

天津大神堂牡蛎礁生态系统现状及影响因素研究

刘森^{1,2,3}, 王彬^{1,2}, 崔健^{1,2}, 徐玉山^{1,2}, 陈晓冉^{1,2}, 于丹^{1,2}, 牛福新^{1,2}

[1. 自然资源部天津海洋中心 (自然资源部天津海洋预报台) 天津 300457; 2. 天津市海洋环境监测预报中心 天津 300457;
3. 自然资源部渤海生态预警与保护修复重点实验室 青岛 266034]

摘要: 牡蛎礁是海岸带重要的生态系统, 具有较高的经济价值和生态服务功能。天津大神堂牡蛎礁是迄今为止发现的我国北方纬度最高的现代活体牡蛎礁生态系统, 其对维护周围海域生态功能、认知渤海湾海陆变迁历史等具有重要作用。然而, 目前针对这一典型生态系统的现状及影响因素的认知不够, 亟待加强。文章基于2021—2023年天津大神堂牡蛎礁生态系统牡蛎种群、底栖生物群落和环境要素等系统性研究结果, 明确了该生态系统牡蛎种群现状, 揭示了影响因素。结果表明, 天津大神堂牡蛎礁造礁种类为长牡蛎 (*Crassostrea gigas*), 密度为237~2680个/m²; 生态系统内底栖生物群落较为稳定, 礁区内外底栖生物多样性指数差异较大; 水体环境受陆源输入影响明显。研究期间, 牡蛎密度整体呈上升趋势, 退化趋势有所减缓, 但仍面临渔业捕捞、海洋工程建设和陆源污染等诸多人为因素的影响, 其生存形势仍然严峻, 建议相关管理部门加强维护管控。

关键词: 牡蛎礁生态系统; 长牡蛎; 影响因素; 保护修复; 天津大神堂

中图分类号: P76

文献标志码: A

文章编号: 1005-9857 (2026) 01-0102-10

Ecological Status and Influencing Factors of the Dashentang Oyster Reef in Tianjin

LIU Sen^{1,2,3}, WANG Bin^{1,2}, CUI Jian^{1,2}, XU Yushan^{1,2}, CHEN Xiaoran^{1,2},
YU Dan^{1,2}, NIU Fuxin^{1,2}

[1. Tianjin Marine Center of the Ministry of Natural Resources (Tianjin Marine Forecasting Station of the Ministry of Natural Resources), Tianjin 300457, China; 2. Tianjin Marine Environment Monitoring and Forecasting Center, Tianjin 300457, China;
3. Key Laboratory of Bohai Sea Ecological Early Warning and Protection and Restoration, MNR, Qingdao 266034, China]

Abstract: Oyster reefs are important coastal ecosystem, possessing high economic value and significant ecological service functions. The Dashentang oyster reef in Tianjin is recognized as the modern living oyster reef ecosystem with the highest latitude discovered so far in northern China. It plays an essential role in maintaining the ecological functions of the adjacent waters and contributes to the understanding of historical interactions between the sea and land in Bohai Bay. However, the current situation and

收稿日期: 2025-09-07; 修订日期: 2025-12-10

基金项目: 自然资源部渤海生态预警与保护修复重点实验室开放基金项目 (2023112); 自然资源部北海局海洋科技项目 (202410); 自然资源部部省合作项目 (2024ZRBSHZ106); 天津市规划和自然资源局科技项目 (KJ [2023] 36).

作者简介: 刘森, 工程师, 硕士, 研究方向为海洋生态保护与修复

通信作者: 牛福新, 高级工程师, 硕士, 研究方向为海洋生态保护与修复、海洋观测与预报

the influencing factors of this typical ecosystem is insufficient studie and requires further investigation. A comprehensive survey focused on the oyster population, benthic biological community and environmental factors was conducted during 2021 to 2023. The current situation and influencing factors of the oyster ecosystem were analyzed in this study. The results indicated that the reef-building species in the Dashentang Oyster Reef is *Crassostrea gigas*, with a density ranging from 237 to 2 680 individuals per square meter. The benthic biological community within the ecosystem is relatively stable, and there is a large difference in the biodiversity index of benthic organisms inside and outside the reef area. The water environment is significantly affected by terrestrial inputs. During the study period, the overall density of oysters showed an upward trend, and the degradation trend has slowed down. Nevertheless, the oyster reef ecosystem is still affected by various human activities, including fishery harvesting, marine engineering construction, and terrestrial pollution, and its survival situation remains severe. Therefore, is recommended that relevant management departments strengthen maintenance and protection of the Dashentang oyster reef.

Keywords: Oyster reef ecosystem, *Crassostrea gigas*, Influencing factors, Protection and restoration, Tianjin Dashentang

0 引言

牡蛎礁作为重要的海岸带生态系统,具有较高的经济价值,同时具有改善水质^[1-2]、维持生物多样性^[3-4]、固碳^[5-6]和岸线防护^[7]等重要的生态系统服务功能。然而,受过度的渔业捕捞、岸线变迁引起的水文条件改变、环境污染和病害等因素影响^[8-9],全球牡蛎礁生存态势不容乐观。Beck等^[10]对全球144个海湾和44个生态区的牡蛎礁状况进行评估,结果显示全球85%的牡蛎礁已经消失,某些海湾中超过99%的牡蛎礁功能性灭绝。其中,中国渤海湾内牡蛎礁生态现状评估结果为差级(poor),亟待进一步加强保护。

