

基于海洋健康指数的海洋生态系统健康评价研究—— 以辽东湾为例

张煜珩^{1,2}, 马新东^{2,3}, 姚文君², 侯旭林⁴, 王 瑶⁴,
姚子伟², 高郭平¹

(1.上海海洋大学 海洋生态与环境学院 上海 200090; 2.国家海洋环境监测中心 生态环境部近岸海域生态环境重点实验室, 大连 116023; 3.海南大学 南海海洋资源利用国家重点实验室, 海口 570228; 4.大连工业大学 轻工与化学工程学院, 大连 116034)

摘 要: 海洋生态系统健康评价是目前海洋健康研究的核心, 海洋健康指数 (ocean health index, OHI) 作为一个开放性的量化综合评价体系, 可以为海洋生态系统健康评价和预测提供科学有效的抓手。本研究以辽东湾为例, 在 OHI 框架基础上, 结合沿海实际环境特征, 对模型、指标和参考点进行了优化, 并对 1996—2020 年的健康指数进行了评估。研究结果表明, 辽东湾 OHI 指数得分为 55.38~77.12, 平均值为 64.79, 并且随着年代变化整体上呈现一定的波动性和略微下降的趋势。OHI 框架中 10 个不同指标的得分差异显著, 其中清洁水域和旅游休闲的平均得分相对较高, 平均值分别达到 89.34 和 89.00; 食物供给和海岸防护的整体得分相对较低, 平均值分别为 32.65 和 39.07。辽东湾海洋健康的影响因素分析结果显示, 传统渔民捕捞机会、碳汇、食物供给、生物多样性和海岸防护对海洋生态系统健康的贡献率分别为 18.1%、15.7%、14.5%、13.3% 和 12.1%。趋势预测分析结果表明, 自然产品、物种、捕捞渔业、海岸防护及碳汇等指标的未来情况不容乐观, 尤其是以海盐、海化产品为代表的自然产品指标下降趋势更为明显。

关键词: 海洋健康指数; 海洋生态系统健康评价; 趋势预测; 辽东湾

中图分类号: X826

文献标识码: A

文章编号: 1007-6336(2024)05-0723-10

Research on the health assessment of marine ecosystems based on the ocean health index—a case study in Liaodong Bay

ZHANG Yuheng^{1,2}, MA Xindong^{2,3}, YAO Wenjun², HOU Xulin⁴, WANG Yao⁴,
YAO Ziwei², GAO Guoping¹

(1.College of Marine Ecology and Environment, Shanghai Ocean University, Shanghai 200090, China; 2.State Environmental Protection Key Laboratory of Coastal Ecosystem, National Marine Environment Monitoring Center, Dalian 116023, China; 3.State Key Laboratory of Marine Resource Utilization in South China Sea, Hainan University, Haikou 570228, China; 4.College of Light Industry and Chemical Engineering, Dalian Polytechnic University, Dalian 116034, China)

Abstract: Marine ecosystem health assessment is the core of ocean health research currently. As an open quantitative evaluation framework, the Ocean Health Index (OHI) can provide a scientific and effective method

收稿日期: 2023-10-21, 修订日期: 2024-03-03

基金项目: 国家重点研发青年科学家项目 (2022YFC3105500); 国家自然科学基金项目 (41201491)

作者简介: 张煜珩 (1999—), 男, 江苏人, 硕士, 主要从事海洋生态系统健康评价研究, E-mail: zhangyuheng113@163.com

通信作者: 马新东, E-mail: xdma@hainanu.edu.cn

高郭平, E-mail: gpgao@shou.edu.cn

for the assessment and prediction of marine ecosystem health. Based on the OHI framework and combined with the actual coastal environmental characteristics of Liaodong Bay, the model, indicators, and reference points were optimized and the OHI from 1996 to 2020 were evaluated. The results showed that the overall score of OHI ranges from 55.38 to 77.12, with an average value of 64.79 in Liaodong Bay, and presents a certain volatility and a slight downward trend along the time. The scores of different indicators in the OHI framework varied significantly. The Clean Waters and Tourism and Recreation scores are relatively higher, with an average of 89.34 and 89.00, and the Food Provision and Coastal Protection scores are relatively lower, with average scores of 32.65 and 39.07, respectively. The results of influence analysis indicated that Artisanal Fishing Opportunities, Carbon Storage, Food Provision, Biodiversity and Coastal Protection are main factors affect the ocean health of the Liaodong Bay, with the contribution of 18.1%, 15.7%, 14.5%, 13.3% and 12.1%, respectively. Forecasts of future trends indicated that Natural Products, Species, Fisheries, Coastal Protection and Carbon Storage would be in a negative direction, especially the decline trend of Natural Products represented by sea salt and sea chemicals.

Key words: ocean health index; marine ecosystem health assessment; trend forecast; Liaodong Bay

沿海地区是世界上经济最发达、人口最密集的区域^[1],随着人口增长和经济发展,沿海生态系统受到的压力呈不断加剧的趋势,特别是无序开发、过度捕捞和环境污染等人为活动,进一步破坏了海洋生态系统的平衡,影响了海洋生态系统对人类的服务功能^[2]。海洋健康指数(ocean health index, OHI)作为一种综合的海洋生态系统健康评价指标体系,为理解和追踪海洋生态系统的健康状态提供了一个可量化和可预测的开放评价工具^[3]。OHI主要基于人类在与海洋系统互动过程中可受益的10个指标,通过量化过程对当前和未来的海洋生态系统健康状态进行评估与趋势预测。与其他评价方法不同,OHI更多是以“社会-海洋生态系统”为对象,从人与自然的视角探讨当前生态系统的状况和发生变化的原因,具有灵活和可扩展的特性^[4],可以在全球^[3]、国家^[5-6]和区域^[7-8]等不同的尺度上对海洋生态系统健康状况进行评估。截至目前,我国基于OHI框架开展的海洋生态系统健康评估研究仍相对较少。例如,温泉^[9]对模型框架进行了适应性调整,并开展了全国沿海省份的海洋健康评估工作;Zheng和You^[10]在天津、Ma等^[11]在厦门、杨洋^[12]在浙江省和浙江省温州市、Tian等^[13]在福建及Wu等^[14]在上海,分别根据研究区域自然环境和社会经济活动特征探讨了省、市级尺度上近岸海域的评价问题;隋春晨等^[15]对青岛胶州湾、陈洁等^[16]对广西北部湾开展了海湾的综合评估。以上研究主要集中在单一时

