

DOI: 10.5846/stxb202005101172

全为民, 张云岭, 齐遵利, 许敏, 范瑞良, 王桃妮, 李楠楠, 孙兆跃, 周海生, 李春, 张秀文. 河北唐山曹妃甸-乐亭海域自然牡蛎礁分布及生态意义. 生态学报, 2022, 42(3): 1142-1152.

Quan W M, Zhang Y L, Qi Z L, Xu M, Fan R L, Wang T N, Li N N, Sun Z Y, Zhou H S, Li C, Zhang X W. Distribution and ecological status of natural oyster reefs on the coast of CaoFeidian-Leting, Tangshan, Hebei Province. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(3): 1142-1152.

河北唐山曹妃甸-乐亭海域自然牡蛎礁分布及生态意义

全为民^{1,*}, 张云岭², 齐遵利³, 许敏¹, 范瑞良¹, 王桃妮¹, 李楠楠¹, 孙兆跃¹, 周海生², 李春², 张秀文³

1 中国水产科学研究院东海水产研究所, 农业农村部东海渔业资源开放利用重点实验室, 上海 200090

2 唐山海洋牧场实业有限公司, 唐山 063611

3 河北农业大学海洋学院, 秦皇岛 066003

摘要:牡蛎礁是生态系统服务价值最高的海洋生境之一, 目前我国自然牡蛎礁分布和生态现状的基础信息仍然较缺乏。于 2019 年 3 月对河北唐山曹妃甸-乐亭海域自然牡蛎礁的空间分布、生态环境、牡蛎生物学和礁体动物群落开展了调查, 并评估了该牡蛎礁的生态系统服务价值。该海域自然牡蛎礁分布于溯河 (SR)、溯河口海域 (SRE) 和捞鱼尖海域 (LYJ), 总面积约 15 km², 是目前我国面积最大的自然牡蛎礁。基于 96 个牡蛎样品的 16S rDNA 检测, 共识别出 92 个长牡蛎 *Crassostrea gigas*, 3 个侏儒牡蛎 *Nanostrea fluctigera* 和 1 个巨蛎属未知种 *Crassostrea* sp.。自然牡蛎礁中牡蛎平均密度介于 104—3912 个/m² 之间, 不同礁区间牡蛎平均密度的大小排序为: SRE>SR>LYJ ($P<0.05$), 平均生物量的大小排序为: SR>SRE>LYJ ($P<0.05$), 平均壳高的大小排序为: SR>SRE=LYJ ($P<0.05$)。在该牡蛎礁内记录到 49 种礁体动物, 其中软体动物 16 种、节肢动物 16 种、环节动物 8 种、棘皮动物 5 种、腔肠动物 2 种、星形动物和脊索动物各 1 种; 礁体动物群落平均总密度介于 28—552 个/m² 之间, 不同礁区间大小排序为: SRE>SR>LYJ ($P<0.05$)。牡蛎密度与礁体动物群落总密度和总生物量之间呈显著正相关 ($P<0.05$)。该自然牡蛎礁如未受破坏, 则其生态系统服务价值高达 6.90×10^8 元/年。该牡蛎礁是继海草场后在该海域发现的又一重要的温带海洋生境, 是我国自然牡蛎礁地理分布的重大发现。建议加强该自然牡蛎礁的保护与修复, 建设一个以牡蛎礁和海草场为核心的资源养护型国家级海洋牧场示范区。

关键词:长牡蛎; 侏儒牡蛎; 渤海湾; 曹妃甸; 海洋牧场

Distribution and ecological status of natural oyster reefs on the coast of CaoFeidian-Leting, Tangshan, Hebei Province

QUAN Weimin^{1,*}, ZHANG Yunling², QI Zunli³, XU Min¹, FAN Ruiliang¹, WANG Taoni¹, LI Nannan¹, SUN Zhaoyue¹, ZHOU Haisheng², LI Chun², ZHANG Xiuwen³

1 Key Laboratory of East China Sea Fishery East China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Resources Exploitation, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai, Shanghai 200090, China

2 Tangshan Marine Ranching Industrial Limited Company, Tangshan 063611, China

3 Ocean College, Hebei Agriculture University, Qinhuangdao 066003, China

Abstract: Oyster reef is an important marine habitat that provides a variety of ecosystem services, including water filtration, nitrogen removal, carbon sink, habitat provision and erosion control. In the past decades, most of natural oyster reefs in the

基金项目:中央级公益性科研院所基本科研业务费项目 (2015M01, L32201921880, 2019ZD0103); 上海市自然科学基金项目 (19ZR1469900)

