

基于“双核”评价框架的 近40年来胶州湾海洋环境健康状况演变

王启栋^{1,2,3,4}, 宋金明^{1,2,3,4}, 袁华茂^{1,2,3,4}

(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 青岛 266071;

2.青岛海洋科学与技术试点国家实验室 海洋生态与环境科学功能实验室 青岛 266237;

3.中国科学院大学 北京 100049;4.中国科学院海洋大科学研究中心 青岛 266071)

摘要: 基于近海生态环境健康状况“双核”评价框架,文章综合评估近40年来胶州湾海洋环境健康状况,梳理胶州湾生态环境伴随青岛市经济社会发展的演变历程。以每10年为1个区间,近40年来胶州湾海洋生态环境健康状况的“双核”评价结果为:1981—1990年为“良+0.22”、1991—2000年为“优+0.53”、2001—2010年为“良+0.87”以及2011—2020年为“优+0.90”。随着青岛市经济社会的发展,人类对胶州湾海洋资源环境开发利用的力度不断加大,胶州湾生态环境也出现各种问题:20世纪80年代水质恶化,90年代生物群落健康状况下滑,2000年后富营养化问题严重。2010年以来,青岛市加大生态保护和环境治理力度,胶州湾的海洋生态环境得到显著改善,而伴随着新旧动能转化提速和产业结构不断优化升级,经济开发活动对胶州湾海洋生态环境的扰动不断降低,最终实现胶州湾海洋经济与环境良性、健康的绿色发展模式。

关键词: 海洋环境健康评价;“双核”框架;胶州湾

中图分类号:X826;P76

文献标志码:A

文章编号:1005-9857(2023)04-0029-10

Evolution of Marine Environmental Health in Jiaozhou Bay in Recent 40 Years Based on the ‘Dual Core’ Assessment Framework

WANG Qidong^{1,2,3,4}, SONG Jinming^{1,2,3,4}, YUAN Huamao^{1,2,3,4}

(1.CAS Key Laboratory of Marine Ecology and Environment Sciences, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. Marine Ecology and Environment Sciences Laboratory, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266237, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Center for Ocean Mega-sciences, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China)

Abstract: Based on the “dual core” framework for assessing the health status of the offshore ecological environment, the marine environmental health status of Jiaozhou Bay in the past 40

收稿日期:2022-09-14; 修订日期:2023-02-22

基金项目:中国科学院战略性先导科技专项项目(XDA23050501);青岛海洋科学与技术试点国家实验室“问海计划”项目(2021WHZZB0902).

作者简介:王启栋,助理研究员,博士,研究方向为海洋环境健康评价

通信作者:宋金明,研究员,博士,研究方向为海洋生物地球化学

years was comprehensively evaluated, and the evolution process of the ecological environment of Jiaozhou Bay along with the economic and social development of Qingdao was combed. Taking every 10 years as an interval, the “double core” assessment results of the marine ecological environment health of Jiaozhou Bay in the past 40 years are as follows: “good +0.22” from 1981 to 1990, “excellent +0.53” from 1991 to 2000, “good +0.87” from 2001 to 2010 and “excellent +0.90” from 2011 to 2020. With the economic and social development of Qingdao, human beings have made greater efforts to develop and utilize the marine resources and environment of Jiaozhou Bay, and various ecological problems have also occurred in Jiaozhou Bay: the water quality deteriorated in the 1980s, the health status of biological communities declined in the 1990s, and the problem of eutrophication was serious in the 2000s. Since 2010, Qingdao has strengthened ecological protection and environmental governance, and the marine ecological environment of Jiaozhou Bay has been significantly improved. With the acceleration of the transformation of old and new kinetic energy and the continuous optimization and upgrading of industrial structure, the disturbance of economic development activities to the marine ecological environment of Jiaozhou Bay has been continuously reduced. Qingdao has finally realized a benign and healthy green development model between marine economy and ecological environment for Jiaozhou Bay.

Keywords: Marine environmental health assessment, The “dual core” framework, Jiaozhou Bay

0 引言

近数十年来,人类经济社会迅猛发展,近岸海域成为经济活动的主要承压区,污染物排放、过度捕捞和海岸工程等使得近海海洋环境频繁出现水质恶化、生境破坏、资源衰竭和生态灾害等问题,而遭到破坏的海洋生态环境反过来又会掣肘海洋经济产业的发展,因此这种以破坏海洋环境为代价的开发利用模式定然不可持续^[1-2]。对近岸海洋生态环境的健康状况进行综合评估,是推进海洋生态环境管理和保护工作、使海洋生态系统能够持续为人类服务的关键。当前,国内外大多数海洋环境健康评价方法聚焦于海洋生态系统自身的状态和功能,对于海洋环境资源为人类提供可持续性价值和服务方面的评估较少。因此,本研究基于现有的近海环境健康评价体系,新构建适用于河口、海湾等近岸海域的“双核”评价框架,其中内核评价聚焦于水体、沉积物和生物群落等生态系统自身结构组成的健康状况,外核评价则通过社会经济学指标评估人类对海洋环境资源的开发利用程度^[2]。