间尺度的状态评估,而关于长期演变过程中的规律以及潜在驱动因素^[17]讨论不足。

辽东湾是我国北部典型的半封闭式海湾,是“辽宁沿海经济带”的核心区域^[18],也是环渤海区域的生态要地。但随着社会经济的发展,海湾生产力下降、功能衰退、生物多样性受损等生态退化现象仍然存在^[19]。此外,现阶段关于辽东湾海洋状况的研究主要围绕某一特殊生境展开,缺乏系统性和宏观性^[17]。综上所述,本研究以人海交互的典型系统——辽东湾为研究区域,运用海洋健康指数框架构建辽东湾的海洋生态系统健康评价体系;基于辽东湾1996—2020年的回顾性评价,研究辽东湾海洋生态系统健康的历史演变规律,探究关键的影响指标和潜在驱动因素,为科学评价和管理辽东湾海域提供借鉴。

1 材料与方法

1.1 研究区域

为便于经济、人口、环境等生态系统健康评价指标的统计,本研究选取辽东湾辽宁海域(38°43'N—40°57'N, 119°51'E—122°18'E)以及沿岸城市大连、锦州、营口、盘锦、葫芦岛为研究区域,岸线全长约1400 km。

1.2 评价方法

本研究以Halpern等^[3]创建的OHI为基础框架,选取食物供给、传统渔民捕捞机会、自然产品、碳汇、海岸防护、海岸带生计与经济、旅游休闲、海洋归属感、清洁水域和生物多样性

10个指标,从当前状态(X_i)、趋势(T_i)、压力(P_i)和恢复力(R_i)4个维度计算各指标得分,进而计算海洋健康指数综合得分来评估海洋生态系统健康状况,方法框架如图1所示。其中,指标权重(a_i)、各类指标和各维度计算公式、参考值选取方法以及指标压力和恢复力数据参考中国海洋健康指数模型^[9]。

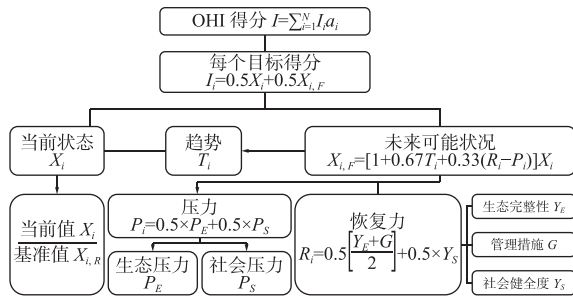


图1 海洋健康指数(OHI)框架

Fig. 1 Framework of the Ocean Health Index (OHI)

OHI模型的指标信息详见表1,辽东湾海洋健康指数模型主要对海水养殖、海岸带生计、旅游休闲和生物多样性指标进行修正。海水养殖指标数据处理以年鉴报道的辽宁省海水养殖产量为基础,依据对应时期岸线比例对辽东湾区域产量进行校正^[15,20]。海岸带生计采用区域城市人口年均可支配收入代表区域涉海产业工资收入,以同时期发展水平较高的上海作为空间参照。辽东湾水质和生物监测数据均来自原国家海洋局1998—2020年的历史调查数据,监测时间以春、夏季为主,其中无机氮、活性磷酸盐、化学需氧量均使用各采样层次的平均值参与评价。在生物多样性物种指标的评价中,在原有濒危物种得分计算的基础上纳入浮游动物、浮游植物、底栖生物的“Shannon-wiener多样性”参数进行整体评价,以进一步表征物种和生态系统的多样性。

表1 海洋健康指数模型参数及相关信息

Tab.1 Parameters and relative information of OHI model

指标	子指标	数据层	数据来源	说明
食物供给 FP	捕捞渔业 ^①	海洋捕捞产量	《中国渔业统计年鉴》 ^[21]	模型参考文献 ^[9]
	FIS	捕捞渔船功率	《中国渔业统计年鉴》 ^[21]	
	海水养殖 ^② MAR	海水养殖产量	《中国渔业统计年鉴》 ^[21]	模型参考文献 ^[9,15]
传统渔民 捕捞机会 ^② AO		渔港数量	《辽宁统计年鉴》 ^[22] 《中国渔业统计年鉴》 ^[21]	模型参考文献 ^[9]
		传统渔民数量	《中国渔业统计年鉴》 ^[21]	
		柴油价格	金投网 ^[23]	
		传统渔民人均可支配收入	《中国渔业统计年鉴》 ^[21]	
自然产品 ^② NP		海盐和海洋化工产品产量	《中国海洋统计年鉴》 ^[24] 《中国海洋经济统计年鉴》 ^[25]	模型参考文献 ^[9]
		资源暴露强度	文献报告 ^[9]	
		资源提取难度	文献报告 ^[9]	
		每种生境碳汇贡献率	文献报告 ^[26]	
碳汇 ^② CS		生境面积	文献报告 ^[27-28] 、Landsat遥感影像数据	生境对象以盐沼和滩涂湿地为主,通过Landsat遥感影像参照辽东湾滨海湿地类型解译标志 ^[27] 获取1995年、2000年、2005年、2009年、2014年和2020年对应面积数据,并以历史状况较好的1995年数据作为历史参照,计算模型参考文献 ^[9]
海岸防护 ^② CP		生境面积	文献报告 ^[27-28] 、Landsat遥感影像数据	
		海岸防护权重	文献报告 ^[9,15]	
海岸带生计 与经济 LE	生计 ^③ LIV	城镇人口年均可支配收入		$X_{LIV} = g_c / g_r$
				$g = \frac{g_t + g_v}{2}$
		农村人口纯收入	《中国海洋统计年鉴》 ^[24] 《中国海洋经济统计年鉴》 ^[25]	其中, g_r 是区域沿海城镇人口年均可支配收入; g_v 是沿海农村人口纯收入

