区西侧比东侧污染更为严重的现状。

关键词: 综合健康指数; 生态系统健康评价; 反距离权重空间插值; 曹妃甸近岸海域

中图分类号: P76 文献标识码: A 文章编号: 1001-6932(2017)01-0107-07

Nearshore ecosystem health assessment for the coastal area of Caofeidian of Hebei Province in spring

CHENG Lin¹, WANG Xin-ping^{2,4}, WANG Yan-xia¹, TIAN Hai-lan¹, SHI Ya-jun³, LIU Xi-han^{1,3}

(1. Institute of Geographical Science, Hebei Academy of Science, Shijiazhuang 050021, China; 2. College of Resource and Environmental Science, Hebei Normal University, Hebei Key Laboratory of Environmental Change and Ecological Construction, Shijiazhuang 050024, China; 3. Key Laboratory of Coastal Environmental processes and Ecological Remediation, Yantai Institute of Coastal Zone Research, China Academy of Sciences, Yantai 264003, China; 4. Tianjin Marinfo Technology Co., Ltd, Tianjin 300384, China)

Abstract: Based on the field site investigation data in May 2014, Caofeidian nearshore ecosystem health assessment index system was built from three aspects including the water quality, the sediments and the biology. This paper evaluated health level and the comprehensive health level of each site in Caofeidian offshore area by using the fuzzy comprehensive evaluation method. The results show that the bottom environment is the best, and the water environment is better than the biological environment. The comprehensive health level is sub-health. In order to directly show the spatial distribution of ecological health status in Caofeidian offshore area, this paper draws the space distribution maps of health level of the water, the sediments, the biology and the comprehensive health level by using the spatial interpolation method of inverse distance weighting (IDW). It shows that the health level spatial variation trend of the water environment, the sediment environment and the biological environment has great difference. The comprehensive health spatial distribution map reflects that the pollution status in the west of the study area is more serious than that in the eastern side.

Keywords: comprehensive health index; ecosystem health assessment; spatial interpolation method of IDW; nearshore area in Caofeidian

收稿日期: 2015-09-18; 修订日期: 2015-12-31

基金项目: 河北省科学院科技计划项目 (14008013); 中国科学院院地合作项目。

作者简介: 程林 (1985-), 硕士, 研究方向为自然地理学, 海洋防灾减灾。电子邮箱: Chinachenglin@126.com。

通讯作者: 王欣平 (1987-), 硕士研究生, 研究方向为 GIS 应用与遥感影像处理。电子邮箱: wangxp0707@163.com。

<http://hytb.nmdis.org.cn>

近岸海域是海洋动力和沿岸陆地活动相互作用的地区,是具有海陆过渡性的特殊生态系统,提供丰富的能源和资源,与人类的生存和发展息息相关,受到人类活动的强烈干扰。近年,人们对近岸和海域开发利用强度与日俱增。围填海、滨海工业建设、过度捕捞以及陆源污染物排放导致近岸湿地和耕地大面积丧失、渔业资源可捕捞量逐渐减少、近岸海域富营养化日益严重。近岸生境的破坏,直接影响着沿海地区环境可持续发展,引起科学界广泛关注。对于作为生态脆弱区的近海生态系统,必须及时对其健康状态进行评估和分析,提出相应的治理方案,以避免重大生态问题的出现,维持近海健康与人类社会经济的和谐发展。

有关生态系统健康的研究始于 20 世纪 80 年代,加拿大学者 Rapport (1989) 首次将健康一词由医学范畴引入生态系统中,并提出了“生态系统医学”一词。21 世纪初我国开始关注生态系统健康,提出不同生态系统要采用不同的评价方法(孔红梅等,2002),并建立了湿地(崔保山等,2001)、河流(唐涛等,2002)、森林(肖风劲等,2003)、海洋(杨建强等,2003;叶属峰等,2007)和湖泊(刘永等,2004)等生态系统的健康评价方法。国际上,海洋生态系统健康评价主要采用指示物种法和指标体系法。在我国,海洋生态系统健康评价还属于一个新兴的课题,尚未形成一套成熟的评价体系,大多数研究者在海洋健康评价的过程中,侧重对污染物的监测,缺乏对生态指标的监测,评价指标过于单一。本文基于曹妃甸近岸生态系统自身特点,采用指标体系法,从水质环境、底质环境、生物环境三方面搭建了生态健康评价指标体系对曹妃甸近岸海域春季生态系统健康状况进行评价。