海湾与河口是陆地和海洋之间极为重要的过

渡带,在人类社会经济发展中具有极为重要的地位,但同时也是环境变化的敏感区和生态系统的脆弱区,受人类活动的影响十分强烈^[3]。位于南黄海西北部的胶州湾是典型的半封闭式海湾,20世纪80年代以来,青岛市经济的高速发展对胶州湾的海洋环境造成显著的破坏,污水排放、围海造地和海上开发等使胶州湾出现面积减小、纳潮能力下降、水质污染等诸多问题。近年来人们逐渐增强环保意识并加强对胶州湾的治理和保护,胶州湾海洋生态环境健康状况明显改善。本研究拟基于“双核”评价框架对近40年来胶州湾海洋生态环境健康状况进行综合评估,梳理胶州湾生态环境伴随青岛市经济社会发展的演变历程。

1 研究区域

胶州湾位于山东半岛南岸,是与南黄海相通的半封闭式海湾,其与南黄海的界线为团岛头和薛家岛脚子石的连线。胶州湾环湾地带为青岛市辖地区,沿岸自东向西分别为市南区、市北区、李沧区、城阳区、胶州市和黄岛区。胶州湾东西宽约27.8 km,南北长约33.3 km,湾内平均水深7.0 m,

总体上东部深、西部浅。胶州湾沿岸水系发达,沿岸河流呈放射状汇流于海湾,但无大河入海。胶州湾区域具有明显的海洋性气候特征,累年年均气温 12.3°C ,平均降水量 755.6 mm ,台风、风暴潮、寒潮和海冰等是常见海洋灾害^[4]。

2 评价方法

本研究基于综合指标体系法所构建的“双核”评价框架,以海洋生态系统自身的状态为评价内核,以人类社会经济学指标为评价外核,其中内核要素是海洋环境健康的基础和前提,而外核要素是海洋环境健康之于人类的价值体现。采用该框架评价海洋环境健康状况的最终目的是辅助管理决策,从而实现人类对海洋资源环境的可持续利用^[2]。该框架的评价细则包括3个方面^[5-6]。

2.1 指标选取

内核评价以海洋生态系统自身的状态为主体,其评价要素由生物群落、水体环境和沉积物质量3个部分构成。其中,生物群落具体评价指标为浮游植物(细胞密度和多样性指数)、浮游动物(生物量和多样性指数)和底栖生物(生物量和多样性指数),水体环境具体评价指标为pH值、溶解氧、悬浮物、富营养化指数和污染物(重金属和有机污染物),沉积物质量具体评价指标为有机碳、硫化物和污染物(重金属和有机污染物)。外核评价主要评估人类对海洋的开发利用程度,本研究根据胶州湾地区的实际情况,选取海水养殖产量、滨海湿地面积和港口吞吐量作为外核评价指标。

2.2 指标归一化和权重

为了便于比较和计算,所有指标均通过基准值进行归一化(取值为 $0\sim 1$)。对于内核要素指标,得分越高意味着海洋生态系统自身健康状况越好;而对于外核要素指标,得分越高表示对海洋资源环境的开发利用程度越高。具体的归一化方法,根据指标特性的不同分为2类。

(1)正指标(取值越高越健康)的归一化公式为:

$$I_i = \text{Mea}_i / \text{Ref}_i \quad (1)$$

式中: I_i 为正指标 i 的归一化值; Mea_i 为指标 i 的实际监测值; Ref_i 为指标 i 的基准值,且当计算出的 I_i 大于1时其取值为1。

(2)反指标(取值越低越健康)的归一化公式为:

$$I_j = \text{Ref}_j / \text{Mea}_j \quad (2)$$

式中: I_j 为反指标 j 的归一化值; Ref_j 为指标 j 的基准值; Mea_j 为指标 j 的实际监测值,且当计算出的 I_j 大于1时其取值为1。

水体环境和沉积物质量相关指标的基准值参照国家标准《海水水质标准》(GB 3097-1997)和《海洋沉积物质量》(GB 18668-2002)中一类水质和一类沉积物的标准界定值,生物群落相关指标以多年平均值为参考基准。

对于某内核评价要素下的不同指标,其负面偏离基准值的程度越大,其权重越高。指标权重的计算公式为:

$$W_i = (1 - I_i) / \sum (1 - I_i) \quad (3)$$

最终某评价要素的得分为:

$$E_f = \sum W_i I_i \quad (4)$$

此外,水体环境和沉积物质量中的污染物指标,包括重金属及有机污染物等也通过该规则来确定权重。外核指标的权重则依据不同指标所体现的对海洋资源环境的扰动程度来确定。

2.3 内核要素评级和最终评价结果

生物群落是海洋生态系统的核心,因此在内核评价中,生物群落的优先级(或权重)高于水体环境和沉积物质量,这将体现在最终的评级规则中。根据3个评价要素的得分,将海洋生态系统自身状态的评价等级划分为优、良、中、差、劣5个等级(表1)。总体来说,生物群落的健康状况决定内核评级的上限。

表1 基于海洋生态系统自身状态的内核评价等级划分

Table 1 Gradation of inner-core assessment relating to the status of marine ecosystem

要素得分	水体环境和沉积物质量(取低值)		
	0.67~1.00	0.34~0.66	0~0.33
0.67~1.00	优	良	中
生物群落 0.34~0.66	良	中	差
0~0.33	差	劣	劣

本框架的最终评价结果将保留内核因素的评级和外核因素的评分2个部分(内核评级+外核得分),2个部分结果对比可以明确指示海洋资源开发

利用的力度是否与海洋生态环境的健康稳定相匹配,这可为平衡海洋环境保护和经济社会发展提供更明确的指导。在针对评价结果进行管理决策时,经济社会的发展应该以海洋生态环境的健康为前提,即内核要素具有更高的优先级。