天津大神堂牡蛎礁是迄今为止发现的我国北方纬度最高的现代纯天然泥质活体牡蛎礁。由于其面积较大,该礁体对维护周围海域生态功能、研究渤海湾海陆变迁历史等具有重要作用。然而,受人类开发活动等的影 响,大神堂牡蛎礁面积已由20世纪70年代的35 km²锐减至约3.2 km²(2007年调查数据),牡蛎礁体也由连片发育分散为3个礁区^[11],生态系统功能面临严重威胁。天津大神堂牡蛎礁生态系统的退化引起了社会的关注,相关管理部门于2011年开展了渔业资源养护及生态修复工程,2022年实施了牡蛎礁修复工程。这些积极的措施在一定程度上减缓了礁体面积的下降趋势。

目前,关于牡蛎礁的研究成果较多集中在地理分布方面^[12-14],而对天然牡蛎礁种群状况的研究资料相对较少,公开发表的研究仅涉及曹妃甸牡蛎礁^[15]、黄河口牡蛎礁^[16]、江苏蛎蛎山牡蛎礁^[17]等少数区域,对天津大神堂牡蛎礁种群状况的系统性调查尚属空白。系统掌握该生态系统的现状,明确牡蛎种群生存状态及影响因素,是开展牡蛎礁生态系统生态保护修复与科学管理、维护这一独特而宝贵生态系统所必需的基础技术资料。为此,本研究于2021—2023年对天津大神堂牡蛎礁生态系统的牡蛎种群、环境因子、生物群落及周边海洋开发利用现状开展了系统性研究,并阐述了天津大神堂牡蛎礁生态系统现状及影响因素,以为牡蛎礁生态系统生态保护修复与科学管理、生态产品价值评估等工作提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域

天津大神堂牡蛎礁位于天津滨海新区汉沽大神堂以南海域的潮下带。2012年12月21日,国家海洋局批准在该海域建立天津大神堂牡蛎礁国家级海洋特别保护区。2020年12月30日,该保护区更名为天津滨海国家海洋公园,并在原天津大神堂牡蛎礁国家级海洋特别保护区基础上,将周边重要滩涂湿地和浅海水域纳入保护范围。

历史研究资料表明, 现有牡蛎礁体及附近海域布设了 5 个牡蛎种群调查站位、11 个大型底栖生物调查站位及 15 个水环境调查站位 (图 1), 其中, 5 个

大型底栖生物调查站位分布于礁区内, 与牡蛎种群调查站位重合, 6 个站位分布在礁区以外的海域。



图 1 大神堂牡蛎礁生态系统调查站位分布

Fig.1 Distribution map of investigation stations of the Dashentang oyster reef ecosystem

1.2 样品采集与分析

2021—2023 年, 采用资料收集、社会调查和现场调查方式开展生态系统影响因素的研究。依据《海岸带生态系统现状调查与评估技术导则 第 7 部分: 牡蛎礁》(T/CAOE 20.7—2020) 及历史调查资料, 分别于 2021 年 6 月和 11 月、2022 年 8 月和 11 月、2023 年 5 月和 12 月开展牡蛎礁现场样品采集工作。

在牡蛎种群调查站位, 采用水下机器人 (型号: 江豚 IV -C) 摄像方法观测牡蛎生长情况及周边海域生态状况; 牡蛎样品由潜水员携带 25 cm × 25 cm 样框下潜采集, 每个站位取 3 个样方, 样品带回实验室开展牡蛎物种鉴定、密度、补充量、活体壳高、肥满度等指标分析, 指标分析方法参照《海岸带生态系统现状调查与评估技术导则 第 7 部分: 牡蛎礁》(T/CAOE 20.7—2020); 造礁牡蛎物种鉴定采用形态分类学手段与分子生物学鉴定技术相结合的方式。

在大型底栖生物调查站位, 参照《海洋调查规范 第 6 部分: 海洋生物调查》(GB/T 12763.6—2007), 在非礁区软相底质站位采用抓斗式采泥器

采集大型底栖生物样品, 而在礁区硬相底质站位结合牡蛎样品采集, 收集样方内大型底栖生物样品, 带回实验室鉴定分析种类、密度、生物量等。

在水环境调查站位, 参照《海洋调查规范 第 4 部分: 海水化学要素调查》(GB/T 12763.4—2007), 开展水温 (表层水温表法)、盐度 (盐度计法 /SYA2-2 实验室盐度计)、pH (pH 计法 /PHSJ-3F 实验室 pH 计)、溶解氧 (碘量法) 等要素的测定分析。

1.3 数据统计分析

1.3.1 生物多样性指数

生物多样性采用 Shannon-Wiener 多样性指数进行计算, 计算公式如下:

$$H' = -\sum_{i=1}^S P_i \ln P_i \quad (1)$$

式中: P_i 为第 i 种样本中个体数与总个体数的比值; S 为样本中的种类总数。

1.3.2 数据分析

采用 Excel、SigmaPlot 等软件进行数据统计与分析。

海水环境因子在正态性检验基础上, 采用 t 检验

比较礁区内外各指标的均值差异。

2 结果与分析

2.1 牡蛎礁生态系统原位调查

2021—2023年, 水下机器人获取的影像资料

显示, 调查站位水体较为浑浊, 牡蛎壳体上覆有较多毛絮状泥土, 部分牡蛎被沉积物掩盖, 牡蛎礁区内仍存在大片空地, 呈不连续分布, 拍摄到牡蛎礁丛内生活着螺、螃蟹、鱼类等多种底栖生物, 生物多样性较高(图2)。