1 研究区概况与数据获取

1.1 研究区域

曹妃甸位于渤海湾西岸,近岸海域潮汐性质属于不规则半日潮,平均潮差为 1.54 m;潮流为往复流,涨潮流自东向西流,落潮流自西向东流,涨潮最大流速 1.24 m/s,落潮最大 0.94 m/s;常浪向为 S、SE,平均波高达 0.7~1.1 m;底质沉积物主要为粉砂质粘土、粘土质粉砂和粉砂,局部为细砂(陆永

军等,2007;季荣耀等,2011;龚政等,2012)。曹妃甸南部为深槽,并已成为重要的航道;北侧是宽阔的浅滩,平均水深不足 0.5 m,面积达 1 100 km²。宽浅开阔的滩地为海洋生物提供了良好的生存场所和栖息地,海域生物种类丰富,有浮游植物 47 种,浮游动物 64 种,底栖动物 53 种(索安宁等,2012)。自 2003 年开始围填海(李秀梅等,2013),到 2020 年预计建成区面积达到 230 km²(于永海等,2013)。随着围填海面积不断扩大,曹妃甸海岸带自然属性被改造程度日益加深,由此带来海岸线增长,潮间带宽度减少(方成等,2014)、近岸冲於环境改变、洪水、生物多样性损失等一系列严重后果(周维海,2010)。为了促进曹妃甸工业区对海洋资源的合理利用,防止过度开发引发自然灾害和投资浪费,处理好人类开发与近岸健康的矛盾关系,亟需对曹妃甸近岸开展生态健康评价。

1.2 数据获取

2014 年 5 月,开展曹妃甸近岸海域调查,对曹妃甸近岸海域内 12 个站点的水质、沉积物、海洋生物进行了调查采样,站点空间位置及名称见图 1。调查过程严格按照《海洋调查规范》(GB/T 12763, 2007)进行,对近海水体、生物和沉积物进行样品的采集和分析,保证采样过程的科学性和分析结果的准确性。

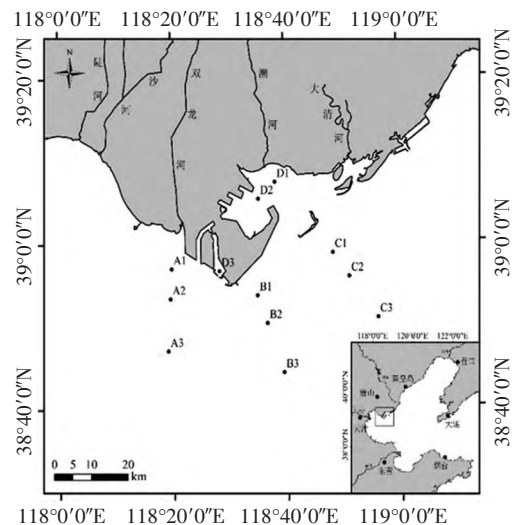


图 1 曹妃甸站点分布图

2 研究方法

2.1 评价指标体系的构建

目前,在近岸海域生态健康评价中应用较为普

遍的方法，有欧盟近岸生态质量综合评价方法 (European Commission, 2003) 和美国近海生态综合评价方法 (U.S. Environmental Protection Agency, 2001)。参考以上两种方法，遵循整体性、代表性、规范化、简明性和可操作性原则 (祁帆等, 2004)，结合已有的实测数据，从水质、底质、生物 3 个方面构建曹妃甸近岸海域生态健康评价指标体系 (图 2)。