收稿日期:2020-05-10; **采用日期:**2021-06-28

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: quanweim@163.com

Chinese coasts were lost due to overfishing, pollution, sedimentation and habitat destruction. To date, little information was available on spatial distribution and ecological status of natural oyster reefs in China. This study investigated the spatial distribution, ecological environment, oysters and reef-associated resident benthic macroinvertebrate communities at the natural oyster reefs on the coast of CaoFeidian-Leting, Tangshan, Hebei Province, and furthermore assessed the ecosystem service values of the natural oyster reefs on the coast. The natural oyster reefs, including three major distribution zones, namely Shouhe River (SR), Shouhe River estuary (SRE) and Laoyujian (LYJ), occupied the total area of about 15 km². To our knowledge it was recognized as the largest natural live oyster reefs in China. Ninety-two of 96 oyster specimens collected from the natural reefs were identified as pacific oyster *Crassostrea gigas*, 3 specimens for *Nanostrea fluctigera* and 1 specimen for unknown *Crassostrea* sp based on 16S rDNA gene sequence analysis. The mean live oyster densities ranged from 104 to 3912 ind./m² at the natural oyster reefs. The mean oyster metrics were ranked as follows ($P < 0.05$): SRE > SR > LYJ for oyster densities, SR > SRE > LYJ for oyster biomass and SR > SRE = LYJ for oyster size (shell height). A total of 49 resident benthic macroinvertebrate species, belonging to 16 mollusks, 16 arthropoda, 8 annelids, 5 echinodermata, 2 coelenterata, 1 sipuncula and 1 chordata, were recorded at the natural oyster reefs. The mean total densities of resident benthic macroinvertebrate communities varied between 28 and 552 ind./m² at the natural oyster reefs, with ranking as follows: SRE > SR > LYJ ($P < 0.05$). The total densities and biomass of resident macroinvertebrate communities had significantly positive correlations with the oyster densities at the natural oyster reefs. The economic value of the full suite of ecosystem services derived from the natural oyster reefs was recently estimated to be as high as RMB 6.90×10⁸ RMB/a. The discovery of the natural live oyster reefs contributed significantly to valuable information on the spatial distribution and ecological status of temperate coastal habitats in China. It was suggested that a national marine ranching demonstration zone should be built on the coast through the conservation and restoration of oyster reefs and seagrass beds.

Key Words: *Crassostrea gigas*; *Nanostrea fluctigera*; Bohai bay; CaoFeidian zone; marine ranching

牡蛎礁是由大量牡蛎固着生长于硬底物表面所形成的一种生物礁系统,被喻为温带地区的“珊瑚礁”^[1-3]。除为人类提供大量鲜活牡蛎以供食用外,牡蛎礁具有净化水体、维持生物多样性、提供鱼类生境、固碳和防止岸线侵蚀等生态功能^[3-5]。牡蛎礁曾广泛分布于全球亚热带和温带海区的多数海湾、河口以及部分海岸线的潮间带和潮下带。但过度捕捞、环境污染、生境破坏和病害侵染使全球野生牡蛎资源量急剧下降,牡蛎礁生境遭受破坏或丧失,过去 100 多年来全球牡蛎礁面积约下降了 85%,从而改变了近岸生态系统的结构与功能^[4-5]。

牡蛎礁作为重要的海岸带栖息生境之一,曾在我国温带和亚热带海区的潮间带和浅水潮下带有着广泛分布^[6-12],如 20 世纪 80 年代我国地质学者曾在我国南北沿海的许多河口和海湾内记录到牡蛎礁分布,然而这些研究更多关注牡蛎礁的地理分布、海岸地貌发育和古环境,而很少研究牡蛎礁的生态现状和生态系统服务价值。2000 年以后,国内才开始关注牡蛎礁的生态功能^[1],并对天津大神堂^[13]和江苏小庙洪^[9-10]等少数现存活体牡蛎礁的生态现状进行零星的调查研究,结果显示这些牡蛎礁退化严重,大部分自然牡蛎礁已经消失^[10,13-15]。截止目前,国内有关牡蛎礁的生态学研究仍然有限,无法全面掌握目前我国自然牡蛎礁的地理分布及生态现状,制约着我国海岸带的保护与修复。

渤海湾曾是我国牡蛎礁的主要分布区,但由于海岸带历史变迁等原因,大量牡蛎礁被埋入地下成为古牡蛎礁,而该区现存活体牡蛎礁的报道较少^[6,13]。《滦州志》卷九·《封域(下)·古迹漕运附》载:“知府孙维城复议海运故道直捷,而所经蚕沙绿洋各口蛎房山石臼坨……”,所描述的“蛎房山”即为牡蛎礁;据历史资料和当地渔民描述,该海域自然牡蛎礁分布于溯河河口以东、小青河河口以西的低潮线以下海域,后来牡蛎礁退化或消失。近年来,在原有牡蛎礁分布海域又能捕捞到大量活体牡蛎,极大的野生牡蛎捕捞量引起社会的广泛关注,拯救并保护这一珍贵的自然资源及其生境势在必行。在实施自然牡蛎礁的保护与修复措施前,亟待解