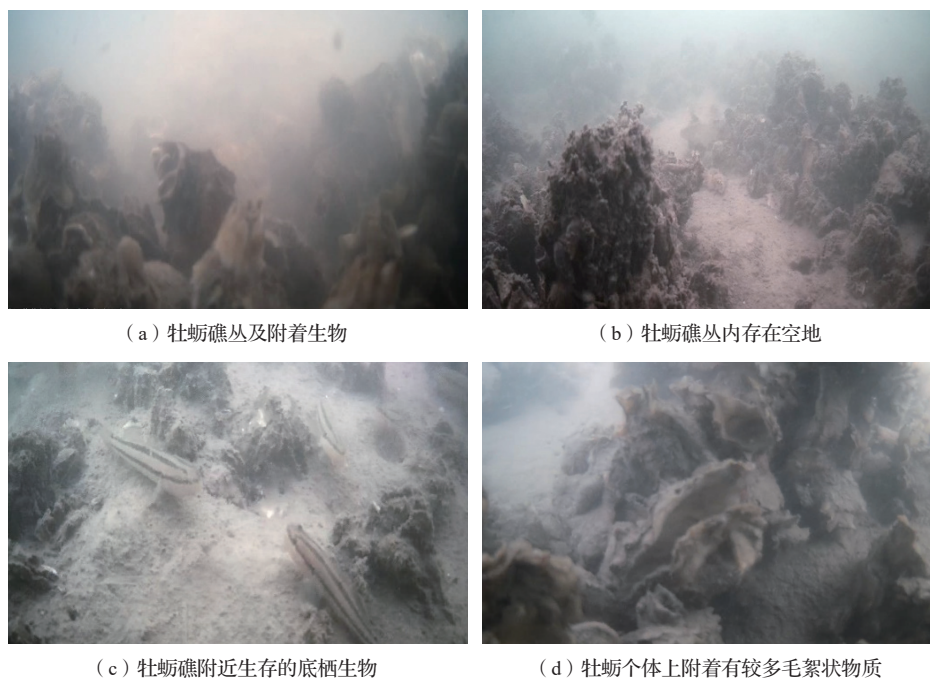


图2 水下机器人拍摄到的大神堂牡蛎礁及附近底栖生物

Fig.2 Photos of the Dashentang Oyster Reef and benthic organisms nearby captured by an underwater robot

2.2 主要造礁物种

经传统形态分类学鉴定, 根据外部形态、内部构造比对结果, 确定该海域采集的牡蛎样本均为长牡蛎(*Crassostrea gigas*)。

此外, 在采集到的牡蛎样品中挑选出形态存在较大差异的样品开展分子鉴定, 选用引物16S和28S序列进行聚合酶链式反应(Polymerase Chain Reaction, PCR)扩增, 利用分子进化遗传分析(Molecular Evolutionary Genetic Analysis, MAGE)软件构建牡蛎的16S及28S系统进化树。基因比对结果显示, 与美国国家生物技术信息中心(NCBI)基因序列数据库(GenBank)上公布的长牡蛎序列相似度达99%。由此推断, 大神堂牡蛎礁的主要造礁物种为长牡蛎。

2.3 牡蛎种群指标

2.3.1 牡蛎密度

2021—2023年, 历次研究中牡蛎密度依次为

(1380 ± 233) 个/ m^2 (2021年6月)、(259 ± 85) 个/ m^2 (2021年11月)、(237 ± 167) 个/ m^2 (2022年8月)、(583 ± 558) 个/ m^2 (2022年11月)、(1630 ± 1036) 个/ m^2 (2023年5月)和(2680 ± 948) 个/ m^2 (2023年12月)。牡蛎密度在2021年牡蛎生长结束期锐减, 但在2022年牡蛎生长结束期密度有所上升, 如图3(a)所示。对比历年秋季牡蛎密度, 研究期牡蛎密度整体呈上升趋势。各站位间牡蛎密度相差较大, 尤其是在牡蛎密度上升时期, 位于礁体北部的4号站位牡蛎密度明显高于其他站位, 且增长速度较快。

2.3.2 牡蛎补充量

将2021年11月、2022年11月和2023年12月(固着高峰期结束后约3个月)所采集样方内壳高小于20 mm的活体牡蛎统计为牡蛎补充量。历次研究中牡蛎补充量分别为(45 ± 63) 个/ m^2 、(93 ± 108) 个/ m^2 和(567 ± 474) 个/ m^2 。牡蛎补充量总体呈上升趋势,

