

曹妃甸近岸海域海洋生态系统健康评价

梁淼^{1,2}, 孙丽艳^{1,2}, 鞠茂伟^{1,2}, 路波^{1,2}, 李德鹏^{1,2}, 陈兆林^{1,2}, 姜倩^{1,2}

(1. 国家海洋环境监测中心 大连 116023; 2. 国家海洋局近岸海域生态环境重点实验室 大连 116023)

摘要:为全面了解曹妃甸近岸海域海洋生态系统健康状况,促进其合理开发利用海洋资源和建设海洋生态文明,文章根据 2010—2014 年的相关监测数据,采用区域生态系统健康评价方法,选取海水环境、沉积物环境、生物栖息地、生物残毒和生物 5 类评价指标,并确定指标标准、赋值和计算方法,从而确定各评价指标的健康指数。研究结果表明:2010—2014 年曹妃甸近岸海域海水环境、沉积物环境和生物残毒均为健康状态,生物栖息地均为不健康状态,生物除 2011 年 10 月外(不健康)均为亚健康状态;海洋生态系统除 2011 年 10 月为不健康状态外,其余年份均为亚健康状态;生物指标决定整个海洋生态系统的健康状态,而围填海活动对生物栖息地的破坏是生物健康指数较低的主要原因。在此基础上,提出应尤其注重对生物环境的保护和修复,加强近岸海域生态环境综合整治和围填海管控。

关键词:生态系统;健康指数;围填海;生物栖息地;生态评价

中图分类号:X826;X171.1;P76 **文献标志码:**A **文章编号:**1005—9857(2018)08—0044—07

Offshore Ecosystem System Health Assessment for the Coastal Area of Caofeidian

LIANG Miao^{1,2}, SUN Liyan^{1,2}, JU Maowei^{1,2}, LU Bo^{1,2}, LI Depeng^{1,2},
CHEN Zhaolin^{1,2}, JIANG Qian^{1,2}

(1. National Marine Environmental Monitoring Center, Dalian 116023, China;

2. Key Laboratory for Ecological Environment in Coastal Areas, SOA, Dalian 116023, China)

Abstract:In order to understand the health status of marine ecosystem in the coastal area of Caofeidian, and promote the rational exploitation and utilization of marine resources and the construction of marine ecological civilization, the paper adopted the method of the inshore marine ecosystem health assessment according to the relevant monitoring data from 2010 to 2014. Five kinds of evaluation indexes, including seawater environment, sediment environment, biological habitat, biological residue and biological indicators, were selected, and the index criteria,

收稿日期:2018-01-22; 修订日期:2018-07-30

基金项目:国家海洋局近岸海域生态环境重点实验室开放基金项目(201817)。

作者简介:梁淼,工程师,博士研究生,研究方向为海洋工程生态环境影响评价

通信作者:路波,博士研究生,研究方向为海洋地质

assignment and calculation methods were determined, so as to determine the health index of each evaluation index. The results showed that the seawater environment, sediment environment and biological residue in the coastal waters of Caofeidian from 2010 to 2014 were all healthy. All the habitat was unhealthy. All organisms were sub-healthy except that in October 2011, which was unhealthy. Biological indicators determined the health status of the whole marine ecosystem, and the destruction of biological habitat caused by reclamations was the main reason of low biological health index. On this basis, it was suggested that special attention should be paid to the protection and restoration of the biological environment, and the comprehensive regulation and control of the ecological environment in the coastal waters should be strengthened.

Key words: Ecosystem system, Health index, Reclamation, Biological habitat, Ecological evaluation

0 引言

近岸海域是具有海陆过渡性质的特殊生态系统,易受人类活动的干扰^[1]。近年来,随着围填海、港口建设、临港工业城镇建设、航道疏浚和海洋捕捞等海洋开发利用活动的日益增多,近岸海域的海洋生态环境遭受严重影响,表现为海域和湿地大面积丧失^[2]、入海污染物和污染面积大幅度增加^[3]、环境灾害事件频发^[4]以及渔业资源呈小型化和低龄化^[5]等。因此,对于脆弱的近岸海域生态系统,须密切关注其健康状况,并进行相应的评价。