决以下 3 个科学问题: (1) 该自然牡蛎礁的地理分布区域及分布范围? (2) 该自然牡蛎礁中牡蛎种群及礁体动物群落的生态现状如何? (3) 该自然牡蛎礁提供多大的生态系统服务价值? 为回答以上科学问题, 本研究于 2019 年 3 月对该自然牡蛎礁的空间分布、生态环境、牡蛎生物学和礁体动物群落开展了调查, 并评估了该自然牡蛎礁的生态系统服务价值, 研究结果可为该自然牡蛎礁的保护与修复提供基础信息。

1 材料与方法

1.1 研究地点

研究地点位于河北省唐山市曹妃甸-乐亭海域(图 1), 是介于曹妃甸工业区与京唐港之间的半封闭海湾, 具有离岸沙岛、深槽和浅滩等多种地貌单元。海区潮汐型态系数为 0.77, 属于不规则半日潮, 平均高潮位为 0.81 m, 平均低潮位为 -0.73 m, 平均潮差为 1.54 m^[16]。根据历史文献、现场调查和牡蛎捕捞统计资料, 初步确定溯河口(SRE)、溯河(SR)和捞鱼尖(LYJ) 3 个自然牡蛎礁分布区。共设置 12 个生态调查站位, 其中 SR 牡蛎礁 3 个站位、SRE 牡蛎礁 5 个站位和 LYJ 牡蛎礁 4 个站位(图 1)。

1.2 调查与分析方法

2019 年 3 月 24—30 日执行野外生态调查, 调查内容包括生态环境(水温、盐度、总悬浮颗粒物(TSS)、叶绿素 a(Chla)和浮游植物)、牡蛎礁分布、牡蛎生物学(种类、密度、生物量、壳高(SH)、肥满度(CI)和遗传多样性)和礁体动物群落(种类、密度和生物量)。

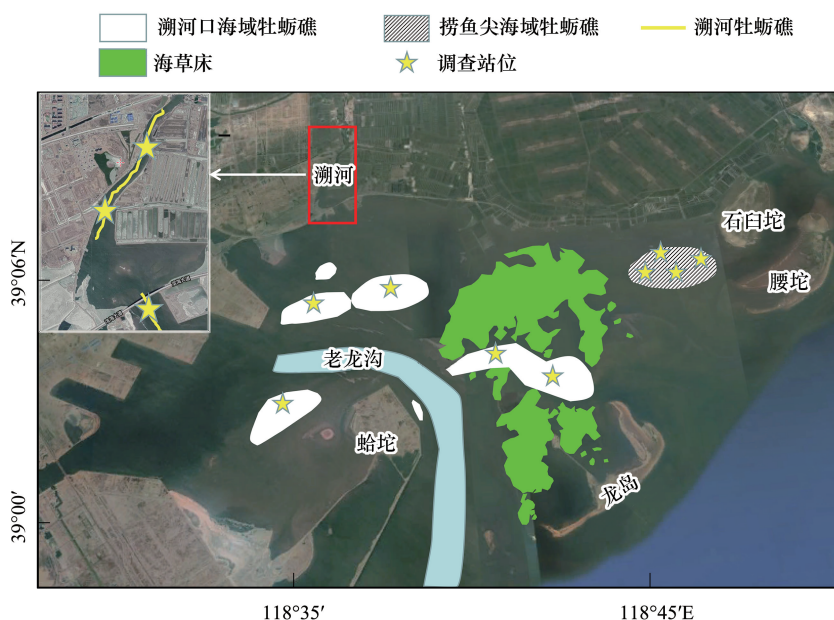


图 1 研究地点和自然牡蛎礁分布范围

Fig.1 The study site and spatial distribution of the natural oyster reefs on the Caofeidian-Leting coast

海草床空间分布信息引自文献^[17]

在高潮位时, 采用 YSI 水质分析仪现场测定表层海水水温和盐度; 用采水器采集 1000 mL 表层海水, 等分成两份, 现场用装有 0.45 μm 微孔滤膜的便携式真空泵抽滤, 滤膜冰冻保存后带回实验室分析测定, 海水 Chla 和 TSS 浓度分别采用分光光度计法和重量法测定, 另每站取 1000 mL 表层海水用鲁哥式溶液现场固定后带回到室内镜检计数浮游植物。