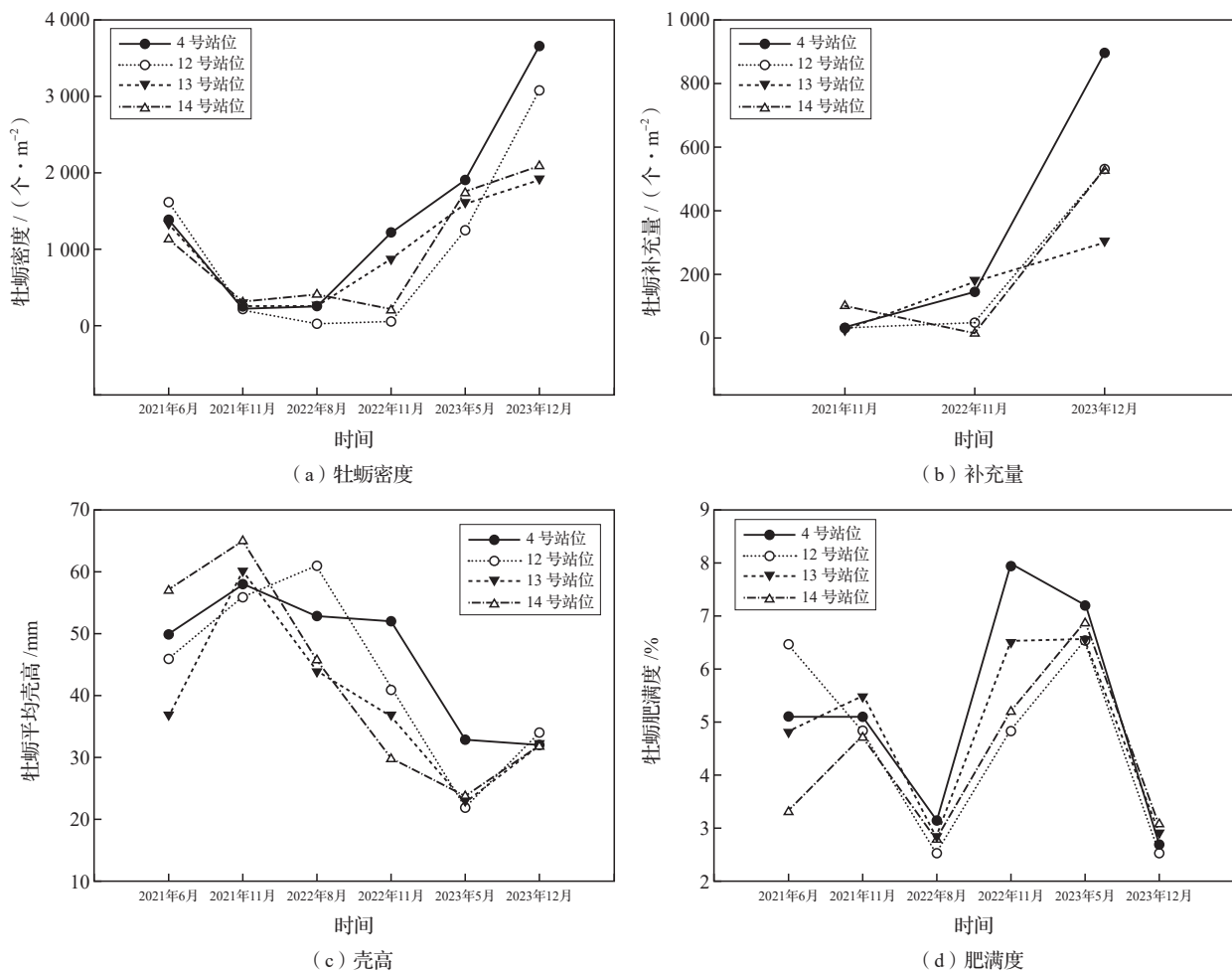


图3 大神堂牡蛎礁种群指标

Fig.3 Indicators of the Dashentang Oyster Reef community

各站位间牡蛎补充量相差较大,位于礁体北部的4号站位牡蛎补充量增幅较为明显,如图3(b)所示。

2.3.3 牡蛎壳高

2021—2023年,历次研究中牡蛎壳高平均值分别为 (48 ± 7) mm、 (60 ± 2) mm、 (51 ± 8) mm、 (40 ± 11) mm、 (25 ± 5) mm和 (32 ± 3) mm。牡蛎壳高平均值的变化趋势与补充量变化趋势相反,如图3(c)所示,在2021年牡蛎生长结束期达到最高值,之后呈下降趋势,到2023年牡蛎排放期达到最低值,2023年牡蛎生长结束期后壳高有所增长。各站位间牡蛎壳高均值差异较大,位于礁区南部的13号站位牡蛎壳高一直处于较低水平。

2.3.4 牡蛎肥满度

2021—2023年,历次研究中牡蛎肥满度平均值分

别为 $(4.93 \pm 1.12)\%$ 、 $(5.03 \pm 0.28)\%$ 、 $(2.84 \pm 0.46)\%$ 、 $(6.12 \pm 1.39)\%$ 、 $(6.82 \pm 1.71)\%$ 和 $(2.83 \pm 0.30)\%$ 。牡蛎肥满度与牡蛎补充量变化趋势相似,如图3(d)所示,呈先降后升趋势,且在2023年牡蛎生长结束期明显降低。研究时间内,部分站位间牡蛎肥满度相差较大,位于礁区北部的4号站位肥满度较其他站位处于中上水平。

2.4 大型底栖生物群落

2021—2023年,在大神堂牡蛎礁生态系统及附近海域共鉴定出底栖生物9门119种,环节动物、软体动物和节肢动物是研究海域底栖生物的主要组成门类,长岛角螺(*Ceratia nagashima*)、丝异须虫(*Heteromastus filiformis*)、不倒翁虫(*Sternaspis sculata*)、棘刺锚参(*Protankyra bidentata*)、凸壳肌

蛤 (*Musculista senhousia*) 和寡节甘吻沙蚕 (*Glycinde gurjanovae*) 为该生态系统的常见优势种。底栖生物平均密度为 108 ~ 230 个 /m², 平均生物量为 11.2 ~ 33.4 g/m², 多样性指数处于 2.85 ~ 3.10, 生物多样性指数为中等或较好水平。研究结果 (图 4) 显示, 该海域底栖生物种类数量、密度、生物量及群落组成较为稳定, 波动不大。研究结果对比显示, 牡蛎排放期底栖生物平均生物量高于牡蛎生长结束期的结果。

牡蛎礁区内外底栖生物多样性指数差异较大 (图 5)。礁区内生物多样性指数在 2021 年 11 月牡蛎生长结束期后呈下降趋势, 且均低于礁区外侧海域底栖生物多样性指数, 说明牡蛎礁生物多样性维持功能有持续减弱的趋势。经分析, 多样性指数变化趋势与牡蛎壳高呈相同的变化趋势, 推测牡蛎个体高度对于牡蛎礁栖息地功能维护具有重要作用。