1982年,加拿大学者 Lee^[6]首次应用“生态系统健康”一词,将生态系统健康与其本身所具备的一系列能力(包括恢复力和活力等)相互联系;1983年, Sonstegard 等^[7]应用指示物种法,研究鲑鱼对北美五大湖区生态系统健康的指示作用。海洋生态系统健康的概念最早出现于 20 世纪 90 年代,学者认为作为水体生态系统,海洋生态系统健康应包括稳定性、自我平衡能力和功能的正常发挥^[8-10]。我国于 21 世纪初开始关注海洋生态系统健康,原国家海洋局将海洋生态系统健康定义为“海洋生态系统保持其自然属性,维持生物多样性和关键生态过程稳定并持续发挥其服务功能的能力”^[11]。

目前国内学者已对湖泊、流域、湿地、森林和海藻床等进行生态系统健康评价^[12-18],并提出针对不同生态系统要采用不同评价方法^[19]。海洋生态系统健康评价属于新兴课题,国内尚未形成成熟的评价体系,大多数研究侧重于对污染物的监测,缺乏对生态的考量,评价指标过于单一。本研究基于曹

妃甸近岸海域生态系统特点和相关监测数据,采用区域生态系统健康评价方法^[11],评价其海洋生态系统健康状况,以期为其合理开发利用海洋资源和建设海洋生态文明提供科学依据。

1 研究区域

曹妃甸地处河北省唐山市南部的渤海湾西岸,是呈 NE—SW 走向的古河口沙坝。曹妃甸沙岛北侧与大陆岸线之间发育有大片潮间浅滩,面积约 450 km²;南部为深槽,水深由甸头向前延伸 500 m 即达 25 m,甸前深槽水深达 36 m。由曹妃甸向渤海海峡延伸处有 1 条水深达 27 m 的天然水道,直经海峡通向黄海。曹妃甸滩地地形破碎复杂,滩上 0 m 等深线的面积达 175 km²,如同半陷半现的岛礁,于大潮时淹没、小潮时大片浅滩出露。岸外分布曹妃腰坨、草木坨、蛤坨、东坑坨和石白坨等砂坝和沙岛,构成沿岸沙堤,呈带状分布,并与内侧水域构成潟湖沙坝体系;依据沿岸沙堤内外水动力条件、地形和地貌特征的不同,可分为 4 个地貌区,即西部无沿岸沙堤浅海区、东部沿岸沙堤内潮坪区、东部沿岸沙堤外浅海区和东部大型潮沟区。复杂的滩涂地形造就多样的滩涂生境,海洋生物资源丰富,有浮游植物 17 属 47 种、浮游动物 12 类 64 种、底栖动物 53 种和游泳动物 27 种^[20]。

曹妃甸自 2003 年开始围填海^[21],到 2020 年预计建成区面积达 230 km²^[22]。随着围填海面积的不断扩大,海岸带自然属性被改变程度日益加深,导致潮间带宽度减少^[23]、近岸冲淤环境改变、洪水灾害频发和生物多样性损失等一系列问题^[24]。为合

理开发利用海洋资源和保护海洋生态环境,修复受损海岸带,亟须对曹妃甸近岸海域开展海洋生态系统健康评价。

2 研究方法

本研究根据国家海洋环境监测中心 2010—2014 年的相关监测数据,构建曹妃甸近岸海域海洋生态系统健康评价指标体系。调查和样品分析过程严格按照《海洋调查规范》(GB 12763—2007),保证科学性和准确性。

2.1 评价指标

海洋生态系统健康评价指标的选取遵循整体性、简明性、可操作性、代表性、差异性、科学性和独立性原则,根据《近岸海洋生态健康评价指南》

(HY/T 087—2005)^[11]中的“河口及海湾生态系统生态环境健康评价方法”,遴选 5 类评价指标:①海水环境指标,包括溶解氧浓度、pH 值以及活性磷酸盐、无机氮和石油类含量;②沉积物环境指标,包括有机碳和硫化物含量;③生物栖息地指标,包括滨海湿地面积和沉积物主要组分含量的变化;④生物残毒指标,包括汞、镉、铅、砷和石油烃含量;⑤生物指标,包括浮游植物密度、浮游动物密度、浮游动物生物量、鱼卵和仔鱼密度、底栖生物密度以及底栖生物生物量。