3 评价结果

3.1 内核评价

3.1.1 水体环境

水体环境的评价指标包括 pH 值、溶解氧、悬浮物、富营养化和污染物。近 40 年来,胶州湾海水未出现明显的酸化和低氧现象,以海水水质标准为参考,pH 值和溶解氧的年均值均优于第一类海水水质标准的要求,按照“双核”框架的评价原则,指标 pH 值和溶解氧的归一化得分为 1,在水体环境要素评价中的权重为 0。因此,本研究对悬浮物、富营养化和污染物 3 个指标进行重点讨论。

悬浮物浓度不仅能从视觉上直观反映海水水质,还与生物活动、污水排放等密切相关。胶州湾水体中悬浮物浓度少有报道,选取水体透明度作为替代指标。近 40 年来胶州湾年均海水透明度的变化^[7]如图 1 所示。

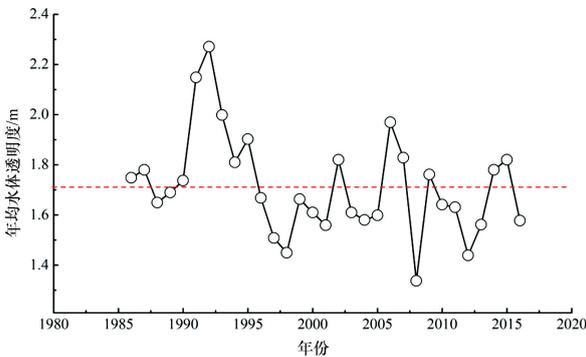


图 1 近 40 年来胶州湾年均海水透明度的变化 (虚线为平均值)

Fig.1 Variation of annual average seawater transparency of Jiaozhou Bay in recent 40 years (The dotted line is the average value)

胶州湾年均海水透明度总体上呈现下降趋势。以多年平均值作为参考基准,对海水透明度指标进行归一化,然后以每 10 年为 1 个阶段,计算出 1981—1990 年、1991—2000 年、2001—2010 年、

2011—2020 年胶州湾海水透明度指标的归一化得分分别为 1.00、1.00、0.97 和 0.95,反映出胶州湾水体的清澈程度不断降低,但总体上降低的程度不大。

富营养化是近岸海域最普遍的健康问题之一,可通过富营养化指数(E)进行评估。近 40 年来胶州湾海水 DIN、DIP 和 COD 年均浓度的变化^[4]如图 2 所示。

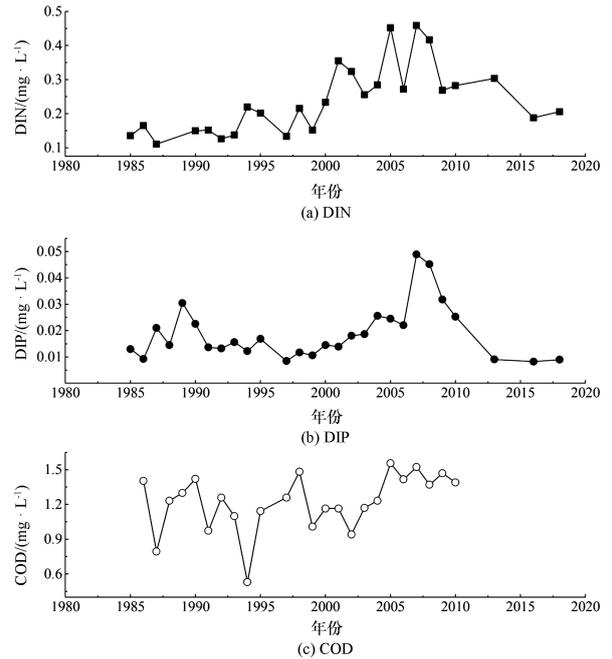


图 2 近 40 年来胶州湾海水 DIN、DIP 和 COD 年均浓度的变化

Fig.2 Variations of annual average concentration of DIN, DIP and COD in Jiaozhou Bay in recent 40 years

DIN 自 20 世纪 80 年代以来逐渐升高,至 2005—2008 年达到浓度最大值;DIP 的浓度自 2000 年开始逐渐升高,2007—2008 年大幅升高,之后迅速回落;COD 没有明显的变化趋势。

富营养化指数的变化如图 3 所示。自 2000 年开始出现富营养化现象($E > 1$),2005 年达到中度富营养化水平($2 \leq E < 5$),2007—2008 年达到重度富营养化水平($5 \leq E < 15$),之后富营养化水平迅速回落,2010 年后整体上不再富营养化。以 1 作为富营养化指数的归一化标准,计算出的归一化得分如图 3 所示,以每 10 年为 1 个阶段,4 个阶段的归一化得分分别为 0.98、1.00、0.48 和 0.93。

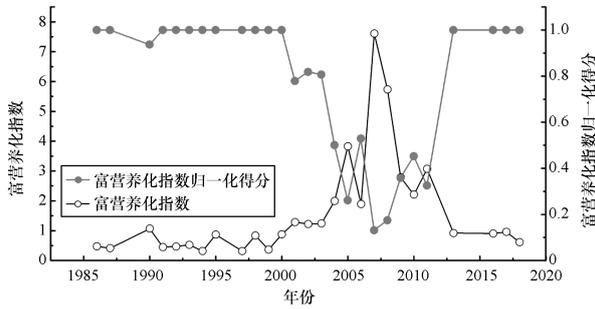


图 3 近 40 年来胶州湾海水富营养化指数及其归一化得分的变化

Fig.3 Variations of seawater eutrophication index and its normalized score in Jiaozhou Bay in recent 40 years