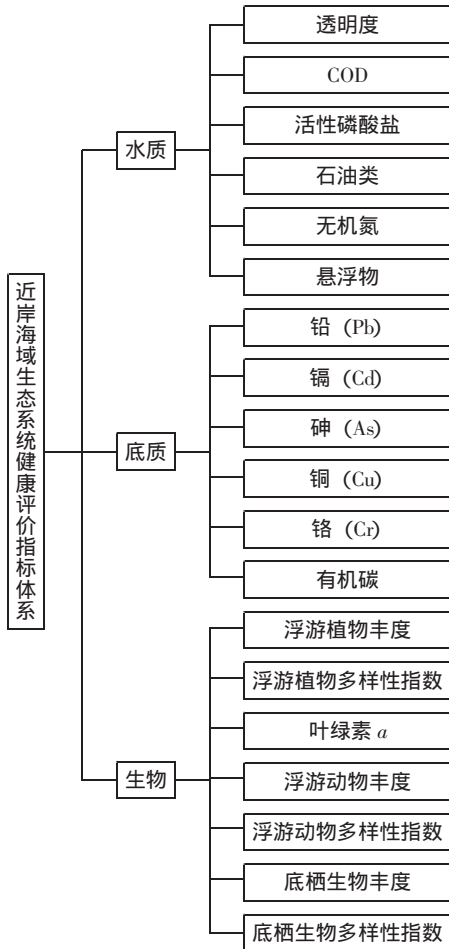


图 2 曹妃甸近岸海域生态系统健康评价指标体系

曹妃甸工业区以发展石油、化工、钢铁等重工业为主，工业污染物中包含大量重金属以及导致水体富营养化的氮、磷等非金属化学元素，结合区域工业发展的实际情况进行了指标的选取。其中，水质因子为透明度、COD、活性磷酸盐、石油类、无机氮、悬浮物，底质因子为铅、镉、砷、铜、铬、有机碳，生物因子包括浮游动物、浮游植物及底栖生物的丰度、多样性指数以及叶绿素 *a*。这些因子通常用以反映水质、底质及生物的生态健康情况。

2.2 评价标准的确定

指标体系中的指标标准设定采用两种方法，对于有国家标准的指标，其指标标准可以参考国家标准中的一类标准值作为评价基准值，对于没有国家标准的指标，其评价标准参考国内学者的研究文献。大部分指标可参照国家海洋局发布的《海水水质标准》、《海洋沉积物质量标准》和《近岸海洋生态健康评价指南》(表 1)。

表 1 曹妃甸近岸海域生态系统健康评价标准

评价指标	单位	评价基准值	参考文献
透明度	cm	150	陈朝华等, 2011; 吴海燕等, 2013
COD	ug/mL	2	海水水质标准 (GB 3097-1997)
活性磷酸盐	ug/mL	0.015	海水水质标准 (GB 3097-1997)
石油类	ug/mL	0.05	海水水质标准 (GB 3097-1997)
无机氮	ug/mL	0.2	海水水质标准 (GB 3097-1997)
悬浮物	ug/mL	10	叶属峰等, 2007
铅 (Pb)	10 ⁶ g/g	60	海洋沉积物质量标准 (GB18668-2002)
镉 (Cd)	10 ⁶ g/g	0.5	海洋沉积物质量标准 (GB18668-2002)
砷 (As)	10 ⁶ g/g	20	海洋沉积物质量标准 (GB18668-2002)
铜 (Cu)	10 ⁶ g/g	35	海洋沉积物质量标准 (GB18668-2002)
铬 (Cr)	10 ⁶ g/g	80	海洋沉积物质量标准 (GB18668-2002)
有机碳	%	2	海洋沉积物质量标准 (GB18668-2002)
浮游植物丰度	ind/m ³	300 000	海洋生态健康评价指南 (HY/T087-2005)
浮游植物多样性指数	—	3	叶属峰等, 2007
叶绿素 <i>a</i>	ug/mL	0.005	宋伦等, 2013
浮游动物丰度	ind/m ³	10 000	海洋生态健康评价指南 (HY/T087-2005)
浮游动物多样性指数	—	3	叶属峰等, 2007
底栖生物丰度	ind/m ³	150	海洋生态健康评价指南 (HY/T087-2005)
底栖生物多样性指数	—	3	叶属峰等, 2007

2.3 评价指标权重的确定

采用层次分析法确定指标权重，层次分析法具有定性和定量相结合、不需要理解复杂的数学模型

的特点,具有很强的实用性(路文海等,2013)。利用 Matlab 软件实现层次分析的计算方法,求出各层次评价指标的权重值(表2)。

表2 曹妃甸近岸海域生态系统健康评价各指标及其权重

因素层	权重	指标层	权重		
水质环境	0.540	透明度	0.147		
		COD	0.038		
		活性磷酸盐	0.29		
		石油类	0.055		
		无机氮	0.355		
		悬浮物	0.114		
		底质环境	0.163	铅 (Pb)	0.045
				镉 (Cd)	0.261
				砷 (As)	0.24
				铜 (Cu)	0.301
铬 (Cr)	0.107				
生物环境	0.297	有机碳	0.046		
		浮游植物丰度	0.121		
		浮游植物多样性指数	0.144		
		叶绿素 <i>a</i>	0.093		
		浮游动物丰度	0.047		
		浮游动物多样性指数	0.044		
		底栖生物丰度	0.218		
底栖生物多样性指数	0.332				