2.2 指标标准、范围和赋值

根据评价指标的情况,参考相关标准和评价方法,确定评价指标标准、范围和赋值(表 1 至表 3)。

表 1 曹妃甸近岸海域海洋生态系统健康评价指标标准

评价指标(健康指数)	等级		
	健康	亚健康	不健康
海水环境(W_{indx})	$11 \leq W_{\text{indx}} \leq 15$	$8 \leq W_{\text{indx}} < 11$	$5 \leq W_{\text{indx}} < 8$
沉积物环境(S_{indx})	$7 \leq S_{\text{indx}} \leq 10$	$3 \leq S_{\text{indx}} < 7$	$1 \leq S_{\text{indx}} < 3$
生物栖息地(E_{indx})	$11 \leq E_{\text{indx}} \leq 15$	$8 \leq E_{\text{indx}} < 11$	$5 \leq E_{\text{indx}} < 8$
生物残毒(R_{indx})	$7 \leq R_{\text{indx}} \leq 10$	$4 \leq R_{\text{indx}} < 7$	$1 \leq R_{\text{indx}} < 4$
生物(B_{indx})	$35 \leq B_{\text{indx}} \leq 50$	$20 \leq B_{\text{indx}} < 35$	$10 \leq B_{\text{indx}} < 20$
海洋生态系统(C_{indx})	$C_{\text{indx}} \geq 75$	$50 \leq C_{\text{indx}} < 75$	$C_{\text{indx}} < 50$

表 2 曹妃甸近岸海域海洋生态系统健康评价指标范围

评价指标		I 级	II 级	III 级
海水环境	溶解氧/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	≥ 6	[5,6)	< 5
	pH 值	(7.5,8.5]	(7.0,7.5]或(8.5,9.0]	≤ 7.0 或 > 9.0
	活性磷酸盐/($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	≤ 15	(15,30]	> 30
	无机氮/($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	≤ 200	(200,300]	> 300
	石油类/($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	≤ 50	(50,300]	> 300
沉积物环境	有机碳/%	≤ 2	(2,3]	> 3
	硫化物/($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)	≤ 300	(300,500]	> 500
生物栖息地	滨海湿地面积减少/%	≤ 5	(5,10]	> 10
	沉积物主要组分含量变化/%	≤ 2	(2,5]	> 5
生物残毒	汞/($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)	≤ 0.05	(0.05,0.10]	> 0.10
	镉/($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)	≤ 0.2	(0.2,2.0]	> 2.0
	铅/($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)	≤ 0.1	(0.1,2.0]	> 2.0
	砷/($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)	≤ 1.0	(1.0,5.0]	> 5.0
	石油烃/($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)	≤ 15	(15,50]	> 50

续表				
评价指标	I 级	II 级	III 级	
生物	浮游植物密度/(个·m ⁻³)	(50%A,150%A]	(10%A,50%A]或 (150%A,200%A]	≤10%A 或>200%A
	浮游动物密度/(个·m ⁻³)	(75%B,125%B]	(50%B,75%B]或 (125%B,150%B]	≤50%B 或>150%B
	浮游动物生物量/(mg·m ⁻³)	(75%C,125%C]	(50%C,75%C]或 (125%C,150%C]	≤50%C 或>150%C
	鱼卵和仔鱼密度/(个·m ⁻³)	>50	(5,50]	≤5
	底栖生物密度/(个·m ⁻²)	(75%D,125%D]	(50%D,75%D]或 (125%D,150%D]	≤50%D 或>150%D
	底栖生物生物量/(g·m ⁻²)	(75%E,125%E]	(50%E,75%E]或 (125%E,150%E]	≤50%E 或>150%E

注:A、B、C、D、E 分别为渤海湾春、秋季对应指标的评价依据值,详见《近岸海洋生态健康评价指南》(HY/T 087—2005)。

表 3 曹妃甸近岸海域海洋生态系统健康评价指标赋值

评价指标	I 级	II 级	III 级
海水环境	15	10	5
沉积物环境	10	5	1
生物栖息地	15	10	5
生物残毒	10	5	1
生物	50	30	10