续表

指标	子指标	数据层	数据来源	说明
海岸带生计 与经济 LE	经济 ^② ECO	海洋生产总值	《中国海洋统计年鉴》 ^[24] 、 《中国海洋经济统计年鉴》 ^[25] 、 文献资料 ^[20, 29]	模型参考文献 ^[9]
旅游休闲 ^③ TR		旅游人数	《中国海洋统计年鉴》 ^[24] 《中国海洋经济统计年鉴》 ^[25] 《辽宁统计年鉴》 ^[22]	$x_{TR} = \frac{\log_{10} \left[\left(\frac{A_t}{V_t} S_t \right) + 1 \right]}{\log_{10} \left[\left(\frac{A_r}{V_r} S_r \right) + 1 \right]}$
		区域岸线长度	文献 ^[20, 29]	
		城市旅游可持续性 因子	文献报告 ^[9]	其中, A_t 为 t 年辽东湾区域接待的游客人数(包括国内和国际旅游人数); V_t 对应时期岸线长度(单位为 km); A_r 和 V_r 分别是基准城市(上海)游客人数与岸线长度; S 为可持续因子
海洋归属感 SP	标志性物种 ^④ ICO	受保护的物种	国家重点保护野生动物名录、 世界自然保护联盟(IUCN)名 录、专家咨询	模型参考文献 ^[9]
	人文价值区 ^④ LSP	受保护面积	《中国海洋保护区》 ^[30]	模型参考文献 ^[9]
		海洋文化影响力 因子	文献报告 ^[9]	
清洁水域 ^④ CW		无机氮、活性磷酸 盐、化学需氧量趋 势性数据	监测数据(来自国家海洋局 1998—2020 年辽东湾水质 监测数据)	模型参考文献 ^[9]
生物多样性 BD		物种名录及权重	国家重点保护野生动物名录、 IUCN 名录	$X_I = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N w_i}{N}$
	物种 ^④ SPP	浮游动物、浮游植 物、底栖生物的多 样性指数	监测数据(来自国家海洋局 1998—2020 年辽东湾生物 监测数据)	$X_{SPP} = \frac{X_I + X_{PHY} + X_{ZOO} + X_{BEN}}{4}$
	生境 ^② HAB	生境条件	文献报告 ^[27-28] 、Landsat 遥感影 像数据	$X_{HAB} = \left[\sum_1^k (A_{c,k} / A_{r,k}) \right] / k$ 其中, $A_{c,k}$ 是栖息地的当前面积; $A_{r,k}$ 是栖息地的基准面积

注: ①功能函数; ②时间比较; ③空间比较; ④已知目标

2 结果与分析

2.1 辽东湾不同指标得分的变化趋势

辽东湾不同评价指标得分随年代变化的趋势如图 2 所示。各指标得分均呈现出不同程度的波动变化, 其中食物供给、旅游休闲、海岸防护整体呈上升趋势, 生物多样性、海洋归属感、海岸带生计与经济、清洁水域、碳汇、传统渔民捕捞机会和自然产品则呈下降趋势。不同指标得分差异显著, 其中清洁水域和旅游休闲的平均得分相对较高, 分别为 89.34 和 89.00; 食物供给和海岸防护的整体平均得分相对较低, 分别为 32.65 和 39.07。

具体而言, 食物供给、海洋归属感、海岸带

生计与经济、旅游休闲、传统渔民捕捞机会的变化趋势相对平稳, 特别是海岸带生计与经济以及旅游休闲两类指标的得分保持平稳且维持在较高水平, 说明辽东湾沿岸区域居民从海洋环境中可以稳定地获得高质量的体验与享受。海洋归属感的得分整体处于中等水平, 自 1996 年由最高分 77.31 开始下降后逐渐趋于稳定, 其主要的影响因素是标志性物种子指标得分的下降, 说明辽东湾在海洋保护区域内应继续加强相关濒危物种的保护。食物供给表现平稳, 但其子指标得分出现相反的较大波动。其中, 捕捞渔业的得分在 20 世纪 90 年代末期常年为 0, 主要是因为辽东湾在这一时期可能出现了较为严重的商业性过度捕捞现象, 造成近海渔业资源严重退化, 损