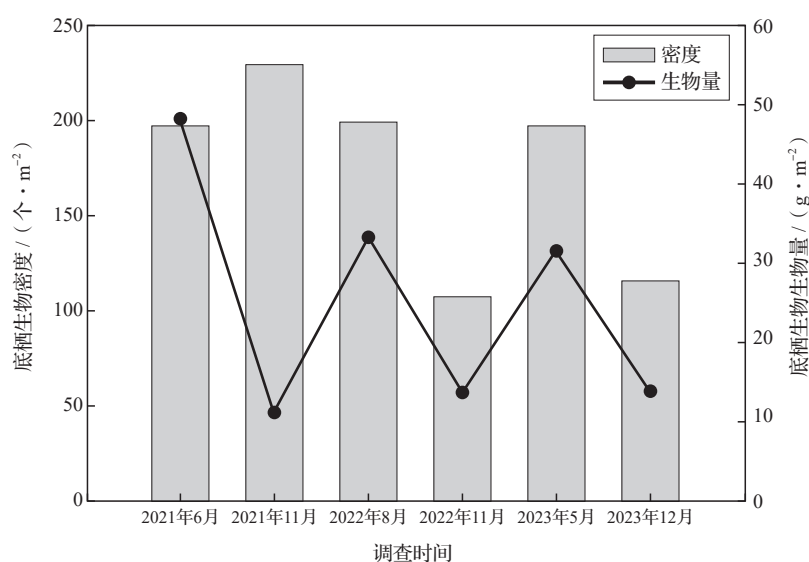


图 4 大神堂牡蛎礁生态系统底栖生物密度和生物量

Fig.4 The density and biomass of benthic organisms in the Dashentang oyster reef ecosystem

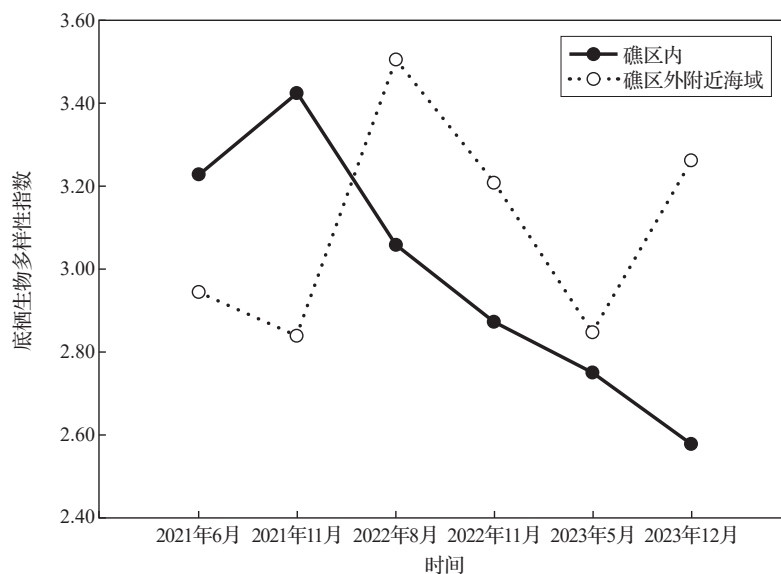


图 5 大神堂牡蛎礁区内外底栖生物多样性指数对比

Fig.5 Comparison of the biodiversity indices of benthic organisms inside and outside the Dashentang oyster reef

2.5 海水环境因子

2021—2023年研究期间,大神堂牡蛎礁生态系统水深平均值为4.3 m,水温为14.6~22.3℃,盐度值为25.284~31.416,pH为8.03~8.35,溶解氧浓度为6.09~8.82 mg/L。

历年同期环境因子无明显变化,较为稳定;当年秋季海水盐度值、pH和溶解氧浓度均低于春季结果,推测与夏季汛期陆源排放有关。牡蛎礁区内外的水温、盐度、pH和溶解氧等水环境因子无显著差异($P > 0.05$),研究区域牡蛎礁对水体理化环境暂未表现明显的调控效应。

3 讨论

3.1 大神堂牡蛎礁生存现状

3.1.1 礁体面积锐减

根据中国地质调查局天津地质调查中心研究资料^[11,18],20世纪70年代,大神堂牡蛎礁面积约为35 km²,且连片发育。2007年,大神堂牡蛎礁总面积减少至3.2 km²,且被分割为3个互相分离的礁区(西北部礁体0.9 km²、南部礁体0.9 km²、东北部礁体1.4 km²),每两个分散的礁区间距达3 km。2011年,原西北部礁体已经消失,南部礁体面积降至0.5 km²,东北部礁体较为稳定。2020年,自然资源部北海局研究结果^[19]显示,南部礁区已完全消失,东北部礁区向北生长超过原天津大神堂牡蛎礁国家级海洋特别保护区范围,面积扩大至2.08 km²。本研究中水下机器人获取的影像资料显示,现存牡蛎礁区内仍存在多片空白区域,礁区南部边缘位置存在较多孤立的块状体,主礁区仍存在被割裂和缩减的风险。历经半个世纪,大神堂牡蛎礁面积已不足20世纪70年代的1/10。于庆云等^[20]预测,若不及时开展科学修复和保护,大神堂牡蛎礁活体将在3~5年内消失。

3.1.2 牡蛎退化趋势减缓,但生长状况仍不稳定

牡蛎密度和补充量是反映牡蛎生长现状和趋势的主要指标。基于本研究2021—2023年研究结果,大神堂牡蛎礁生态系统中牡蛎密度下降趋势在2022年得以缓解,牡蛎补充量在同期有大幅度提升,说明稚贝补充能力有所增强,牡蛎生长呈恢复态势,可能与2022年天津市海洋生态保护修复项目中牡蛎

礁修复工程的实施相关。

然而,牡蛎补充量与牡蛎密度的同步提升说明牡蛎密度的增加主要来源于牡蛎稚贝(壳高小于20 mm)的增加,与黄河口西侧滨州附近海域^[21]、黄河三角洲飞雁滩区域^[22]等以长牡蛎为主要造礁种的牡蛎礁相比,大神堂牡蛎礁的牡蛎壳高平均值较低,其与牡蛎补充量的反向变化趋势也同样证明了牡蛎群体中成体牡蛎比例较低,反映大神堂牡蛎礁区牡蛎多年成活情况较差。贝类肥满度与其生殖周期有密切关系^[23-24],牡蛎肥满度不仅代表其软体部分的肥瘦程度,也反映了牡蛎性腺发育程度、生长情况和营养状况^[25-26]。本研究中,牡蛎肥满度结果波动较大,显示该生态系统牡蛎发育和生长状况并不稳定。此外,各调查站位间牡蛎种群指标相差较大,总体来看,位于礁体北部新生区域的各指标状况优于礁体南部,生态生长态势不均衡,大神堂牡蛎的生存形势仍然不容乐观。与曹妃甸—乐亭海域104~3910个/m²^[15]、小岛河河口(2811±778)个/m²^[16]等天然牡蛎礁密度相比,大神堂牡蛎礁密度较低。