2.3 计算方法

指标赋值的计算公式为:

$$V_q = \frac{\sum_{i=1}^n V_i}{n}$$

式中: V_q 为第 q 项评价指标的赋值; V_i 为第 i 个站位第 q 项评价指标的赋值; n 为调查站位总数。

指标健康指数的计算公式为:

$$V_{\text{indx}} = \frac{\sum_{i=1}^m V_q}{m}$$

式中: V_{indx} 为健康指数; m 为评价指标总数。

海洋生态系统健康指数的计算公式为:

$$C_{\text{indx}} = \sum_{i=1}^p V_{\text{indx}}$$

式中: C_{indx} 为海洋生态系统健康指数; p 为评价指标类群数。

3 评价结果

3.1 海水环境

曹妃甸近岸海域海水环境指标评价结果如表 4 所示。

表 4 海水环境评价

调查时间 (年—月)	指标赋值					海水环境健康指数	等级
	溶解氧	pH 值	活性磷酸盐	无机氮	石油类		
2010—09	14.84	15.00	10.97	14.35	15.00	14.03	健康
2011—10	15.00	15.00	7.50	5.25	13.75	11.30	健康
2012—05	15.00	15.00	7.50	7.63	15.00	12.03	健康
2013—06	15.00	15.00	8.42	6.58	15.00	12.00	健康
2013—09	15.00	15.00	8.42	8.82	15.00	12.45	健康
2014—06	15.00	15.00	5.25	5.00	15.00	11.05	健康
2014—09	15.00	15.00	5.00	5.00	15.00	11.00	健康

由表 4 可以看出,2010—2014 年曹妃甸近岸海域海水环境均为健康状态。其中,2014 年 6 月和 9 月的海水环境较差,处于健康状态的边缘,主要与活性磷酸盐 and 无机氮指标赋值较低有关;根据同期监测数据,活性磷酸盐 and 无机氮为该海域主要污染因子,各监测站位均超标,其原因可能是 2013 年年底曹妃甸工业区填海工程基本实施完毕,2014 年工业项目陆续引进并开工建设,导致大量当地陆源污染物入海,海水环境承受的污染压力较大。2010—2013 年海水环境指标均符合相应海洋功能区的海洋环境保护标准。

3.2 沉积物环境

曹妃甸近岸海域沉积物环境指标评价结果如表 5 所示。

表 5 沉积物环境评价

调查时间 (年—月)	指标赋值		沉积物环境 健康指数	等级
	硫化物	有机碳		
2010—09	10.00	10.00	10.00	健康
2011—10	10.00	10.00	10.00	健康
2012—05	10.00	10.00	10.00	健康
2013—06	10.00	10.00	10.00	健康
2013—09	10.00	10.00	10.00	健康
2014—06	10.00	8.93	9.46	健康
2014—09	10.00	9.29	9.64	健康

由表 5 可以看出,2010—2014 年曹妃甸近岸海域沉积物环境均为健康状态。沉积物是海水环境中重金属污染物的主要蓄积库,相对稳定,其地球

化学特征能准确地反映海洋生态系统健康状况。

3.3 生物栖息地

曹妃甸工业区自 2003 年起,通岛路、青林公路、供电、通信、供水和疏港铁路等配套基础设施工程陆续开工;至 2004 年年底,通岛路工程全部完工,甸头附近矿石码头一期工程堆场围堰工程完工并开始陆域吹填工程;至 2005 年年底,甸头附近矿石码头一期工程完工并投入使用,首钢用地的吹填工程陆续开始,填海围堰也已基本形成;2006—2007 年主要工程集中在首钢用地建设和一港池周边;至 2009 年年底,围堰工程基本完工,一、二、三港池和纳潮通道基本形成;至 2013 年年底,填海工程全部完工。随着围填海面积的不断扩大,2010—2014 年曹妃甸近岸海域的滨海湿地大面积丧失,各年度滨海湿地面积减少的指标赋值均为 5。

根据 2006 年曹妃甸近岸海域表层沉积物粒度分析结果,其表层沉积物包括粉砂、砂质粉砂、粉砂质砂和砂 4 种类型,并以砂质粉砂为主。随着围填海面积的增加,该海域地形变化较大,人工码头和港池均影响原有的河流和潮汐水动力^[25],导致沉积物类型明显改变,即沉积物粒度粗化,主要组分转变为砂^[25],各年度沉积物主要组分含量变化的指标赋值均为 5。