胶州湾海水中的主要污染物为汞(Hg)、铅(Pb)和石油类(PHs),近 40 年来的主要浓度变化^[4,8]如图 4 所示。

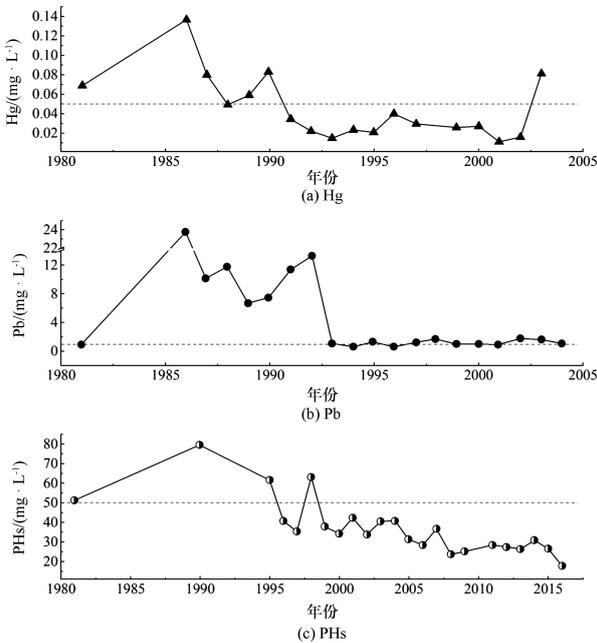


图 4 近 40 年来胶州湾海水 Hg、Pb 和 PHs 年均浓度的变化(虚线为第一类海水水质标准)

Fig.4 Variations of annual average concentration of Hg, Pb and PHs in Jiaozhou Bay in recent 40 years (The dotted line is the Class I Sea Water Quality Standard)

3 种污染物浓度均从 20 世纪 80 年代初期快速升高,并从 90 年代开始逐渐回落至第一类海水水质标准以下。根据《青岛市海洋环境公报》,2010—2020 年各类重金属的年均浓度均不超过第一类海水水质

标准。根据内核评价的归一化原则,Hg 在 1981—1990 年的归一化得分为 0.69,Pb 在 1981—1990 年、1991—2000 年和 2001—2010 年 3 个时间区间的归一化得分分别为 0.25、0.73 和 0.91,PHs 在 1981—1990 年的归一化得分为 0.90。根据内核评价的权重确定原则,最终计算出海水污染物这一指标在 4 个时间区间的得分分别为 0.42、0.73、0.91 和 1.00。

基于上述 5 个水体环境指标的详细评估以及内核评价指标的权重确定原则,对水体环境这一内核要素的最终得分进行计算,结果如表 2 所示。1981—1990 年胶州湾海水污染严重,水体环境最差,总体得分仅 0.44;1991—2000 年随着污染物水平的下降,胶州湾水体环境质量有所提高;2001—2010 年胶州湾海水出现严重的富营养化问题,导致总体水环境质量再次下降;2011—2020 年胶州湾的污染和富营养化问题都得到较好的治理和缓解,水体环境总体上较好。

表 2 近 40 年来胶州湾水体环境质量评价得分

Table 2 Score of water environmental quality in Jiaozhou Bay in recent 40 years

年份	水体环境指标得分					水体环境总得分
	pH 值	溶解氧	悬浮物	富营养化	污染物	
1981—1990	1.00	1.00	1.00	0.98	0.42	0.44
1991—2000	1.00	1.00	1.00	1.00	0.73	0.73
2001—2010	1.00	1.00	0.97	0.48	0.91	0.56
2011—2020	1.00	1.00	0.95	0.93	1.00	0.94

3.1.2 沉积物环境

沉积物环境通过有机碳含量、硫化物含量以及重金属和石油类等污染物的含量来评价,以《海洋沉积物质量》(GB 18668—2002)中第一类沉积物的标准界定值为归一化基准。根据 2016 年和 2017 年《青岛市海洋环境公报》,2012—2017 年除东北部娄山河口附近及海西湾部分站位石油类超过第一类海洋沉积物质量标准外,其他区域沉积物的有机碳、硫化物以及铜、铅、锌、镉、铬、汞、砷等重金属含量均符合第一类海洋沉积物质量标准^[8-9]。根据柱状沉积物反演的结果,近 40 年来胶州湾中部及湾口处沉积物中重金属的含量均低于第一类海洋沉积物质量标准^[10];胶州湾西部沉积物中,铬的含量在

20世纪80年代末、90年代初介于第一类和第二类海洋沉积物质量标准之间^[11]；胶州湾东部的海泊河口沉积物中，2003年前铜、铅、锌、镉、铬的含量均远远超出第一类海洋沉积物质量标准，但仅限于紧邻近岸河口的小部分区域^[12]。从整个胶州湾海域的平均值来看，近40年来胶州湾沉积物环境整体上处于健康状态，各指标均在第一类海洋沉积物质量标准范围内，即在“双核”框架的评价原则下，胶州湾沉积物质量评价的归一化得分为1。