3.2 大神堂牡蛎礁生态系统影响因素

3.2.1 渔业活动

大神堂牡蛎礁及附近海域曾是渤海主要贝类增殖区,渔业资源十分丰富。20世纪90年代,牡蛎成为主要采捕对象,研究资料显示,仅在1999—2001年,活牡蛎总采捕量高达3.7万t^[27]。伴随着渔民开展大规模、高强度的渔业捕捞活动,礁区活体牡蛎密度逐年降低,礁体高度逐年下降,附着基逐年减少,严重超出了大神堂牡蛎礁生态系统的资源承载能力^[18]。截至2012年,天津大神堂牡蛎礁国家海洋特别保护区正式批准建立前,礁体面积已不足2 km²^[28]。另外,在本研究过程中,通过水下机器人摄像在站位附近也发现了地笼和底拖网痕迹,拖网式捕捞可将牡蛎附着基连根拔起,形成数个单独礁块,位于边缘的礁块与母体礁区不断脱离,致使牡蛎礁遭到彻底毁坏。由此推断,高强度的渔业活动是大神堂牡蛎礁体受损的主要因素。

3.2.2 海洋工程

天津大神堂牡蛎礁生态系统北侧及东南侧有大量的围填海工程,半径15 km范围内形成了约合9.6 km²

的围海,其内建设有中心渔港、北疆电厂、航母基地等多个工程项目,其中北疆电厂与大神堂牡蛎礁生态系统的距离仅为7 km。海洋工程的建设使海岸线发生了永久性变化,改变了附近海域的水动力条件,可能导致海底淤积、水质或沉积物环境恶化等问题,进而影响牡蛎礁生态系统的健康状况。

3.2.3 陆源污染

环境因子结果显示,大神堂牡蛎礁生态系统盐度值变化较大,部分站位pH有超标现象,徐冠球等^[29]针对该海域连续多年的海水质量监测结果表明,无机氮、活性磷酸盐、化学需氧量和油类是主要的超标因子,这些均与陆源输入有关。大神堂牡蛎礁生态系统离岸较近,周边分布有多个市政雨水口、盐场排淡口以及北疆电厂温排水口等入海排口,上游汇入的各类污染物以及沿海电厂排放扩散的热能,均会对生态系统环境造成影响。在2023年发生的海河“23·7”流域性特大洪水中,天津市承受了大量的海河流域上游洪水,短时间内大量的淡水集中排放入海导致局部海域盐度骤降,进而威胁牡蛎的生存^[30]。

3.3 大神堂牡蛎礁生态修复与管护

大神堂牡蛎礁生态系统的退化问题持续受到海洋管理部门的关注。天津市海洋行政主管部门和渔业主管部门先后在该生态系统周边海域组织开展了渔业资源养护与生态修复工作^[31]。我国其他牡蛎礁分布区域也开展了相关生态修复工程,有研究数据支持的是长江口牡蛎礁恢复工程,该区域牡蛎密度在2004年不足100个/m²,实施人工牡蛎修复后牡蛎密度呈指数增长并在6年后维持在941个/m²^[5]。证明牡蛎礁的生态修复工作是可行且有效的。

2022—2023年,在中央财政资金的支持下,天津滨海新区人民政府组织实施了天津市海洋生态保护修复项目,于天津滨海国家海洋公园680 hm²范围内开展牡蛎礁修复。本研究结果显示,牡蛎密度与长江口牡蛎礁修复工程^[5]的变化趋势相似,初

步体现了修复成效,生态系统得到一定程度的恢复。然而,面对渔业捕捞和陆源污染等人类活动压力,短期的生态修复工程只能暂缓牡蛎礁面积下降趋势,后期的维护和管理更加重要。目前,原天津大神堂牡蛎礁国家级海洋特别保护区已扩展成为天津滨海国家海洋公园。根据近期发布的《天津滨海国家海洋公园规划(2022—2035年)》,牡蛎礁生态系统被划为生态保育区,全年实施严格保护,禁止开展有损保护对象和与保护无关的活动。但海洋公园建设仍处于起步阶段,现有管护设施以海上监视监测平台为主。建议后期引入执法队伍,加强对人类活动的管控,提升牡蛎礁生态系统监测技术手段,对牡蛎礁生态系统实施更加严格的保护措施,彻底扭转目前生态系统的退化趋势。

4 结论

本研究对大神堂牡蛎礁生态系统中的牡蛎及其他底栖生物群落、水环境状况开展了系统研究,分析了该生态系统面临的主要影响因素。研究表明,大神堂牡蛎礁造礁物种为长牡蛎(*Crassostrea gigas*),密度为237~2 680个/m²。在研究期间,牡蛎密度值在2021年11月有大幅度增长,可能与2022年天津市海洋生态保护修复工程项目相关,但牡蛎生长和发育状况仍不稳定,水下机器人摄录资料也显示牡蛎礁生长态势不佳。大神堂牡蛎礁的退化趋势虽有减缓,但其生长状况仍不稳定。