2.4 评价指标的归一化

本文将评价指标分为正指标和负指标,正指标是指在评价过程中,值越大表示生态系统越健康,而负指标值越大表示生态系统健康水平越差。因此需要采用不同的计算方式对正负指标进行归一化,归一化后的值用 R 表示。对于正指标:

$$R_i = Acstat/Refcon \quad (1)$$

对于负指标:

$$R_i = Refcon/Acstat \quad (2)$$

其中, $Acstat$ 表示实际监测值, $Refcon$ 表示评价基准值。

2.5 综合健康指数评价

通过评价指标归一化得到每个站点每个指标的 R 指数以后,可以求得每个站点分别在 3 个因素层的综合健康指数。综合健康指数 (CHI) 计算方法(欧文霞,2006):

$$CHI = \sum_{i=1}^n w_i \times R_i \quad (3)$$

式中, w_i 表示第 i 个指标的权重, R_i 表示第 i 个指标的归一化指标值。为了更清晰的分析不同区

域的差异,在借鉴《国家海洋环境状况公报》对不同健康状态的描述的基础上,将健康水平划分为 5 级(表3)。

表3 综合健康指数等级划分

	很不健康	不健康	亚健康	健康	很健康
等级标准	$CHI < 0.7$	$0.7 \leq CHI < 1.2$	$1.2 \leq CHI < 1.8$	$1.8 \leq CHI < 2.5$	$CHI \geq 2.5$

2.6 数据的空间插值处理方法

通过空间插值的方法可以由已知采样点的综合健康指数来推算未知采样点的综合健康指数,从而得到整个研究区域三方面因素健康指数的空间分布特征。常见的空间插值方法有反距离权重插值(IDW)、样条函数插值(Spline)、克里格插值(Kriging)和自然邻近法(Natural neighbour)。常规条件下,插值结果的误差均方根的大小,表示插值效果的好坏(李纯厚等,2013),前者越小,后者越好。通过对比发现,用反距离权重插值法所得空间插值结果的误差均方根绝对值最小,所以本文选择反距离权重插值方法来进行近海水质环境、底质环境和生物环境的插值,从空间上表征曹妃甸近岸海域健康状况差异。

3 评价结果与分析

3.1 曹妃甸综合健康指数测算结果

将调查数据代入以上公式,可得到不同因素的综合健康指数,详见表4。

表4 曹妃甸近岸海域各站点的综合健康指数

	水质环境	底质环境	生物环境
A1	1.500	2.527	0.419
A2	1.729	2.311	0.810
A3	1.901	2.213	1.142
B1	2.129	2.551	1.006
B2	1.762	2.424	0.974
B3	1.724	2.284	1.036
C1	1.866	2.675	0.946
C2	2.202	2.397	1.674
C3	2.153	2.495	1.400
D1	1.790	6.004	1.065
D2	1.772	4.733	1.030
D3	1.487	2.521	0.797

根据表3和表4,得出各个站点在水质环境、底质环境和生物环境3个方面的健康水平,详见表5。

水质环境评价中，42%的站点处于健康水平，58%的站点处于亚健康水平，整体健康状况不佳。底质环境评价中，43%的站点属于很健康水平，57%的站点属于健康水平，整体健康状况良好。生物环境评价中，75%的站点处于不健康水平，25%的站点处于很不健康水平，整体健康状况恶劣。由此可以得出：健康水平整体表现为底质环境>水质环境>生物环境，因此，在今后的海洋经济发展过程中，需要加强对生物环境的保护，提高生物多样性。

水质环境、底质环境和生物环境在各个健康等级上所占的比例，即因素层三要素在各个健康等级上的隶属程度。根据模糊综合评价法（符学葳，2011）评价曹妃甸近海的综合健康水平。由表 5 可以得出模糊关系矩阵为：

$$R = \begin{pmatrix} 0 & 0.42 & 0.58 & 0 & 0 \\ 0.50 & 0.50 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.17 & 0.75 & 0.08 \end{pmatrix} \quad (4)$$