3.1.3 生物群落

近40年来胶州湾浮游植物数量和多样性指数、浮游动物生物量和多样性指数以及底栖生物生物量和多样性指数年均值的变化^[13-16]如图5所示。

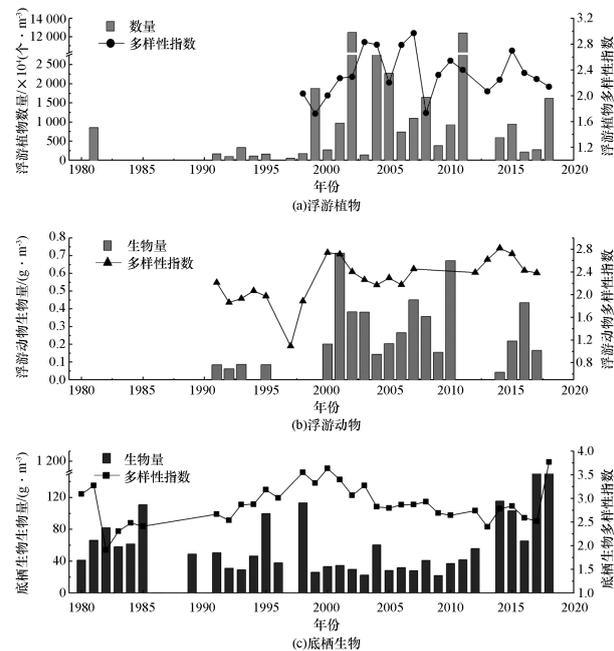


图5 近40年来胶州湾浮游植物数量和多样性指数、浮游动物生物量和多样性指数以及底栖生物生物量(除菲律宾蛤仔)和多样性指数年均值的变化

Fig.5 Variations of phytoplankton quantity and diversity index, zooplankton biomass and diversity index, benthic biomass (except Philippine clam) and diversity index in Jiaozhou Bay in recent 40 years

自1981年以来，胶州湾浮游植物数量呈现先下降后升高的趋势，自20世纪90年代末期开始浮游植物数量显著升高，2001—2010年浮游植物数量的年均值为90年代浮游植物平均数量的6.5倍，而从

90年代中后期开始胶州湾显著升高的营养盐含量是浮游植物增长的驱动因素^[13]。与浮游植物相对应，胶州湾浮游动物生物量在2001—2010年同样显著升高，超过90年代的3倍。胶州湾底栖生物生物量(不计菲律宾蛤仔)在近40年来呈现先减少后增加的趋势，与浮游植物和浮游动物不同，底栖生物生物量(不计菲律宾蛤仔)在2001—2010年较低且变化不大，而计入菲律宾蛤仔后这一时期的底栖生物量与2000年之前相比反而显著增加，这说明2000年以后总底栖生物量的上升是由菲律宾蛤仔引起的^[13]。由于人工捕捞和底播养殖活动对胶州湾菲律宾蛤仔数量变化的影响较大，在内核要素评价中暂不计入。

以多年平均值为参考基准对生物群落指标进行归一化。生物量的年均值数据波动较大，为避免个别年份出现的极大值或极小值对平均值的影响过大，通过2倍标准差对数据进行初步筛选，将筛选后的年均数据平均值作为参考基准进行归一化，对于指标数据不全的年份，仅以所获取的指标进行计算。近40年来，胶州湾生物群落评价得分的变化如图6所示。胶州湾生物群落整体处于比较健康的状态，近40年的平均得分为0.84，仅在1990—2000年有所下降，该阶段有3个年份的生物群落得分在0.66以下。同样以每10年为1个阶段，生物群落在4个阶段的归一化得分平均值分别为0.93、0.69、0.85和0.91，反映近40年来胶州湾生物群落的健康状况总体呈现先下降后升高的变化趋势。

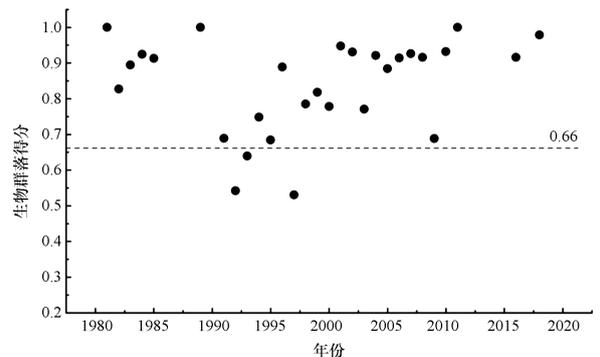


图6 近40年来胶州湾生物群落评价得分的变化
Fig.6 Variation of scores of biological communities in Jiaozhou Bay in recent 40 years

基于上述水体环境、沉积物质量和生物群落的评价结果以及“双核”框架的内核评级方法，对胶州

湾近 40 年来海洋环境健康状况的内核要素进行评级。1981—1990 年、1991—2000 年、2001—2010 年以及 2011—2020 年胶州湾海洋环境内核要素的评级结果分别为良、优、良和优。1981—1990 年较高的污染物含量使胶州湾水体环境较差,导致内核评级为“良”;2001—2010 年胶州湾水体富营养化比较严重,影响水体环境得分,导致内核评级为“良”。总体来看,近 40 年来胶州湾海洋环境健康状况经历 20 世纪 80 年代较差、90 年代好转、2000 年后再次恶化、2010 年后再次改善的变化过程。

3.2 外核评价

综合考虑对海洋环境产生扰动的可量化性以及产业类型差异性等因素,本研究选择海水养殖产量、滨海湿地面积和港口吞吐量作为外核评价指标,评估近 40 年来青岛市海洋经济发展对胶州湾资源环境的开发利用程度。海水养殖是人类对海洋资源的直接索取,对海洋生态环境的扰动最大;滨海湿地面积变化反映人类对海洋资源环境的直接占用;港口吞吐量反映海上交通运输的密集程度,胶州湾平均水深只有 7 m,中、大型船只在胶州湾内的运输活动会给水体带来巨大扰动,加速水体混合和沉积物再悬浮等,进而对海洋生态环境造成影响。这 3 个指标均与人类经济活动密切相关。