综上所述,2010—2014 年曹妃甸近岸海域生物栖息地均为不健康状态。

3.4 生物残毒

曹妃甸近岸海域生物残毒指标评价结果如表 6 所示。

表 6 生物残毒评价

调查时间 (年—月)	指标赋值					生物残毒健康指数	等级
	汞	镉	铅	砷	石油烃		
2010—09	10.00	10.00	8.33	10.00	5.00	8.67	健康
2011—10	10.00	9.17	8.75	10.00	9.58	9.50	健康
2012—05	10.00	10.00	10.00	10.00	7.92	9.58	健康
2013—06	6.53	8.22	7.67	10.00	8.11	8.11	健康
2013—09	6.24	8.11	7.67	10.00	8.01	8.01	健康
2014—06	4.73	7.41	7.00	10.00	10.00	7.83	健康
2014—09	4.67	7.67	7.00	10.00	10.00	7.87	健康

由表 6 可以看出,2010—2014 年曹妃甸近岸海域生物残毒均为健康状态。其中,2014 年 6 月和 9 月的生物残毒状况较差,处于健康状态的边缘。

3.5 生物

曹妃甸近岸海域生物指标评价结果如表 7 所示。

表 7 生物评价

调查时间 (年—月)	指标赋值						生物健康指数	等级
	浮游植物	浮游动物	浮游动物	鱼卵和仔鱼	底栖生物	底栖生物		
	密度	密度	生物量	密度	密度	生物量		
2010—09	50	50	30	10	50	10	33.33	亚健康
2011—10	10	10	10	10	10	10	10.00	不健康
2012—05	30	50	30	10	10	50	30.00	亚健康
2013—06	10	10	10	10	50	30	20.00	亚健康
2013—09	30	10	30	10	30	50	26.67	亚健康
2014—06	10	10	30	10	30	50	23.33	亚健康
2014—09	30	10	50	10	10	50	26.67	亚健康

由表 7 可以看出,2010—2014 年曹妃甸近岸海域生物除 2011 年 10 月为不健康状态外,其余年份均为亚健康状态,且 2013 年和 2014 年处于亚健康状态的边缘,表明生物环境已遭受不同程度的破坏。

3.6 海洋生态系统

曹妃甸近岸海域海洋生态系统评价结果如表 8 所示。

表 8 海洋生态系统评价

调查时间 (年—月)	海水环境 健康指数	沉积物环境 健康指数	生物栖息地 健康指数	生物残毒 健康指数	生物 健康指数	海洋生态系统 健康指数	等级
2010—09	14.03	10.00	5	8.67	33.33	71.03	亚健康
2011—10	11.30	10.00	5	9.50	10.00	45.80	不健康
2012—05	12.03	10.00	5	9.58	30.00	66.61	亚健康
2013—06	12.00	10.00	5	8.11	20.00	55.11	亚健康
2013—09	12.45	10.00	5	8.01	26.67	62.12	亚健康
2014—06	11.05	9.46	5	7.83	23.33	56.68	亚健康
2014—09	11.00	9.64	5	7.87	26.67	60.18	亚健康

由表 8 可以看出,2010—2014 年曹妃甸近岸海域海洋生态系统除 2011 年 10 月为不健康状态外,其余年份均为亚健康状态,表明海洋生态系统已遭受不同程度的破坏。

4 结语

根据本研究的评价结果,截至 2014 年,曹妃甸近岸海域海洋生态系统处于亚健康状态,与国内其他相关研究结果和公报结果一致^[1,26]。从评价结果可以看出,生物指标决定整个海洋生态系统的健康

状态,而围填海活动对生物栖息地的破坏是生物健康指数较低的主要原因。随着时间的推移,围填海活动造成的生态累积效应将愈加明显,将导致海洋生态系统健康水平的持续下降。因此,曹妃甸在海洋经济发展过程中,亟须采取入海污染物联防联控、海洋开发利用生态补偿和海洋生态环境治理等措施,尤其注重对生物环境的保护和修复,加强近岸海域生态环境综合整治和围填海管控。

参考文献

[1] 程林,王欣平,王艳霞,等.河北省曹妃甸近岸海域春季生态系统健康现状评价[J].海洋通报,2017,36(1):107—113.