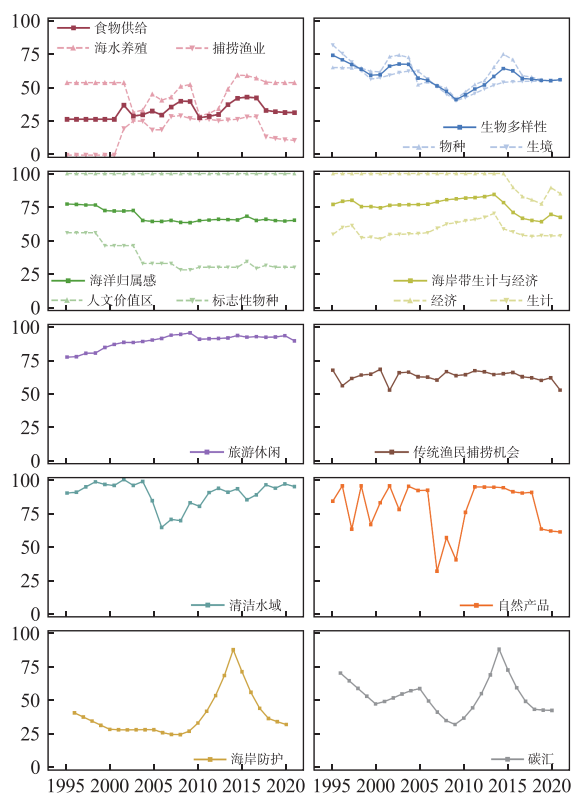


图2 1996—2020年辽东湾海洋健康评价指标结果

Fig. 2 Goal and sub-goal scores for the Liaodong Bay from 1996—2020

害了区域食物供给的可持续性^[31]。

生物多样性、清洁水域、碳汇、海岸防护和自然产品的得分变化趋势波动较大,其中清洁水域和自然产品的平均得分最高,分别为89.34分和79.14分,较大的波动出现在2006—2010年,这与相关统计年鉴的结果一致^[32]。生物多样性指标得分在2009年出现最低值(41.20),造成该趋势变化的原因除物种多样性本身以外,沿海生境变化带来的影响同样不容忽视。与生境状况相对应的指标还有碳汇和海岸防护,两者得分的变化趋势相似,均在2009年前后出现最低值(32.23和24.78),在2014年前后达到最高值(87.74和87.34),分析原因主要是2014年以前辽东湾围填海的强度较大,大量自然滨海滩涂湿地的功能转变,导致整体自然湿地面积减少^[28]。但是,一定面积的芦苇和碱蓬得以保留,导致盐沼面积在整体自然湿地面积中的相对占比有所增大,从而放大了盐沼在碳汇和海岸防护方面的贡献。

2.2 辽东湾海洋健康指数变化趋势

辽东湾海洋健康指数的综合得分如图3所示。整体上,OHI的得分为55.38~77.12,平均值为64.79,随年际变化呈现波动性和略微下降的趋势。参照我国五年规划进行时间划分可以发现,OHI指数最低的年份出现在“十一五”期间(2006—2010年),最低分值为55.38,平均值仅为58.26。由图3C可以看出,该时期辽东湾海洋生态系统健康状况受海水养殖、捕捞渔业、生物多样性、海岸防护及碳汇等指标的影响相对较大,这与辽宁的发展战略相关,在“五点一线”开发背景下,沿海城市开发出现急速发展的高潮,海洋资源的开发力度加速,从而导致辽东湾海洋生态系统健康出现受损状况^[20]。

“十二五”期间(2011—2015年)辽东湾海洋健康指数持续改善,平均值最高达到71.16(图3D),除捕捞渔业和标志物种得分相对较低外,其他指标得分均较“十一五”期间有了明显提高,特别是关键生境的保护与修复大幅改善了海岸防护和碳汇的状态。除此之外,2006年以前的得分相对稳定,均维持在66.00左右(图3A和图3B),而2015年以后再次出现明显的下降趋势,5年的平均值仅为62.94(图3E),主要是资源类指标(包括自然产品和捕捞渔业)和生境类指标(包括碳汇和海岸防护)得分的下降,该结果与“十三五”期间辽东湾经济鱼类资源可持续性下降^[33]以及“红海滩”等重要生境出现萎缩^[34]等现象吻合。

与同期其他海域的评价结果比较(图4)可以发现,2012—2016年,辽东湾海洋健康指数(平均值72)整体上高于浙江(55)^[12]、厦门(52)^[11]、上海(59)^[14]等沿海省、市,高于跨两省一区的北部湾(61)^[16],大致与相对较小尺度的胶州湾(68)^[15]处于同一水平。研究表明,辽东湾的优势指标主要与生态环境和社会经济相关,比如清洁水域、人文价值区、旅游休闲和海岸带生计与经济,说明辽东湾区域的生态环境保护有所成效,海洋生态保护与修复工作改善了近海环境状况和绿色生态空间,提升了沿海城市的滨海旅游景观质量,从而通过环境效益的转化促进了区域内整体经济效益的提升,最终给沿岸居民带来更多的福