大神堂牡蛎礁生态系统内底栖生物群落较为稳定,但水体环境受陆源输入影响较大。系统内仍有底拖网作业等严重破坏牡蛎礁生态系统的渔业活动迹象,系统周边存在较多海洋工程和多种陆源输入渠道,面临渔业捕捞、海洋工程建设和陆源污染等多重人为影响因素。目前,天津大神堂生态系统已划定为天津滨海国家海洋公园生态保育区,呼吁相关部门增加管护设施,加大管护力度,以期扭转大神堂牡蛎礁生态系统的退化趋势。

参考文献 (References):

- [1] NELSON K A, LEONARD L A, POSEY M H, et al. Using transplanted oyster(*Crassostrea virginica*)beds to improve water quality in small tidal creeks: a pilot study[J]. Journal of Experimental Marine Biology & Ecology, 2004, 298(2): 347-368.
- [2] NEWELL R I E, FISHER T R, HOLYOKE R R, et al. Influence of eastern oysters on nitrogen and phosphorus regeneration in Chesapeake Bay, USA[J]. Earth and Environmental Science, 2005, 47: 93-120.
- [3] AIROLDI L, BALATA D, BECK M W. The gray zone: relationships between habitat loss and marine diversity and their applications in conservation[J]. Journal of Experimental Marine Biology & Ecology, 2008, 366(1-2): 8-15.
- [4] DAME R, BUSHEK D, ALLEN D, et al. The experimental analysis of tidal creeks dominated by oyster reefs: the premanipulation year[J]. Journal of Shellfish Research, 2000, 19(1): 361-369.
- [5] 沈新强, 全为民, 袁骥. 长江口牡蛎礁恢复及碳汇潜力评估[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(10): 2119-2123.
SHEN Xinqiang, QUAN Weimin, YUAN Qi. Restoration and assessment of carbon sink potential for aintertidal oyster reef in the Yangtze River Estuary, China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2011, 30(10): 2119-2123.
- [6] 奉杰, 张涛, 马培振, 等. 牡蛎礁碳源-汇功能研究进展与展望[J]. 渔业科学进展, 2022, 43(5): 115-125.
FENG Jie, ZHANG Tao, MA Peizhen, et al. Research progress and prospect of oyster reef carbon source and sink functions[J]. Progress in Fishery Sciences, 2022, 43(5): 115-125.
- [7] PIAZZA B P, BANKS P D, LA PEYRE M K. The potential for created oyster shell reefs as a sustainable shoreline protection strategy in Louisiana[J]. Restoration Ecology, 2005, 13(3): 499-506.
- [8] JACKSON J B C, KIRBY M X, BERGER W H, et al. Historical overfishing and the recent collapse of coastal ecosystems[J]. Science, 2001, 293: 629-638.
- [9] 全为民, 沈新强, 罗民波, 等. 河口地区牡蛎礁的生态功能及恢复措施[J]. 生态学杂志, 2006, 25(10): 1234-1239.
QUAN Weimin, SHEN Xinqiang, LUO Minbo, et al. Ecological function and restoration measures of oyster reef in estuaries[J]. Chinese Journal of Ecology, 2006, 25(10): 1234-1239.
- [10] BECK M W, BRUMBAUGH R D, LAURA A, et al. Oyster reefs at risk and recommendations for conservation, restoration, and management[J]. Bioscience, 2011, 61(2): 107-116.
- [11] 李建芬, 商志文, 陈永胜, 等. 渤海湾牡蛎礁的研究现状与保护建议[J]. 地质调查与研究, 2020, 43(4): 317-333.
LI Jianfen, SHANG Zhiwen, CHEN Yongsheng, et al. Research status and protection suggestions on oyster reef in Bohai Bay[J]. Geological Survey and Research, 2020, 43(4): 317-333.
- [12] 王宏, 范昌福, 李建芬, 等. 渤海湾西北岸全新世牡蛎礁研究概述[J]. 地质通报, 2006, 25(3): 315-331.
Wanghong, FAN Changfu, LI Jianfen, et al. Holocene oyster reefs on the northwest coast of the Bohai Bay, China[J]. Geological Bulletin of China, 2006, 25(3): 315-331.
- [13] 王海峰, 裴艳东, 刘会敏, 等. 渤海湾全新世牡蛎礁: 时空分布和海面变化标志点[J]. 地质通报, 2011, 30(9): 1396-1404.
WANG Haifeng, PEI Yandong, LIU Huimin, et al. Holocene oyster reefs: spatial and temporal distribution and sea level indicators in Bohai Bay[J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30(9): 1396-1404.
- [14] 方晶, 王宏, 王福, 等. 渤海湾西北岸埋藏牡蛎礁礁顶上下沉积物中硅藻对“礁泥转换”古沉积环境的重建[J]. 沉积学报, 2012, 30(5): 879-890.
FANG Jing, WANG Hong, WANG Fu, et al. Diatom analysis in the top and bottom muddy sediments of buried oyster reef for the reef mud conversion palaeoenvironmental reconstruction, northwest Bohai Bay[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2012, 30(5): 879-890.
- [15] 全为民, 张云岭, 齐遵利, 等. 河北唐山曹妃甸-乐亭海域自然牡蛎礁分布及生态意义[J]. 生态学报, 2022, 42(3): 1142-1152.
QUAN Weimin, ZHANG Yunling, QI Zunli, et al. Distribution and ecological status of natural oyster reefs on the coast of Caofeidian-Leting, Tangshan, Hebei Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(3): 1142-1152.
- [16] 左涛, 张贝叶, 王俊, 等. 黄河口西南侧小岛河口天然牡蛎礁的牡蛎种群结构[J]. 生态学报, 2024, 44(7): 1-12.
ZUO Tao, ZHANG Beiye, WANG Jun, et al. Population structure of oysters in the natural oyster reef near the mouth of the Xiaodaohe River, southwest of the Yellow River estuary[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(7): 1-12.
- [17] 全为民, 周为峰, 马春艳, 等. 江苏海门蛎蚜山牡蛎礁生态现状评价[J]. 生态学报, 2016, 36(23): 7749-7757.