采用社会调查、潜水调查和水下摄像等方法调查自然牡蛎礁的地理分布, 具体方法为: 首先和当地牡蛎捕捞从业人员进行访谈, 初步获取牡蛎重点采捕区的位置和范围, 再提取每个区域牡蛎采捕渔船的 GPS 导航航迹数据, 最后采用潜水调查和水下摄像进行验证, 综合上述信息确定牡蛎礁地理位置和分布范围。在 SRE 和

SR,由潜水员下潜至牡蛎礁表面进行采样,每个站位采集 1 个 0.5 m×0.5 m 样方内(深度 10cm)所有的活体牡蛎、牡蛎壳和生物样品,装于网目 0.5 mm 的聚乙烯网袋中带回岸上分检。在 LYJ,低潮位时水深仅约 0.4m,直接手工采样。

回岸后分检每个样品中的活牡蛎和礁体动物。记录活牡蛎的个体数、测定其总重(精确至 0.1 g);从每个调查区样品中随机选取不少于 50 个牡蛎,用游标卡尺测量壳高(SH,精确至 1mm),带部分牡蛎样品回室内分析种类和肥满度。礁体动物(不包括牡蛎)样品用 75%乙醇固定保存后,带回室内鉴定至最低的分类单元,并计数和称重。

基于外壳形态,选取 96 个牡蛎样品进行线粒体 16S rDNA 基因序列分析,据此分析牡蛎的种类和遗传多样性。从每个调查区样品中随机选取不少于 20 个牡蛎,剥取牡蛎的软体部分,测定湿肉重(WTW,g),然后将软体部分放入烘箱中(60℃)烘干至恒重(约 24 h),并测定其干肉重(FTW,g),依据下列公式计算牡蛎的肥满度(Condition index, CI):

$$CI = \frac{FTW}{WTW} \times 100\%$$

1.3 数据统计

将测得的 16S rDNA 序列同 GenBank 中登录的牡蛎序列进行系统发育分析,采用 Phylip 3.5 软件的邻接法构建系统树,利用 *Donax trunculus* 作为外群,置信号由 1000 次重复检验。

牡蛎或礁体动物的密度(个/m²)统计为每 1m²牡蛎礁中的个体数,生物量(g/m²或 kg/m²)为每 1 m²牡蛎礁中的总鲜重。运用一维方差分析(1-way ANOVA)检验牡蛎指标(密度、生物量和 SH)或礁体动物群落指标(密度和生物量)在 3 个分布区(SR, SRE 和 LYJ)间的差异(Tukey 后检验)。如数据没有通过方差同质性和方差齐性检验,则采用一维排序方差分析(1-way ANOVA on rank, Ducnn 后检验)。另采用 Pearson 相关性检验牡蛎指标与礁体动物群落指标之间的相关关系;所有统计分析及制图均在 SigmaPlot 10.0 软件中完成。

1.4 生态系统服务价值评估

根据北美自然牡蛎礁的研究结果^[3],牡蛎礁的生态系统服务价值标准为 10.6 万美元 hm⁻² a⁻¹。据此标准,本研究评估了该自然牡蛎礁的生态系统服务价值。

2 结果与分析

2.1 环境指标

调查期间海水温度介于 4.1—10.9℃,平均为 8.2℃;海水盐度介于 30.8—34.2,平均为 33.4;TSS 浓度介于 12.2—43.7 mg/L,平均为 27.8 mg/L;Chla 浓度介于 0.84—3.45 mg/m³,平均为 2.37 mg/m³。共采集到浮游植物 2 门 21 种,其中硅藻 17 种和甲藻 4 种,浮游植物丰度介于(0.1—23.94)×10⁴个细胞/L,平均为 3.29×10⁴个细胞/L, SRE 中浮游植物丰度高于 SR 和 LYJ,主要优势种为旋链角毛藻 *Chaetoceros curvisetus*。

表 1 3 个牡蛎礁区中环境指标比较

Table 1 Comparisons on environmental factors among three oyster reef zones

指标 Factors	溯河口海域(SRE)		溯河(SR)		捞鱼尖(LYJ)	
	范围 Range	平均 Mean	范围 Range	平均 Mean	范围 Range	平均 Mean
水温 Water temperature/℃	4.1—10.9	8.4	9.8—10.2	10.1	6.5—6.8	6.7
盐度 Salinity	30.8—33.1	32.0	31.0—32.8	32.4	34.0—34.2	34.1
悬浮物 TSS/(mg/L)	12.2—40.0	28.4	34.1—43.7	39.0	17.9—22.3	19.3
叶绿素 Chla/(mg/m ³)	2.33—3.45	2.80	3.20—3.41	3.33	0.84—1.13	1.03
浮游植物 Phytoplakton/(×10 ⁴ 个细胞/L)	0.86—23.94	6.17	0.33—0.90	0.62	0.10—0.47	0.28