将指标的权重向量与模糊关系矩阵利用模糊算

子进行计算，得到生态健康水平在各等级的分布向量 $B = \{0.163, 0.42, 0.54, 0.297, 0.08\}$ ，归一化后的 $B' = \{0.109, 0.28, 0.36, 0.198, 0.053\}$ 。按照最大隶属度原则，亚健康等级所占比重最大，为 0.36，所以判断曹妃甸近岸生态系统健康处于亚健康水平，这与 2011-2014 年国家海洋环境状况公报中公布的渤海湾的健康评价结果一致。因此根据此评价体系获得的评价结果可靠，评价结果符合实际情况，评价指标体系合理。

3.2 曹妃甸近岸健康水平空间分布

3.2.1 水质环境健康水平空间分布

研究区内水质以健康及亚健康为主。水质环境健康指数呈现由岸向海、由西北向东南逐渐升高的趋势（图 3）。不健康和亚健康的水域主要位于近岸海域，此处人类活动频繁，工业发达，属于陆源污染的始发地，海水所要承受的污染压力较大，水质受到较严重污染。

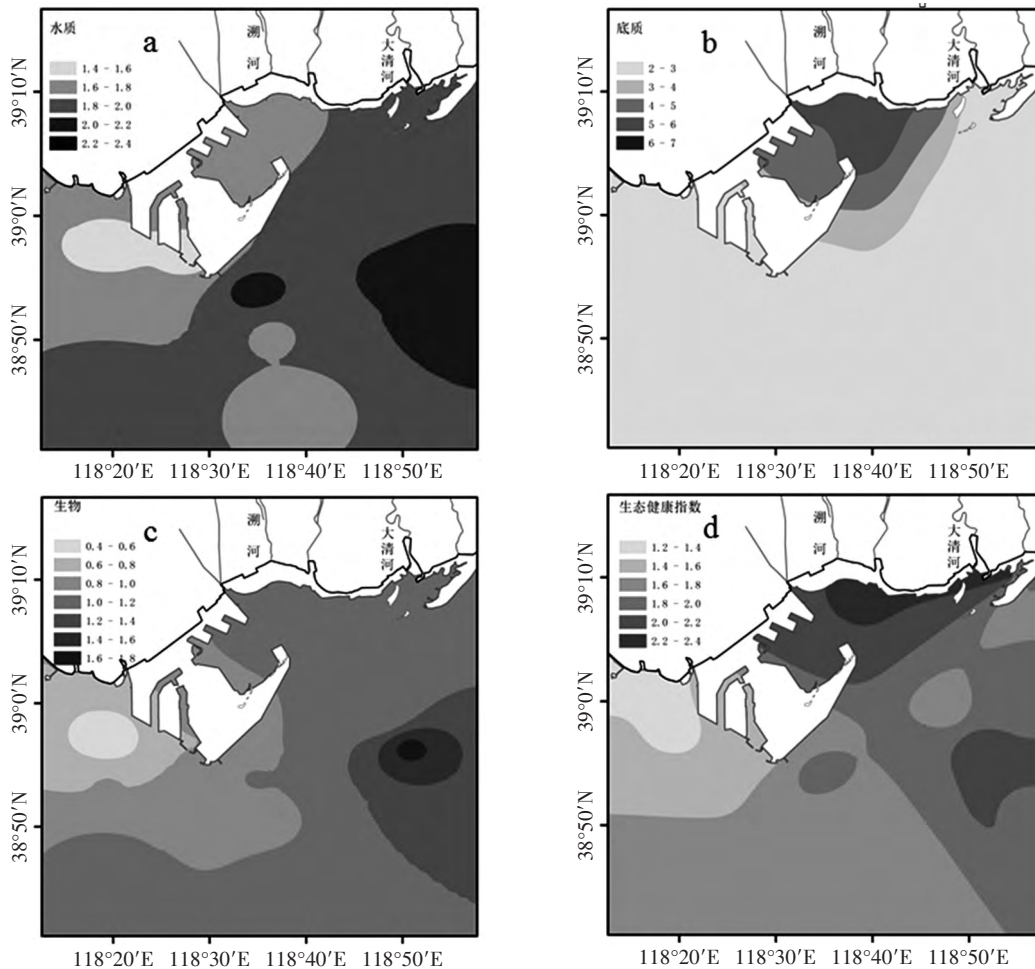


图 3 生态健康状况空间分布图

(a、b、c、d 依次为水质、底质、生态系统及生态健康综合评价)