- QUAN Weimin, ZHOU Weifeng, MA Chunyan, et al. Ecological status of a natural intertidal oyster reef in Haimen County, Jiangsu Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(23): 7749-7757.
- [18] 范昌福, 裴艳东, 田立柱, 等. 渤海湾西部浅海区活牡蛎礁调查结果及资源保护建议[J]. *地质通报*, 2010, 29(5): 660-667.
FAN Changfu, PEI Yandong, TIAN Lizhu, et al. Living oyster reefs and its resource conservation in western Bohai Bay, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 2010, 29(5): 660-667.
- [19] 自然资源部北海局, 河北省自然资源厅, 天津市规划和自然资源局. 2021年京津冀协同发展区域海洋生态状况通报[R]. 2021.
North China Sea Bureau of Ministry of Natural Resources, Hebei Provincial Department of Natural Resources, Tianjin Municipal Planning and Natural Resources Bureau. 2021 Bulletin on marine ecological status of the Beijing-Tianjin-Hebei coordinated development Zone[R]. 2021
- [20] 于庆云, 张晓理, 韩锡锡. 天津大神堂活牡蛎礁渔业资源养护与生态修复浅析[J]. *海洋经济*, 2014, 4(5): 16-22.
YU Qingyun, ZHANG Xiaoli, HAN Xixi. Elementary study on the fishery resources conservation and the ecological restoration of the live oyster reef in Dashentang, Tianjin[J]. *Marine Economy*, 2014, 4(5): 16-22.
- [21] 张明辉, 王晓梅, 郑言鑫, 等. 黄河口典型牡蛎礁分布区资源状况和栖息地功能[J]. *生物多样性*, 2025, 33(4): 24208.
ZHANG Mingyi, WANG Xiaomei, ZHENG Yanxin, et al. Resource status and habitat function of typical oyster reef areas in the Yellow River Estuary[J]. *Biodiversity Science*, 2025, 33(4): 24208.
- [22] 王沈同, 王威, 丛日浩, 等. 黄河三角洲飞雁滩牡蛎礁自然现状评估[J]. *渔业研究*, 2025, 47(3): 261-269.
WANG Shentong, WANG Wei, CONG Rihao, et al. Assessment of the natural status of oyster reefs in Feiyan Beach, Yellow River Delta[J]. *Journal of Fisheries Research*, 2025, 47(3): 261-269.
- [23] 林志华, 单乐州, 柴雪良, 等. 文蛤的性腺发育和生殖周期[J]. *水产学报*, 2004, 28(5): 510-514.
LIN Zhihua, SHAN Lezhou, CHAI Xuiliang, et al. Study on the gonad development and reproductive cycle of *Meretrix meretrix* Linnaeus[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2004, 28(5): 510-514.
- [24] 李永仁, 刘利华, 陈丽梅, 等. 天津海域菲律宾蛤仔肥满规律研究[J]. *天津农业科学*, 2015, 21(2): 14-39.
LI Yongren, LIU Lihua, CHEN Limei, et al. Study on meat condition of *Ruditapes philippinarum* in Tianjin Sea[J]. *Tianjin Agricultural Sciences*, 2015, 21(2): 14-39.
- [25] 张福绥, 马江虎, 何义朝, 等. 胶州湾海湾扇贝肥满度的研究[J]. *海洋与湖沼*, 1991, 22(2): 97-103.
ZHANG Fusui, MA Jianghu, HE Yichao, et al. A study on the meat condition of the bay scallop in Jiaozhou Bay[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1991, 22(2): 97-103.
- [26] 许飞, 刘晓, 张国范. 牡蛎壳腔容积的两种测量方法比较[J]. *海洋科学*, 2007, 31(7): 15-19.
XU Fei, LIU Xiao, ZHANG Guofan. Comparison of two methods to measure the internal shell cavity volume of oyster[J]. *Marine Sciences*, 2007, 31(7): 15-19.
- [27] 郭占锋. 汉沽大神堂外海贝类资源增殖探讨[J]. *天津水产*, 2003(1): 10-13.
GUO Zhanfeng. Exploration on increasing the aquaculture of shellfish resources in the outer sea of Hangu Dashentang[J]. *Tianjin Fisheries*, 2003(1): 10-13.
- [28] 杨朋, 李建芬, 王福, 等. 我国天然牡蛎礁现状及保护修复建议[J]. *中国地质*, 2023, 50(4): 1082-1092.
YANG Peng, LI Jianfen, WANG Fu, et al. Present situation and protection restoration suggestions on the natural oyster reefs in China[J]. *Geology in China*, 2023, 50(4): 1082-1092.
- [29] 徐冠球, 谭晓璇, 屠建波, 等. 天津大神堂牡蛎礁保护区海域海水水质变化趋势分析与评价[J]. *海洋环境科学*, 2022, 41(4): 554-562.
XU Guanqiu, TAN Xiaoxuan, TU Jianbo, et al. Trend analysis and assessment of water quality for Dashentang oyster reef marine special reserve in Tianjin[J]. *Marine Environmental Science*, 2022, 41(4): 554-562.
- [30] DU Jiabi, PARK K, JENSEN C, et al. Massive oyster kill in Galveston Bay caused by prolonged low-salinity exposure after Hurricane Harvey[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 774(2): 145132.
- [31] 殷小亚, 陈海刚, 乔延龙, 等. 天津大神堂牡蛎礁国家级海洋特别保护区现状及对策[J]. *海洋湖沼通报*, 2015(1): 162-166.
YIN Xiaoya, CHEN Haigang, QIAO Yanlong, et al. Present condition and management countermeasures of Dashentang Oyster reef marine special reserve in Tianjin[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2015(1): 162-166.