2.2 牡蛎礁分布

自然牡蛎礁主要分布于以下 3 个区域(图 1)。**①SRE 牡蛎礁**:主要分布于老龙沟潮汐通道两侧 0—5 m 水深的浅水区,有 6 个斑块状分布区,单个牡蛎礁面积介于 0.17—3.62 km²之间,总面积约 10 km²,礁体发育较好,礁体高度约 0.3—0.5 m,是牡蛎的主要采捕区。**②SR 牡蛎礁**:分布于溯河河道及溯河河口段,面积约 0.5 km²,尤以河床底部的牡蛎礁发育较好。**③LYJ 牡蛎礁**:位于石臼坨和腰坨西侧,面积约 5 km²,单个礁体斑块面积介于 0.2—1.0 m²之间,盖度约 5%,处于发育早期,牡蛎与大型海藻共生。

2.3 牡蛎指标

经 PCR 扩增,获得了 96 个牡蛎的 16S rDNA 基因片段扩增产物(图 2),可比 16S rDNA 序列为 450 bp 左右,共检测到 20 个单倍型,其中 92 个为长牡蛎 *Crassostrea gigas*、3 个为侏儒牡蛎 *Nanostrea fluctigera*、1 个为巨蜆属未知种 *Crassostrea* sp.(图 3)。长牡蛎有 17 个单倍型、单倍型多样性为 0.641、核苷酸多样性为 0.00278;侏儒牡蛎有 2 个单倍型、单倍型多样性为 0.667、核苷酸多样性为 0.00147。

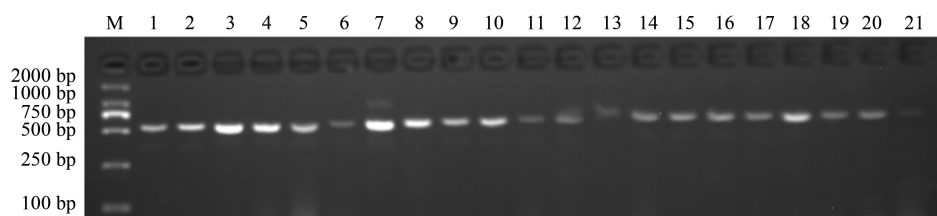


图 2 部分牡蛎样本的线粒体 16S rDNA 扩增电泳图谱

Fig.2 Amplified products of mitochondrial 16S rDNA gene of partial oyster specimens

1—22 为牡蛎样本, M 为 DL2000 分子标记

SRE 中牡蛎密度介于 2764—3912 个/m², 平均为 (3251±223) 个/m²; SR 中牡蛎密度介于 1008—1200 个/m², 平均为 (1135±63) 个/m²; LYJ 中牡蛎密度介于 104—280 个/m², 平均为 (173±41) 个/m²; 牡蛎密度的大小排序为: SRE>SR>LYJ (图 4, Tukey 后检验, $P<0.05$); 牡蛎生物量的大小排序为: SR>SRE>LYJ (图 4, Tukey 后检验, $P<0.05$)。

图 5 显示了 3 个自然牡蛎礁分布区中牡蛎的壳高—频率分布。SR 中牡蛎 SH(中值 SH: 58 mm) 显著大于 SRE(中值 SH: 40 mm) 和 LYJ(中值 SH: 33 mm) (Dunn 后检验, $P<0.05$), 而 SRE 和 LYJ 间没有差异 (Dunn 后检验, $P>0.05$)。

SRE 中牡蛎 CI 值介于 9.28%—18.21%, 平均为 (14.59±0.38)%; SR 中牡蛎 CI 值介于 13.09%—21.09%, 平均为 (17.28±0.53)%; LYJ 中牡蛎 CI 值介于 10.18%—18.45%, 平均为 (14.15±0.42)%; 牡蛎 CI 值的大小排序为: SR>SRE>LYJ (Tukey 后检验, $P<0.05$)

2.4 礁体动物群落指标

通过定性和定量采样,在牡蛎礁内记录到 49 种礁体动物,其中软体动物 16 种、节肢动物 16 种、环节动物 8 种、棘皮动物 5 种、腔肠动物 2 种、星形动物和脊索动物各 1 种(表 2)。