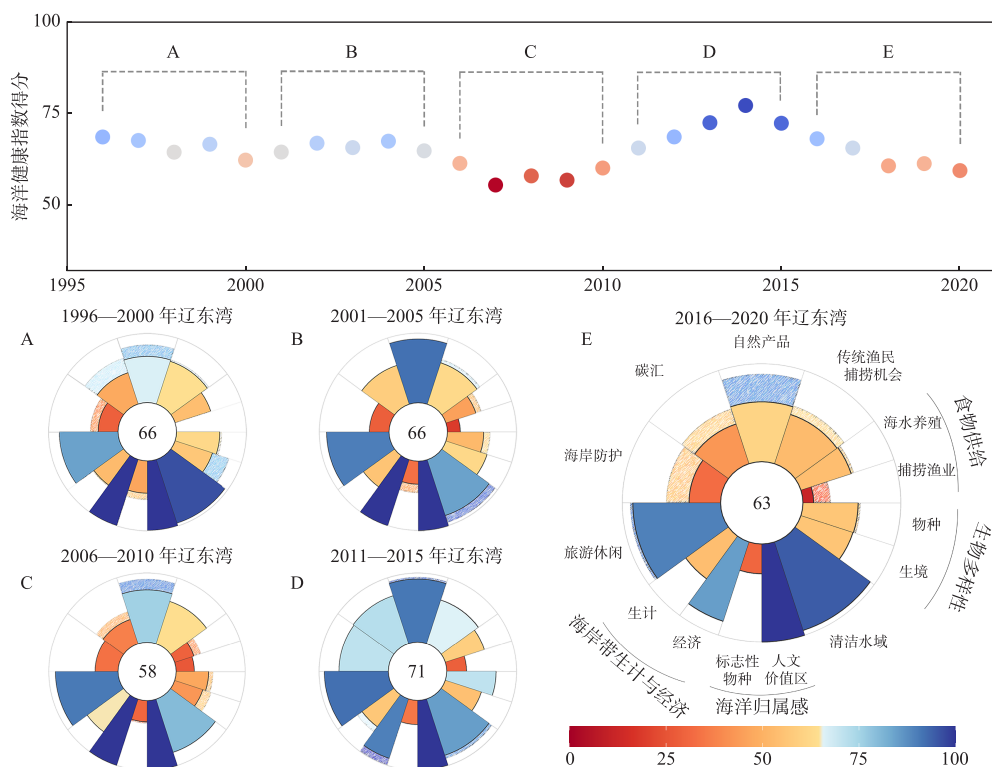


图 3 1996—2020 年辽东湾海洋健康指数玫瑰图

Fig. 3 The rose diagrams of OHI in Liaodong Bay from 1996—2020

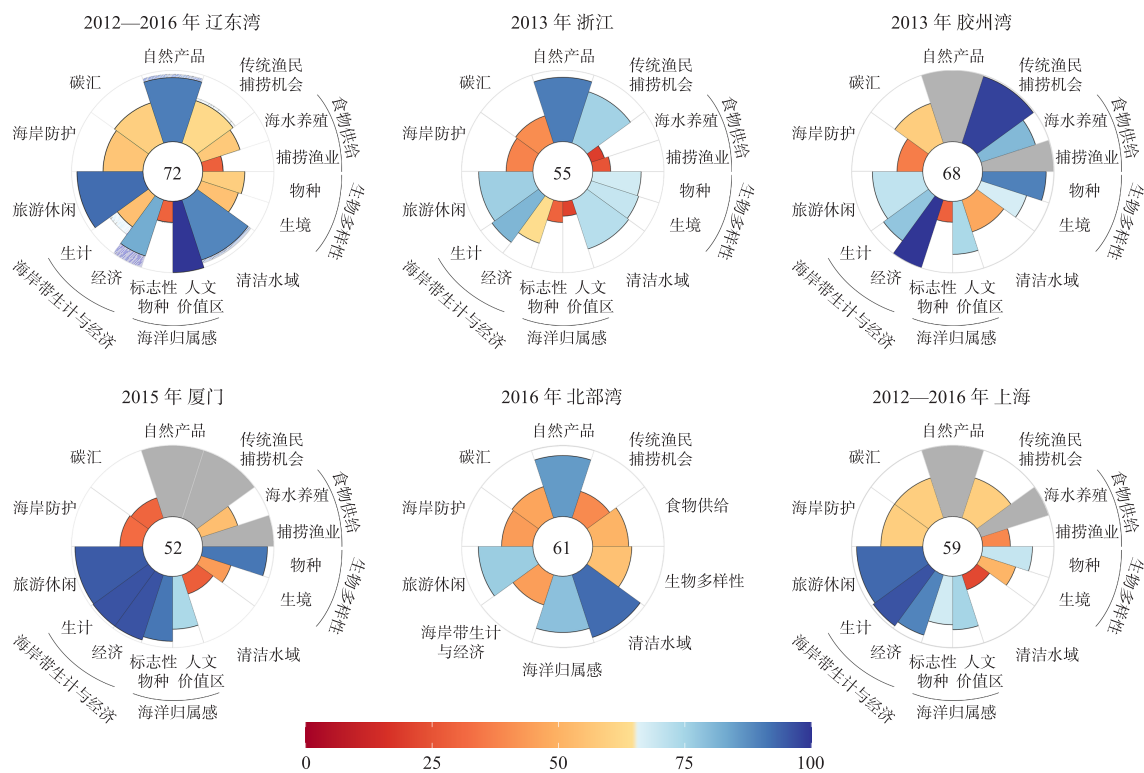


图 4 国内不同区域 OHI 的比较

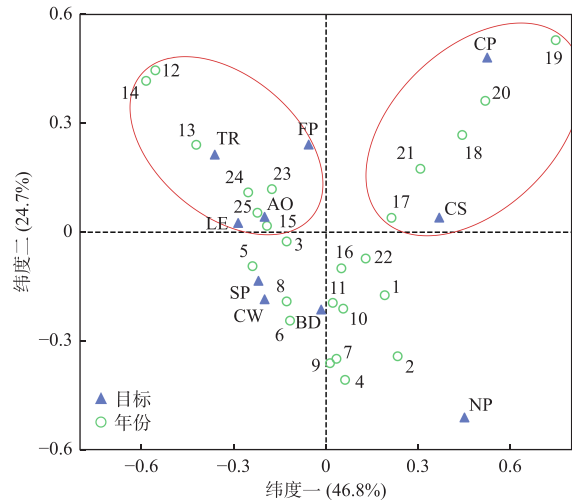
Fig. 4 Domestic comparison of OHI in different regions

祉^[35]。但需要指出的是,辽东湾在传统渔民捕捞机会、食物供给、生物多样性和海岸带生计与经济等方面的可持续性仍存在不足,生物资源的保护需要加大力度。

2.3 辽东湾海洋健康影响因素分析

通过对应分析进一步探讨辽东湾海洋生态系统健康的影响因素,结果如图5所示。沿海生境指标(CS、CP)、渔业资源(FP、AO)及沿海经济指标(TR、LE)在时间趋势上存在明显的象限特征,说明不同时期影响辽东湾海洋生态系统健康的主要因素不同,海岸防护(CP)和以湿地为典型代表的碳汇(CS)与2012—2016年OHI得分的相关性较大(第Ⅰ象限),说明这两类生境指标对该时期海洋生态系统健康的改善贡献较大;FP、AO、TR、LE与2007—2010年和2018—2020年OHI得分主要聚类在第Ⅱ象限,说明这两个时期海洋生态系统健康状况变化的主要因素是渔业捕捞养殖以及较强的娱乐用海开发等经济活动。