根据《青岛市统计年鉴》的统计数据,胶州湾的海水养殖产业归属于城阳区、胶州市和黄岛区(原黄岛、胶南),其中黄岛区处于胶州湾和以外海域的海岸线比例为 1:5,因此仅将黄岛区养殖产量的 1/6 计入胶州湾养殖产量中^[17]。近 40 年来,胶州湾海水养殖年产量的变化^[18-19]如图 7 所示。

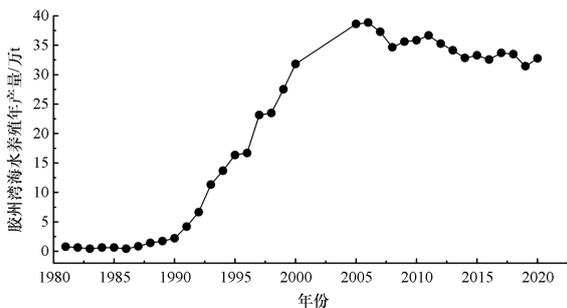


图 7 近 40 年来胶州湾海水养殖年产量的变化

Fig.7 Variation of annual output of mariculture in Jiaozhou Bay in recent 40 years

胶州湾海水养殖的产量自 1990 年左右开始迅速增长,至 2006 年达到最大值,而后开始呈现缓慢下降的趋势,因此将 2006 年的海水养殖产量作为参考基准进行归一化,从而计算出 1981—1990 年、1991—2000 年、2001—2010 年以及 2011—2020 年胶州湾海水养殖产量指标的平均得分分别为 0.03、0.45、0.95 和 0.87。

胶州湾沿岸水系较为发达,发育有大面积的河口湿地和潮间带湿地,不同年份的湿地面积^[17]如表 3 所示。

表 3 胶州湾滨海湿地面积

Table 3 Areas of coastal wetlands in Jiaozhou Bay

年份	河口湿地	潮间带湿地	合计
1986	1 071.6	9 607.7	10 679.3
1995	1 275.5	6 459.2	7 734.7
2010	1 555.3	5 897.3	7 452.6
2013	1 615.3	5 469.4	7 084.7

人类的经济开发活动是滨海湿地面积减少的主要原因,人类开发程度越大,滨海湿地的面积越少。由于外核指标主要反映人类对海洋资源环境的开发利用程度,滨海湿地面积越小反映开发利用程度越高,以滨海湿地面积最小的年份作为参考基准计算归一化得分,1986 年、1995 年、2010 年和 2013 年分别为 0.66、0.92、0.95 和 1.00(由于数据有限,仅以特定年份代表 4 个年份区间)。总体来看,胶州湾滨海湿地的面积不断减小,其中 20 世纪 80 年代和 90 年代剧烈减少,1986—1995 年不到 10 年的时间缩减 27.6%,这可能与 20 世纪 80 年代以来胶州湾的开发利用进入快速期有关,而 2000 年后滨海湿地缩减的速度明显变缓,1995—2013 年近 20 年的时间仅缩减不到 10%。

近 40 年来,青岛市港口货物吞吐量及其年增长率的变化^[19]如图 8 所示。除极少数年份下降以外,青岛市港口吞吐量基本呈现逐年增长的趋势,其中 1993—2008 年经历快速增长时期,2010 年后增长率放缓,近 40 年来的平均增长率约为 9.64%。总体来说,港口吞吐量越大意味着船舶航行对胶州湾

海洋生态环境的扰动越大,因此以港口吞吐量最大的 2020 年作为参考基准进行归一化计算,1981—1990 年、1991—2000 年、2001—2010 年以及 2011—2020 年胶州湾港口货物吞吐量的平均得分分别为 0.05、0.14、0.54 和 0.83。

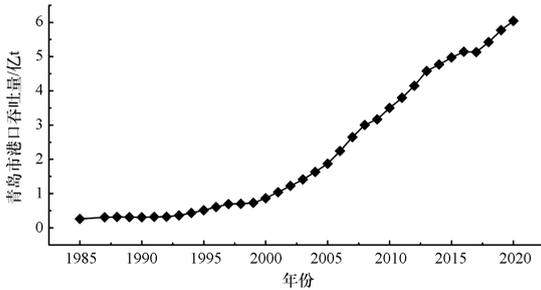


图 8 近 40 年来青岛市港口吞吐量的变化

Fig.8 Variation of Qingdao port throughput and annual growth rate in recent 40 years

根据不同海洋产业对海洋资源环境扰动程度的不同对外核指标进行赋权,对应海洋第一产业的海水养殖产量权重为 50%,主要与海洋第一、二产业相关的滨海湿地面积权重为 30%,对应海洋第三产业的港口吞吐量权重为 20%,进而计算出不同时间段的外核得分如表 4 所示。随着年代推进而不断增大的外核得分表明,人类活动对胶州湾的开发利用程度不断加大,其中 20 世纪 80 年代和 90 年代是开发利用海洋资源环境的快速增长期,2010 年后开发利用的增长速度明显放缓。外核得分变化与青岛市近 40 年来 GDP 增长率的变化有较高的吻合度,反映胶州湾海洋资源环境对青岛市经济社会发展的重要贡献。