[2] 宋德彬,高志强,徐福祥,等.渤海生态系统健康评价及对策研究[J].海洋科学,2017,41(5):17—26.

[3] 王诺,许雪青,吴暖.渤海污染风险与生态系统功能价值评价研究[J].海洋湖沼通报,2015(1):167—174.

[4] 张志锋,贺欣,张哲.渤海富营养化现状、机制及其与赤潮的时空耦合性[J].海洋环境科学,2012,31(4):465—468.

[5] 许思思,宋金明,段丽琴.渤海主要渔业资源结构的演变分析[J].海洋科学,2010,34(6):59—65.

[6] LEE B J. An ecological comparison of the McHarg method with other planning initiatives in the Great Lakes Basin[J]. Landscape Planning, 1982, 9: 147—169.

[7] SONSTEGARD R A, LEATHERLAND J F. Great lakes coho salmon as an indicator organism for ecosystem health[J]. Marine Environmental Research, 1983, 14: 1—4.

[8] HOLDER-FRANKLIN M A, FRANKLIN M. River bacteria time series analysis: a field and laboratory study which demonstrates aquatic ecosystem health[J]. Journal of Aquatic Ecosystem Health, 1993, 2: 251—259.

[9] POLLARD P, HUXHAM M. The European water framework directive: a new era in the management of aquatic ecosystem health? [J]. Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems, 1998, 8(6): 773—792.

[10] FAIRWEATHER P G. Determining the ‘health’ of estuaries: priorities for ecological research[J]. Australian Journal of Ecology, 1999, 24(4): 441—451.

[11] 国家海洋局. 近岸海洋生态健康评价指南[Z]. 2005.

[12] 胡志新, 胡维平, 谷孝鸿, 等. 太湖湖泊生态系统健康评价[J]. 湖泊科学, 2005, 17(3): 256—262.

[13] 卢志娟, 裴洪平, 汪勇. 西湖生态系统健康评价初探[J]. 湖泊科学, 2008, 20(6): 802—805.

[14] 谢锋, 张光生, 成小英. 五里湖湖滨带生态系统健康评价[J]. 中国农学通报, 2007, 23(7): 506—509.

[15] 孙雪岚, 胡春宏. 河流健康评价指标体系初探[J]. 泥沙研究, 2007(4): 21—27.

[16] 林倩, 张树深, 刘素玲. 辽河口湿地生态系统健康诊断与评价[J]. 生态与农村环境学报, 2010, 26(1): 41—46.

[17] 肖凤劲, 欧阳华, 傅伯杰, 等. 森林生态系统健康评价指标及其在中国的应用[J]. 地理学报, 2003, 58(6): 803—809.

[18] 吴钟解, 陈石泉, 蔡泽富, 等. 新村港海草床生态系统健康评价[J]. 中国环境监测, 2015, 31(2): 98—103.

[19] 孔红梅, 赵景柱, 姬兰柱, 等. 生态系统健康评价方法初探[J]. 应用生态学报, 2002, 13(4): 486—490.

[20] 索安宁, 张明慧, 于永海, 等. 曹妃甸围填海工程的环境影响回顾性评价[J]. 中国环境监测, 2012, 28(2): 105—110.

[21] 李秀梅, 袁承志, 李月洋. 渤海湾海岸带遥感监测及时空变化[J]. 国土资源遥感, 2013, 25(2): 156—163.

[22] 于永海, 索安宁. 围填海评估方法研究[M]. 北京: 海洋出版社, 2013.

[23] 方成, 王小丹, 杨金霞, 等. 唐山市海岸线变化特征及环境影响效应分析[J]. 海洋通报, 2014, 33(4): 149—127.

[24] 周维海. 唐山曹妃甸建设中的生态环境问题[J]. 水科学与工程, 2010(6): 37—38.

[25] 刘宪斌, 李孟沙, 梁梦宇, 等. 曹妃甸近岸海域表层沉积物粒度特征及其沉积环境[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2016, 35(3): 507—514.

[26] 王欣平. 曹妃甸海岸带生态系统健康评价及空间表征[D]. 石家庄: 河北师范大学, 2015.