SRE 中礁体动物密度介于 404—552 个/m², 平均为 (493±26) 个/m²; SR 中礁体动物密度介于 164—320 个/m², 平均为 (228±47) 个/m²; LYJ 中礁体动物密度介于 28—44 个/m², 平均为 (35±5) 个/m²。平均总密度的大小排序为: SRE>SR>LYJ (图 6, Tukey 后检验, $P<0.05$); 平均总生物量的排序为: SRE 显著高于 LYJ (图 6, Dunn 后检验, $P<0.05$), 而 SR 介于 SRE 和 LYJ 之间(图 6, Dunn 后检验, $P>0.05$)。

2.5 牡蛎指标与礁体动物群落指标之间的相关性

牡蛎密度与礁体动物密度和生物量呈现显著的正相关性(表 3, 图 7, $P<0.05$), 而牡蛎生物量与礁体动物密度和生物量之间的相关性并不显著(表 3, $P>0.05$)。

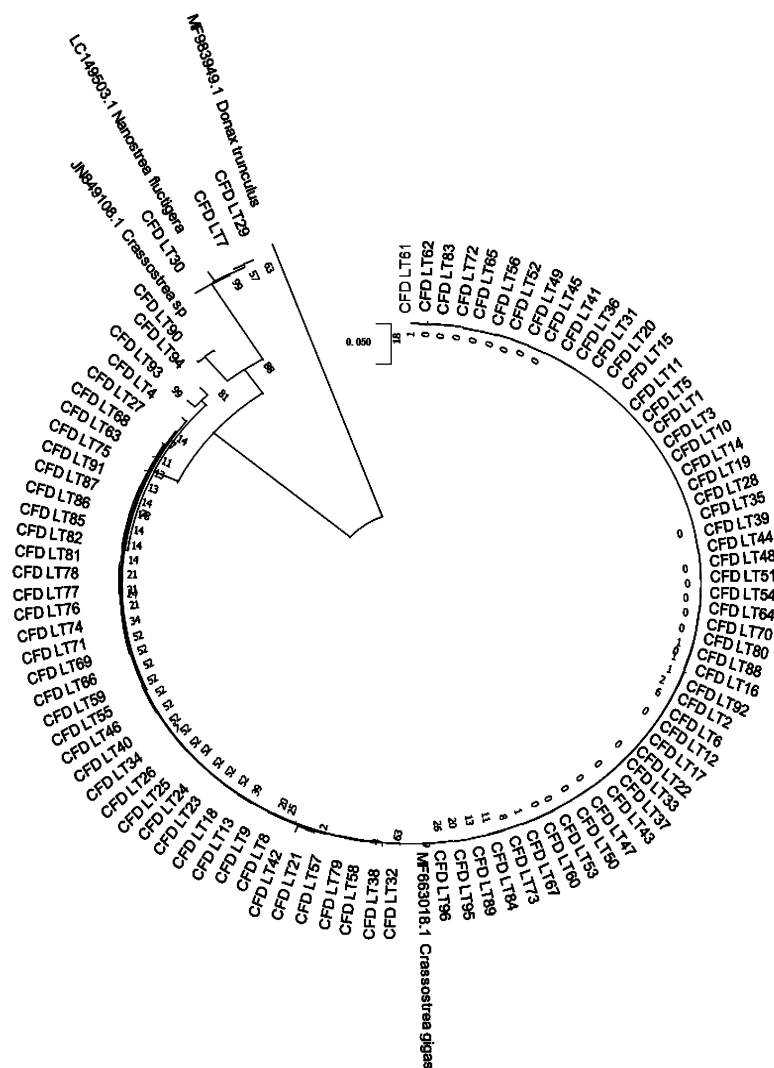


图3 基于96个牡蛎样本16S rDNA数据构建的系统发育树

Fig.3 Phylogenetic trees constructed from 16S rDNA sequence of 96 oyster specimens

CFDLT: 曹妃甸-乐亭海域的牡蛎样本 Oyster specimens from Caofeidian-Leting coast

2.6 生态系统服务价值

由于SR牡蛎礁面积较小和LYJ牡蛎礁中牡蛎密度较低,仅评估SRE牡蛎礁的生态系统服务价值,如该自然牡蛎礁未受破坏,其生态系统服务价值将达到 1.06×10^8 美元/a,按当前汇率6.51计折合成人民币约 6.90×10^8 元/年。

3 讨论

3.1 自然牡蛎礁的地理分布

渤海湾沿岸曾是我国牡蛎礁的集中分布区,如在天津沿岸发现了许多成片的古牡蛎礁^[18];除天津大神堂有活体牡蛎礁分布外,在渤海湾其它海域未见活体牡蛎礁的报道。从史书记载,曹妃甸-乐亭海域历史上分布有大量牡蛎礁,但没有这片牡蛎礁地理分布和生态现状的基础信息。受人力和资金限制,本研究并未采用声呐勘测手段精确调查自然牡蛎礁的地理分布,但通过社会统计和现场调查等多种方法初步描述了该海域自然牡蛎礁的地理分布,估算牡蛎礁总面积高达 15 km^2 ,表明该牡蛎礁是截至目前为止我国面积最大的自然活