表 4 近 40 年来胶州湾外核评价得分

Table 4 Score of outer-core in Jiaozhou Bay in recent 40 years

年份	指标得分			外核得分
	海水养殖产量	滨海湿地面积	港口吞吐量	
1981—1990	0.03	0.66	0.05	0.22
1991—2000	0.45	0.92	0.14	0.53
2001—2010	0.95	0.95	0.54	0.87
2011—2020	0.87	1.00	0.83	0.90

3.3 “双核”评价结果

基于上述内核和外核评价结果,以每 10 年为

1 个区间概括近 40 年来胶州湾海洋生态环境健康状况的“双核”评价结果为:1981—1990 年为“良+0.22”、1991—2000 年为“优+0.53”、2001—2010 年为“良+0.87”以及 2011—2020 年为“优+0.90”。

总体来说,近 40 年来随着青岛市经济社会的发展,对胶州湾海洋资源环境开发利用力度不断加大,而胶州湾的海洋生态环境健康状况也在人类活动加剧和青岛市经济结构转型过程中经历起伏。20 世纪 80 年代胶州湾的开发利用进入快速期,这一时期的主要特点是对海洋资源环境的开发利用粗犷、直接,环境保护意识薄弱,尽管总体上开发程度还不高,但沿岸迅猛发展的工农业给胶州湾带来大量的污染物质,直接导致胶州湾水体环境的恶化。90 年代青岛市经济出现“过热”,在宏观调控“双紧”背景下,工业经济增长速度趋缓,产业结构不断调整,这一时期胶州湾水体污染物含量有所下降,但前期环境恶化的积累开始对生物群落产生显著影响,生物群落的健康状况相对较差。2000 年后青岛市经济结构进一步调整,一次产业的比例缩小至 5% 以下,经济发展不再单纯追求速度,而是更加看重质量,多个经济指标在这一时期达到峰值并迎来拐点,同时也意味着对胶州湾的开发利用程度达到新的高度,这一时期胶州湾海洋生态环境最显著的特点是营养物质的大量增加导致水体富营养化。2010 年以来人们的环境保护意识不断加强,青岛市践行“绿水青山就是金山银山”的理念,统筹推进环境污染防治,加大生态保护和环境治理力度,胶州湾的海洋生态环境也迎来显著的改善,总体上处于健康状态,尽管经济指标指示对胶州湾的开发利用程度仍在高位,但随着新旧动能转化提速、产业结构不断优化升级,经济开发活动对海洋生态环境的扰动也不断降低,对海洋环境影响较大的海洋渔业转型升级、资源修复步伐加快,滨海旅游业释放新活力,交通运输业运行平稳,海洋设备制造、海洋生物医药、海洋新材料、海水利用等产业蓬勃发展,这些新兴产业在为海洋经济提供新的增长点的同时,也大幅降低海洋经济产业对胶州湾海洋生态环境的扰动,实现良性、健康的绿色发展模式。

4 结语

近 40 年来,基于“双核”评价框架的胶州湾海洋

生态环境健康状况评价结果为:1981—1990年为“良+0.22”、1991—2000年为“优+0.53”、2001—2010年为“良+0.87”以及2011—2020年为“优+0.90”。1981—1990年和2001—2010年内核评价不为“优”的主要原因分别是水体污染和富营养化,而尽管1991—2000年内核评级总体为“优”,但部分年份生物群落健康状况较差。随着青岛市经济社会的发展,近40年来人们对胶州湾的开发利用程度不断提高,但在2000年后迎来增速的拐点,这与青岛市GDP增速的变化相吻合,体现胶州湾海洋经济对青岛市经济总量的贡献。2010年以来,在不断增强的环境保护意识和相关政策的推动下,青岛市加大胶州湾海洋生态环境保护和治理力度,同时加快产业结构升级,大力发展海洋新兴产业,为海洋经济增长释放新活力的同时,大幅降低经济开发活动对胶州湾海洋生态环境的扰动,从而走出一条经济社会与海洋资源环境的可持续发展之路。

参考文献(References):

[1] 宋金明,段丽琴.渤黄东海微/痕量元素的环境生物地球化学[M].北京:科学出版社,2017.
SONG Jinming, DUAN Liqin. Environmental biogeochemistry of micro/trace elements in the Bohai Sea, the Yellow Sea and the East China Sea[M]. Beijing: Science Press, 2017.

[2] 王启栋,宋金明,袁华茂,等.基于近海健康评价现有体系的我国普适海洋健康评价“双核”新框架的构建[J].生态学报,2021,41(10):3988—3997.
WANG Qidong, SONG Jinming, YUAN Huamao, et al. A universal and new dual-core framework for ocean health assessment in China based on the existing offshore health assessment systems[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(10): 3988—3997.

[3] 宋金明,袁华茂,李学刚,等.胶州湾的生态环境演变与营养盐变化的关系[J].海洋科学,2020,44(8):106—117.
SONG Jinming, YUAN Huamao, LI Xuegang, et al. Ecological environment evolution and nutrients variations in Jiaozhou Bay [J]. Marine Sciences, 2020, 44(8): 106—117.

[4] 宋金明,段丽琴,袁华茂.胶州湾的化学环境演变[M].北京:科学出版社,2016.
SONG Jinming, DUAN Liqin, YUAN Huamao. Evolution of chemical environment in Jiaozhou Bay [M]. Beijing: Science Press, 2016.