表5 三要素在各等级所占比例

	很健康	健康	亚健康	不健康	很不健康
水质环境	0	42 %	58 %	0	0
底质环境	50 %	50 %	0	0	0
生物环境	0	0	17 %	75 %	8 %

3.2.2 底质环境健康水平空间分布

底质环境健康指数介于 2.213~6.004 之间, 研究区范围内全部处于健康和很健康水平, 总体健康状况良好, 其中很健康的底质环境面积占到总海域面积的 50%。底质环境健康指数呈现由岸及海逐渐降低的趋势, 健康指数最大值位于湖河口周围(图 4)。

湖河口近年来因建闸导致河流断流, 阻碍了带有大量陆源污染物的河水入海, 减弱了陆源污染的压力, 所以此处沉积物中污染物含量最少。由此处向海延伸, 沿岸河口对海水的扰动作用减弱, 污染物逐渐沉积, 造成了沉积物中污染物逐渐增加, 因而健康指数逐渐降低。

3.2.3 生物的健康水平空间分布

生物环境健康指数范围为 0.419~1.674, 研究区内 8% 的海域处于很不健康的水平, 75% 的海域面积处于不健康水平, 17% 处于亚健康水平, 健康水平总体较差。海洋生物环境健康指数呈现出由岸及海逐渐降低的趋势, 最高值出现在近岸中部(图 5)。在近岸区浮游植物和浮游动物无论在数量上还是丰富度上, 都表现出明显的优势, 同时数量上还没有超出《近岸海洋生态健康评价指南》中规定的一类健康限度, 所以生物环境健康水平在此处最高。但是如果近岸地区营养物质持续增加, 就有可能引起近海的富营养化, 所以也必须引起足够重视。生物健康水平最低处, 位于货轮运输线上, 该区域水质环境不稳, 不利于动植物的生存。

3.3 春季曹妃甸近海生态系统整体健康指数空间分布趋势

曹妃甸近海综合健康指数空间分布现状(图 6)是由水质环境健康指数、底质环境健康指数和生物环境健康指数分别加权求和得出, 综合健康指数范围为 1.347~2.261。研究区内 58% 的海域处于亚健康水平, 42% 的海域面积处于健康水平, 总体健康水平为亚健康。研究海域整体健康指数呈现出由西向东增加和由海向陆增加的趋势。东北部健康指数最高, 距岸越远, 健康指数逐渐下降的趋

势, 这是因为湖河断流减少污染物进入, 导致沉积物质量较好, 此外靠近陆源营养物质输入导致生物质量较好。曹妃甸港东西两侧差异明显, 东侧的健康指数明显高于西侧, 其原因是由多方面造成的。首先, 研究海域处于渤海湾与相对开阔的外海的边界, 渤海湾海洋环境相对封闭, 近年来国家海洋环境监测公报均显示渤海湾海域为亚健康, 其对研究区域的海洋环境影响显著。其次, 围填海影响了近海的潮流走向和两侧的水动力环境, 导致污染物在西侧更易集聚, 污染物难以扩散, 污染程度逐渐加深。此外, 湖河断流, 减少了陆源污染物对湖河口处海域的污染。

4 讨论

本文结合曹妃甸工业区的实际情况, 科学地选取了一系列评价指标, 然后基于指标评价法从水质环境、底质环境和生物环境 3 个方面建立了曹妃甸近海生态系统健康评价指标体系, 对曹妃甸近岸海域健康状况进行了客观地评价。本文所建立的近岸海域生态系统健康评价指标数量较少, 且均为我国典型的常规监测指标, 可操作性强。在整体健康评价中采用模糊数学的方法, 运用隶属度函数确定健康水平的最大隶属度, 弥补了仅用一个确定的标准值来衡量评价结果的不足。

因海洋环境复杂, 数据获取中具有困难性和随机性, 有无法获取某个站点数据的情况。本文采用底质环境评价中所有站点在各健康等级所占百分比, 结合模糊数学运算的方法, 实现了对近海生态系统健康的综合评价。采用反距离权重 (IDW) 插值法绘制曹妃甸近岸海域在水质环境、底质环境、生物环境健康状态的空间分布图和综合健康评价空间分布图, 更直观地展示了曹妃甸近岸海域的健康水平空间分布特征。