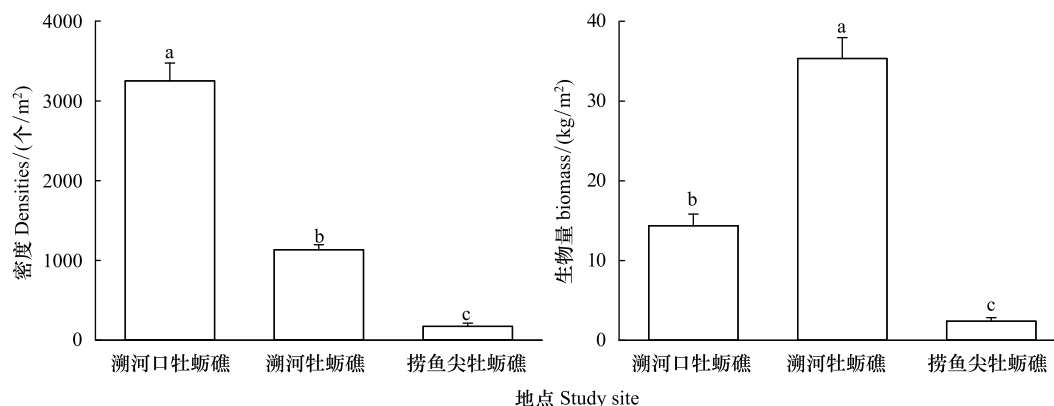


图4 3个牡蛎礁区间牡蛎密度和生物量的比较

Fig.4 Comparisons on oyster densities and biomass among three oyster reef zones

误差棒为 ± 1 标准误,不同小写字母表示显著性差异 ($P < 0.05$)

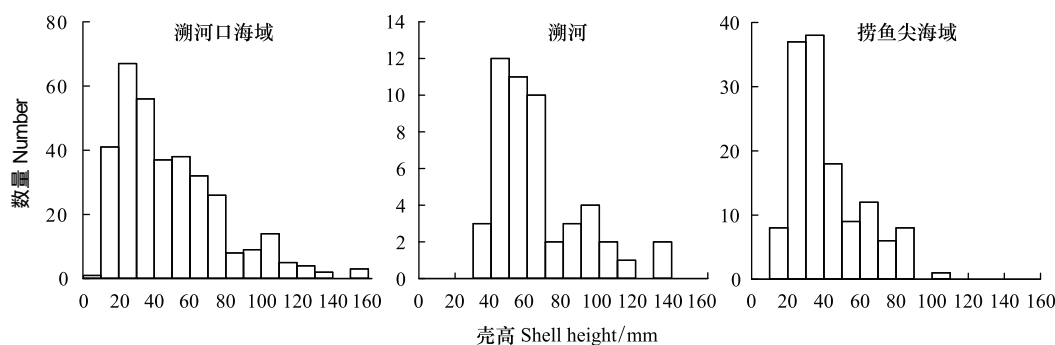


图5 3个牡蛎礁区间牡蛎壳高—频率分布的比较

Fig.5 Comparisons on oyster SH-frequency distributions among three oyster reef zones

体牡蛎礁。这是继曹妃甸海草场^[17]后在该海域的又一重大发现,进一步补充了我国牡蛎礁地理分布及生态现状的基础信息,研究成果对于曹妃甸-乐亭海域海岸带管理和保护具有重要意义。

本研究发现3个自然分布区中以溯河口牡蛎礁发育最好、牡蛎密度最高和生物多样性最为丰富,原因可能是该牡蛎礁分布于老龙沟潮汐通道两侧的浅水区,水深约1—5 m,老龙沟的涨潮流携带而来的丰富浮游生物为牡蛎生长和牡蛎礁发育提供了充足的饵料^[19]。与历史分布区相比,该海域现代牡蛎礁分布区整体向南发育,原因可能是西南侧实施的曹妃甸围填海工程减弱了溯河口海域的水动力,从而为牡蛎附着生长和牡蛎礁发育提供更为稳定的水动力环境,减弱的水动力环境和增加的水体滞留时间更有利于牡蛎幼体的附着与生长^[20—21],加快了现代牡蛎礁向外侧发育。