[5] 王启栋,宋金明,袁华茂.2020年秋季渤海的健康状况与海域开发利用建议[J].海洋开发与管理,2021,38(11):113—120.

WANG Qidong, SONG Jinming, YUAN Huamao. Health assessment in autumn 2020 and suggestions on the development and utilization of the Bohai Sea [J]. Ocean Development and Management, 2021, 38(11): 113—120.

- [6] 王启栋,宋金明,袁华茂,等.基于“双核”新框架的烟台近岸海洋环境健康综合评价[J].应用生态学报,2021,32(11):4068—4076.
WANG Qidong, SONG Jinming, YUAN Huamao, et al. Assessment of marine environmental health of Yantai offshore based on the new “dual-core” framework [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(11): 4068—4076.
- [7] 殷子瑶,江涛,杨广普,等.1986—2017年胶州湾水体透明度时空变化及影响因素研究[J].海洋科学,2020,44(4):21—32.
YIN Ziyao, JIANG Tao, YANG Guangpu, et al. The spatial-temporal variation of water clarity and its influencing factors in Jiaozhou Bay from 1986 to 2017 [J]. Marine Sciences, 2020, 44(4): 21—32.
- [8] 青岛市海洋与渔业局.2016年青岛市海洋环境公报[Z].2017. Qingdao Bureau of Ocean and Fisheries. Qingdao marine environment bulletin of 2016 [Z]. 2017.
- [9] 青岛市海洋与渔业局.2017年青岛市海洋环境公报[Z].2018. Qingdao Bureau of Ocean and Fisheries. Qingdao marine environment bulletin of 2017 [Z]. 2018.
- [10] 黄小平,黄良民,宋金明,等.营养物质对海湾生态环境影响的过程与机理[M].北京:科学出版社,2019.
HUANG Xiaoping, HUANG Liangmin, SONG Jinming, et al. The process and mechanism of the impact of nutrients on the ecological environment of bay [M]. Beijing: Science Press, 2019.
- [11] 张东华,吕钊臻,邵主峰,等.胶州湾沉积物柱状样重金属垂向分布特征及其控制因素[J].海洋环境科学,2020,39(5):664—669,675.
ZHANG Donghua, LYU Zhaozhen, SHAO Zhufeng, et al. The vertical distribution patterns of heavy metals in a sediment core of the Jiaozhou bay and their controlling factors [J]. Marine Environmental Science, 2020, 39(5): 664—669, 675.
- [12] 李凤业,李学刚,齐君,等.近百年来胶州湾沉积物中重金属元素的累积过程及其环境意义[J].海洋学研究,2011,29(2):35—45.
LI Fengye, LI Xuegang, QI Jun, et al. Accumulation of heavy metals in the core sediments from the Jiaozhou Bay during last hundred years and its environmental significance [J]. Journal of Marine Sciences, 2011, 29(2): 35—45.
- [13] 孙松,孙晓霞.海湾生态系统的理论与实践:以胶州湾为例[M].北京:科学出版社,2015.
SUN Song, SUN Xiaoxia. Theory and practice of bay ecosys-

- tem: a case study of Jiaozhou Bay [M]. Beijing: Science Press, 2015.
- [14] 罗璇, 孙晓霞, 郑珊, 等. 2011 年胶州湾网采浮游植物群落结构及其环境影响因子 [J]. 海洋与湖沼, 2016, 47(5): 915-923.
- LUO Xuan, SUN Xiaoxia, ZHENG Shan, et al. On phytoplankton community structure and causative factors in the Jiaozhou Bay in 2011 [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2016, 47(5): 915-923.
- [15] 杨世民, 刘任茜, 陈文卿. 2018 年胶州湾浮游植物群落结构 [J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2020, 50(9): 72-80.
- YANG Shimin, LIU Renqian, CHEN Wenqing. The phytoplankton community in Jiaozhou Bay in 2018 [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2020, 50(9): 72-80.
- [16] 崔雯瑶, 杨湘君, 张蒙生, 等. 胶州湾春季大型底栖生物多样性及群落结构特征 [J]. 海洋科学, 2020, 44(6): 101-109.
- CUI Wenyao, YANG Xiangjun, ZHANG Mengsheng, et al. Diversity and community structure of the macrobenthos in Jiaozhou Bay in spring [J]. *Marine Sciences*, 2020, 44(6): 101-109.
- [17] 隋春晨, 宋影飞, 罗先香, 等. 海洋健康指数法对青岛胶州湾健康状况评价的研究 [J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2018, 48(1): 85-96.
- SUI Chunchen, SONG Yingfei, LUO Xianxiang, et al. Study on Jiaozhou Bay health condition assessment using the ocean health index framework [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2018, 48(1): 85-96.
- [18] 张巍巍, 谷小勇. 良种繁育视角下 50 年青岛海水养殖业变迁研究 [J]. 水产养殖, 2021, 42(1): 73-78.
- ZHANG Weiwei, GU Xiaoyong. Study on the changes of Qingdao mariculture industry in the past 50 years from the perspective of improved breed breeding [J]. *Aquaculture*, 2021, 42(1): 73-78.
- [19] 青岛市统计局. 2006-2021 年青岛市统计年鉴 [EB/OL]. http://qdtj.qingdao.gov.cn/tongjisj/tjsj_tjnj/, 2022-07-01.
- Qingdao Bureau of Statistics. Qingdao statistical yearbook of 2006-2021 [EB/OL]. http://qdtj.qingdao.gov.cn/tongjisj/tjsj_tjnj/, 2022-07-01.