受调查时间和条件所限, 本文仅对曹妃甸近岸春季健康状况进行了评价, 该海域的全年生态系统健康状况有待调查和评估。

参 考 文 献

- Rapport D J, 1989. What constitutes ecosystem health. Perspectives in biology and medicine, 33 (11): 120-132.
European Commission, 2003. Guidance on Typology, Reference Condi-

- tions and Classification Systems for Transitional and Coastal Waters. Copenhagen: European Commission.
- Office of Research and Development, Office of Water. U.S. 2001. Environmental Protection Agency. National Coastal Condition Report (EPA-620/R-01/005). Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency.
- 陈朝华, 吴海燕, 陈克亮, 等, 2011. 近岸海域生态质量状况综合评价方法—以同安湾为例. 应用生态学报, 22 (7): 1841-1848.
- 崔保山, 杨志峰, 2001. 湿地生态系统健康研究进展. 生态学杂志, 20 (3): 31-36.
- 方成, 王小丹, 杨金霞, 等, 2014. 唐山市海岸线变化特征及环境影响效应分析. 海洋通报, 33 (4): 149-427.
- 符学葳, 2011. 基于层次分析法的模糊综合评价研究和应用. 黑龙江: 哈尔滨工业大学.
- GB/T 12763, 2007. 《海洋调查规范》.
- 龚政, 张长宽, 陶建峰, 等, 2012. 曹妃甸粉沙质海岸围垦后港内泥沙研究. 海洋工程, 30 (01): 112-118.
- 季荣耀, 陆永军, 左利钦, 2011. 渤海湾曹妃甸深槽形成机制及稳定性分析. 地理学报, 66 (03): 348-355.
- 孔红梅, 赵景柱, 姬兰柱, 等, 2002. 生态系统健康评价方法初探. 应用生态学报, 13 (4): 486-490.
- 李纯厚, 林琳, 徐姗姗, 等, 2013. 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, 33 (6): 1798-1810.
- 李秀梅, 袁承志, 李月洋, 2013. 渤海湾海岸带遥感监测及时空变化. 国土资源遥感, 25 (2): 156-163.
- 刘永, 郭怀成, 戴永立, 等, 2004. 湖泊生态系统健康评价方法研究. 环境科学报, 24 (4): 723-730.
- 路文海, 曾荣, 向先全, 2013. 沿海地区海洋生态健康评价研究. 海洋通报, 32 (5): 580-585.
- 陆永军, 左利钦, 季荣耀, 等, 2007. 渤海湾曹妃甸港区开发对水动力泥沙环境的影响. 水科学进展, 18 (06): 793-800.
- 欧文霞, 2006. 闽东沿岸海洋生态监控区生态系统健康评价与管理研究. 福建: 厦门大学.
- 祁帆, 李晴新, 朱琳, 2007. 海洋生态系统健康评价研究进展. 海洋通报, 26 (3): 97-104.
- 宋伦, 王年斌, 宋永斌, 2013. 锦州湾海域生态系统健康状况评价. 中国环境监测, 29 (4): 15-20.
- 索安宁, 张明慧, 于永海, 等, 2012. 曹妃甸围填海工程的环境影响回顾性评价. 中国环境监测, 26 (2): 105-111.
- 唐涛, 蔡庆华, 刘建康, 2002. 河流生态系统健康及其评价. 应用生态学报, 13 (9): 1191-1194.
- 吴海燕, 吴耀建, 陈克亮, 等, 2013. 基于“OOAO原则”的罗源湾生态质量状况综合评价. 生态学报, 33 (1): 249-259.
- 肖风劲, 欧阳华, 傅伯杰, 等, 2003. 森林生态系统健康评价指标及其在中国的应用. 地理学报, 58 (6): 803-809.
- 杨建强, 崔文林, 张洪亮, 等, 2003. 莱州湾西部海域海洋生态系统健康评价的结构功能指标法. 海洋通报, 22 (5): 58-63.
- 叶属峰, 刘星, 丁德文, 2007. 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, 29 (4): 128-136.
- 于永海, 索安宁, 2013. 围填海评估方法研究. 北京: 海洋出版社, 2013 (5).
- 周维海, 2010. 唐山曹妃甸建设中的生态环境问题. 水科学与工程技, 2010 (6): 37-38.

(本文编辑: 袁泽轶)