为了进一步量化不同指标对辽东湾OHI的相对贡献,采用主成分分析结合多元线性回归的方法对1996—2020年的数据进行量化分析,主成分分析结果及回归系数如表2所示。主成分分析降维后保留3个主成分,其累计方差贡献率达76.2%,其中第一主成分主要与环境类指



(序号1~25分别对应1996—2020年)

图5 辽东湾海洋健康指数年份和影响指标的对应分析因子载荷

Fig. 5 Factor loading diagram of correspondence analysis between years and impact goals of the Liaodong Bay OHI

标相关(BD、SP和TR),第二主成分主要代表与海洋及海岸带相关的经济建设活动,如海岸防护、碳汇和食物供给等,而第三主成分则更多倾向于反映人类自身活动的社会经济指标,如传统渔民捕捞行为和人均可支配收入等,该结果与对应分析的结论基本一致。基于得分系数矩阵构建回归模型,并对回归系数还原至初始变量进行

表2 主成分分析及多元回归分析结果

Tab.2 The results of principal component analysis and multiple regression analysis

指标名称	主成分1		主成分2		主成分3		回归系数(绝对值)
	载荷	得分	载荷	得分	载荷	得分	
生物多样性	0.91	0.25	0.09	0.04	-0.15	-0.10	0.11
清洁水域	0.62	0.17	0.04	0.02	-0.42	-0.28	0.05
海洋归属感	0.86	0.23	-0.34	-0.14	0.08	0.05	0.05
旅游休闲	-0.86	-0.23	0.42	0.17	-0.13	-0.08	0.02
自然产品	0.58	0.15	0.48	0.20	0.10	0.07	0.07
食物供给	-0.49	-0.13	0.70	0.29	-0.22	-0.15	0.12
海岸防护	0.18	0.05	0.92	0.38	0.01	0.01	0.10
碳汇	0.65	0.18	0.70	0.29	0.07	0.05	0.13
海岸带生计与经济	0.01	0.01	-0.04	-0.02	0.85	0.56	0.03
传统渔民捕捞机会	-0.01	-0.01	0.26	0.11	0.71	0.47	0.15
特征值	3.71		2.41		1.50		
方差贡献率/(%)	37.1		24.1		15.0		
累计贡献率/(%)	37.1		61.1		76.2		

归一化后可以得出,影响辽东湾 OHI 的主要因素有传统渔民捕捞机会(回归系数 0.15)、碳汇(0.13)、食物供给(0.12)、生物多样性(0.11)和海岸防护(0.10),相应的贡献率分别为 18.1%、15.7%、14.5%、13.3% 和 12.1%,同样说明影响辽东湾海洋生态系统健康的主要驱动因素是与渔业相关的活动和海岸带经济建设以及海洋环境保护行为。

2.4 辽东湾海洋健康未来趋势预测

对未来趋势预测结果表明(图 6),清洁水域(CW)、旅游休闲(TR)、海岸带生计(LIV)与经济(ECO)、生境(HAB)及海水养殖(MAR)都将呈现正向趋势(斜率>1)。但自然产品(NP)、物种(SPP)、传统渔民捕捞机会(AO)、碳汇(CS)、海岸防护(CP)和捕捞渔业(FIS)未来情况不容乐观(斜率<1),尤其是自然产品(NP)的下降趋势最明显(差异率>15%)。此外,捕捞渔业(FIS)不仅呈现下降的趋势,而且整体的得分仍然较低,需要特别给予关注并采取相应措施。

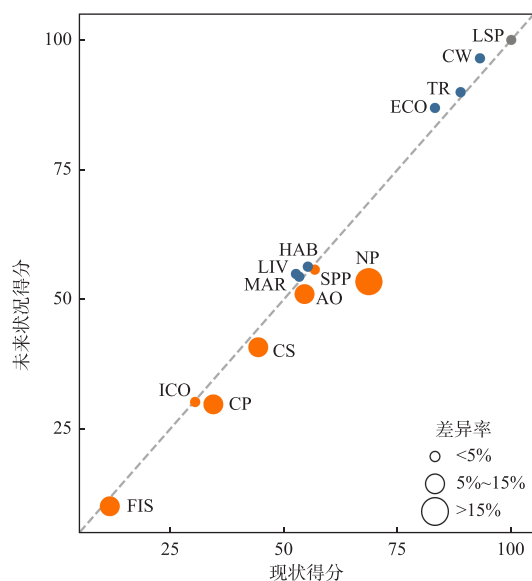


图 6 辽东湾 OHI 指标趋势分析

Fig. 6 The trend analysis of OHI indexes of Liaodong Bay

3 结语

3.1 影响辽东湾生态系统健康的关键指标和主要驱动因素

辽东湾海洋健康指数的案例研究表明,传统渔民捕捞机会、食物供给、碳汇、海岸防护、生

物多样性和自然产品是影响辽东湾“社会-海洋生态系统”的关键指标,这一结果可以从 OHI 框架下各指标的得分和波动变化得到进一步佐证。辽东湾海洋健康影响因素分析结果表明,辽东湾沿岸生物资源可持续发展、海岸带经济建设以及海洋环境保护是改变辽东湾海洋生态系统健康变化的重要驱动因素,这与改革开放后各个时期的社会发展定位存在一定的关系。例如,2010 年以前,我国整体的策略是以经济发展为重点,这也导致了海岸带的盲目开发和环境的无序保护,直接的结果就是滨海湿地面积缩减、海岸人工化趋势过快、海洋生物多样性所受威胁加重等问题。而与渔业相关的活动整体得分较低,这也凸显了辽东湾渔业发展较慢与人类对海洋优质蛋白需求增大之间的矛盾。因此,针对辽东湾海洋生态系统的健康发展,可以从亲海空间品质改善、离岸渔业养殖开发、海洋生态修复等主要方向发力,以陆海统筹和美丽海湾建设为抓手,进一步提升辽东湾的海洋生态系统健康状况。

3.2 关于 OHI 生态系统健康评价的适用性评价

辽东湾海洋健康指数的应用结果说明,海洋健康指数在海洋生态系统健康定量评价和趋势预测方面具有一定的优势,可为今后我国海洋评估与管理提供参考方法,但针对不同的研究区域和研究尺度,模型框架以及框架内的指标选择需要进行适用性评价和数据的属地化,合适的模型框架和精确的数据可以保证 OHI 指数评价的合理性、科学性和可比性。以辽东湾示范研究为例,清洁水域和生物多样性指标是通过区域内的历史监测数据来评价,可以客观地反映辽东湾海洋环境状况,保证评估结果的可靠性。因此沿海栖息地相关指标就应该充分考虑辽东湾沿海栖息地的分类情况,进一步细化评价方法。以碳汇指标为例,即要完善自然植被覆盖类型如芦苇、水稻、碱蓬等统计数据,同时也要与海洋碳汇最新的研究成果结合,补充贝藻类养殖的碳汇能力评价,从而科学地量化碳汇这一指标。此外,由于辽东湾研究期间跨度较大,与海岸带生计和经济相关的涉海产业就业人数、各类涉海产值等数据获取难度较大,可以采用人均可支配收入或

其他可挖掘的指示性指数替代计算, 进而增强 OHI 趋势评价的精确性和连续性。

高时空分辨率的精确数据可以提高 OHI 指数评价和预测的准确性, 但数据获取的难度较高。除此之外, 指标权重的赋值也是影响评价结果的重要因素, 该研究参照国内外使用较多的赋值方式, 采用了等权重赋值的方法进行评价, 结果与其他赋值方法的评价结果差异并不明显。但从模型的框架可以看出, 指标权重的赋值可以在一定程度上反映各个时期政策对海洋发展的侧重程度, 因此, 未来针对同一区域开展 OHI 的趋势评价, 应当考虑不同发展时期的政策因素, 科学地评估权重赋值的合理性和差异性, 进一步提升海洋健康指数评价的准确性。

参考文献:

- [1] NEUMANN B, VAFEIDIS A T, ZIMMERMANN J, et al. Future coastal population growth and exposure to sea-level rise and coastal flooding—a global assessment[J]. *PLoS One*, 2015, 10(3): e0118571.
- [2] HALPERN B S, FRAZIER M, POTAPENKO J, et al. Spatial and temporal changes in cumulative human impacts on the world's ocean[J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 7615.
- [3] HALPERN B S, LONGO C, HARDY D, et al. An index to assess the health and benefits of the global ocean[J]. *Nature*, 2012, 488(7413): 615-620.
- [4] HALPERN B S. Building on a decade of the ocean health index[J]. *One Earth*, 2020, 2(1): 30-33.
- [5] ELFES C T, LONGO C, HALPERN B S, et al. A regional-scale ocean health index for brazil[J]. *PLoS One*, 2014, 9(4): e92589.
- [6] SELIG E R, FRAZIER M, O'LEARY J K, et al. Measuring indicators of ocean health for an island nation: The ocean health index for Fiji[J]. *Ecosystem Services*, 2015, 16: 403-412.
- [7] HALPERN B S, LONGO C, SCARBOROUGH C, et al. Assessing the health of the U. S. west Coast with a regional-scale application of the ocean health index[J]. *PLoS One*, 2014, 9(6): e98995.
- [8] LONGO C S, FRAZIER M, DONEY S C, et al. Using the ocean health index to identify opportunities and challenges to improving southern ocean ecosystem health[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2017, 4: 20.
- [9] 温 泉. 海洋健康指数中国适用性研究[M]. 北京: 科学出版社, 2019.
- [10] ZHENG T, YOU X Y. Assessment of marine ecosystem health of Tianjin Offshore, China[J]. *Oceanological and Hydrobiological Studies*, 2013, 42(4): 442-450.
- [11] MA D Q, FANG Q H, LIAO S H. Applying the Ocean Health Index framework to the city level: A case study of Xiamen, China[J]. *Ecological Indicators*, 2016, 66: 281-290.
- [12] 杨 洋. 中国海洋健康指数评估模型的构建与初步应用研究——以浙江省和温州市为例[D]. 上海: 上海海洋大学, 2016.
- [13] TIAN H Y, LINDENMAYER D B, WONG G T W, et al. A methodological framework for coastal development assessment: A case study of Fujian Province, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 615: 572-580.
- [14] WU Z, CHEN R S, MEADOWS M E, et al. Application of the Ocean Health Index to assess ecosystem health for the coastal areas of Shanghai, China[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 126: 107650.
- [15] 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*, 2018, 48(1): 85-96.
- [16] 陈 洁, 吴 霓, 姚宝龙, 等. 应用海洋健康指数对环北部湾中国近岸海洋健康的评价[J]. *海洋环境科学*, 2019, 38(6): 868-873.
- [17] O'HARA C C, SCARBOROUGH C, HUNTER K L, et al. Changes in ocean health in British Columbia from 2001 to 2016[J]. *PLoS One*, 2020, 15(1): e0227502.
- [18] 聂华欣. 辽东湾近海污染问题与治理研究[D]. 大连: 大连海洋大学, 2022.
- [19] 蔡榕硕, 韩志强, 杨正先. 海洋的变化及其对生态系统和人类社会的影响、风险及应对[J]. *气候变化研究进展*, 2020, 16(2): 182-193.
- [20] 唐 硕. 近40年辽宁省海岸线演变及驱动因素研究[D]. 大连: 辽宁师范大学, 2020.
- [21] 农业农村部渔业渔政管理局, 全国水产技术推广总站, 中国水产学会. 1996—2021中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 1996—2021.
- [22] 辽宁省统计局, 国家统计局辽宁调查总队. 1996—2021辽宁统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 1996—2021.
- [23] 金投网. 辽宁油价历史查询[EB/OL]. [2023-03-21]. <https://www.cngold.org/crude/liaoning.html>.
- [24] 国家海洋局. 1997—2017中国海洋统计年鉴[M]. 北京: 海洋出版社, 1997-2017.
- [25] 自然资源部. 2018—2020中国海洋经济统计年鉴[M]. 北京: 海洋出版社, 2018-2020.
- [26] 王法明, 唐剑武, 叶思源, 等. 中国滨海湿地的蓝色碳汇功能及碳中和对策[J]. *中国科学院院刊*, 2021, 36(3): 241-251.

- [27] 孙 晶, 刘长安, 刘玉安, 等. 辽东湾滨海湿地现状遥感调查[J]. 安徽农业科学, 2017, 45(8): 74-77.
- [28] YAN X L, HU Y M, CHANG Y, et al. Monitoring wetland changes both outside and inside reclamation areas for coastal management of the Northern Liaodong Bay, China[J]. Wetlands, 2017, 37(5): 885-897.
- [29] 李加林, 田 鹏, 邵姝遥, 等. 中国东海区大陆海岸线数据集(1990—2015)[J]. 全球变化数据学报(中英文), 2019, 3(3): 252-258.
- [30] 曾江宁. 中国海洋保护区[M]. 北京: 海洋出版社, 2013.
- [31] 刘峻峰. 中国海洋渔业资源时空演化分析——基于捕捞产量视角[D]. 大连: 辽宁师范大学, 2017.
- [32] 国家海洋局. 2006—2010中国海洋统计年鉴[M]. 北京: 海洋出版社, 2006-2010.
- [33] 王丽华, 王 峰. 辽河口湿地资源与环境承载力分析及其可持续利用[J]. 水资源与水工程学报, 2012, 23(3): 58-61.
- [34] 闫晓露, 钟敬秋, 韩增林, 等. 近40年辽东湾北部围垦区内外滨海湿地景观演替特征及驱动力分析[J]. 地理科学, 2019, 39(7): 1155-1165.
- [35] 侯永丽, 单 良. 辽宁沿海经济带海洋产业结构及竞争力评价研究[J]. 海洋开发与管理, 2022, 39(1): 94-101.

(本文编辑: 胡莹莹)

(上接第 722 页)

- [9] BHAT J A, IQBAL K, KUMAR M, et al. Carbon stock of trees along an elevational gradient in temperate forests of Kedarnath Wildlife Sanctuary[J]. Forest Science and Practice, 2013, 15(2): 137-143.
- [10] JOHNSON D W. Effects of forest management on soil carbon storage[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 1992, 64(1/2): 83-120.
- [11] 王效科, 冯宗炜, 欧阳志云. 中国森林生态系统的植物碳储量和碳密度研究[J]. 应用生态学报, 2001, 12(01): 13-16.
- [12] NOWAK D J, CRANE D E. Carbon storage and sequestration by urban trees in the USA[J]. Environmental pollution, 2002, 116(3): 381-389.
- [13] MA L, HURTT G, TANG H, et al. Spatial heterogeneity of global forest aboveground carbon stocks and fluxes constrained by spaceborne lidar data and mechanistic modeling[J]. Global Change Biology, 2023, 29(12): 3378-3394.
- [14] NI J. Carbon storage in Chinese terrestrial ecosystems: approaching a more accurate estimate[J]. Climatic Change, 2013, 119(3/4): 905-917.
- [15] 陈雅慧, 张树刚, 张 钊. 乐清湾盐沼湿地有机碳密度及碳储量估算[J]. 海洋环境科学, 2023, 42(01): 38-45.
- [16] LIANG Y J, HASHIMOTO S, LIU L J. Integrated assessment of land-use/land-cover dynamics on carbon storage services in the Loess Plateau of China from 1995 to 2050[J]. Ecological Indicators, 2021, 120: 106939.
- [17] LI X T, JIA B Q, LI F, et al. Effects of multi-scale structure of blue-green space on urban forest carbon density: Beijing, China case study[J]. Science of The Total Environment, 2023, 883: 163682.
- [18] LI X, LIU Z S, LI S J, et al. Multi-scenario simulation analysis of land use impacts on habitat quality in Tianjin based on the PLUS model coupled with the InVEST model[J]. Sustainability, 2022, 14(11): 6923.
- [19] 邓 喆, 丁文广, 蒲晓婷, 等. 基于InVEST模型的祁连山国家公园碳储量时空分布研究[J]. 水土保持通报, 2022, 42(3): 324-334, 396.
- [20] 卢雅焱, 徐晓亮, 李基才, 等. 基于InVEST模型的新疆天山碳储量时空演变研究[J]. 干旱区研究, 2022, 39(06): 1896-1906.
- [21] 朱鹏飞. 基于InVEST模型的广西沿海地区土地利用/覆被变化的生态效应研究[D]. 南宁: 广西师范学院, 2018.
- [22] 张云倩, 张晓祥, 陈振杰, 等. 基于InVEST模型的江苏海岸带生态系统碳储量时空变化研究[J]. 水土保持研究, 2016, 23(03): 100-105, 111.
- [23] 李 曼, 张 洁, 李园园. 1985年~2010年疏勒河流域生态系统服务价值评估[J]. 山西师范大学学报(自然科学版), 2019, 33(03): 56-61.
- [24] 帕茹克·吾斯曼江, 艾 东, 方一舒, 等. 基于InVEST与CA-Markov模型的昆明市碳储量时空演变与预测[J/OL]. 环境科学: 1-18. (2023-08-10) <https://doi.org/10.13227/j.hjcx.202302060>.

(本文编辑: 胡莹莹)