3.2 牡蛎和礁体动物多样性

本研究采用线粒体 16S rDNA 基因序列变异分析发现,自然牡蛎礁内分布有长牡蛎和侏儒牡蛎,其中以长牡蛎在数量上占绝对优势,是造礁的牡蛎种类。长牡蛎原产于日本、韩国和中国江苏连云港以北沿海,为世界性养殖种;侏儒牡蛎分布于印度—西太平洋浅水区,我国最早报道于东海北部水深 47 m 海区^[22],有关该种的报道非常少,本研究首次在曹妃甸-乐亭海域记录到这一物种,为阐明该种的生物地理格局提供了基础信息。

牡蛎密度和大小是表征牡蛎礁生态现状的通用指标^[23]。本研究发现该海域是以长牡蛎为造礁种的活体牡蛎礁,3个自然牡蛎礁区间牡蛎密度差异很大,尤以溯河口海域中牡蛎密度最高,平均密度达到 $(3251 \pm$

223) 个牡蛎/m², 明显高于国内外自然或人工修复牡蛎礁中的牡蛎密度^[24—28]; 3 个牡蛎礁区中牡蛎壳高均呈现单峰的正态分布, 分布有一定数量的牡蛎成体和稚贝, 表明该自然牡蛎礁拥有 1 个健康的、可持续的牡蛎种群; 如果加以有效保护, 该牡蛎礁将持续发挥显著的生态系统服务功能。

表 2 自然牡蛎礁定居性大型底栖动物名录
Table 2 Species list of resident benthic macroinvertebrate associated with the natural oyster reefs

类群 Taxa	物种 Species	类群 Taxa	物种 Species
软体动物 Mollusks	菲律宾蛤仔 <i>Ruditapes philippinarum</i>	节肢动物 Arthropoda	东方拟银杏蟹 <i>Paractaea orientalis</i>
	栖缝蛤 <i>Hiatella</i> sp.		方蟹 <i>Grapsidae</i>
	史氏背尖贝 <i>Notoacmea schrenckii</i>		美丽瓷蟹 <i>Porcellana pulchra</i>
	双纹须蚶 <i>Barbatia bistrigata</i>		日本蜆 <i>Charybdis japonica</i>
	凸壳肌蛤 <i>Musculus senhousia</i>		绒毛近方蟹 <i>Hemigrapsus penicillatus</i>
	栉孔扇贝 <i>Chlamys farreii</i>		特异大权蟹 <i>Macromedaeus distinguendus</i>
	中华孔螂 <i>Poromya sinica</i>		小相手蟹 <i>Nanosesarma minutum</i>
	布尔小笔螺 <i>Mitrella burchardi</i>		长指近方蟹 <i>Hemigrapsus longitarsis</i>
	单齿螺 <i>Monodonta labio</i>		葛氏长臂虾 <i>Palaemon gravieri</i>
	丽核螺 <i>Mitrella bella</i>		鲜明鼓虾 <i>Alpheus distinguendus</i>
	脉红螺 <i>Rapana venosa</i>		口虾蛄 <i>Oratosquilla oratoria</i>
	托氏瑁螺 <i>Umbonium thomasi</i>		盖鳃水虱 <i>Idotea</i> sp.
	微小螺 <i>Elachisina</i> sp.		钩虾 <i>Gammaridae</i>
	秀丽织纹螺 <i>Nassarius festivus</i>		日本大螯蜚 <i>Grandidierella japonica</i>
	疣荔枝螺 <i>Thais clavigera</i>		团水虱 <i>Sphaeroma</i> sp.
	朝鲜鳞带石鳖 <i>Lepidozona coreanica</i>		泥藤壶 <i>Balanus uliginosus</i>
环节动物 Annelids	多齿围沙蚕 <i>Perinereis nuntia</i>	棘皮动物 Echinodermata	海地瓜 <i>Acaudina molpadioides</i>
	覆瓦哈鳞虫 <i>Harmothoe imbricata</i>		多棘海盘车 <i>Asterias amurensis</i>
	尖刺纓虫 <i>Potamilla acuminata</i>		金氏真蛇尾 <i>Ophiura kinbergi</i>
	内刺盘管虫 <i>Hydroides ezoensis</i>		滩栖阳遂足 <i>Amphiura vadicola</i>
	琴蜆虫 <i>Lanice conchilega</i>	腔肠动物 Coelenterata	马粪海胆 <i>Hemicentrotus pulcherrimus</i>
	肾刺纓虫 <i>Potanmilla reniformis</i>		海笔 <i>Pennatula phosphorea</i>
	索沙蚕 <i>Lumbrineris</i> sp.		侧花海葵 <i>Anthopleura</i> sp.
	长吻沙蚕 <i>Glycera chirori</i>		星虫动物 <i>Sipuncula</i>
脊索动物 Chordata	柄海鞘 <i>Styela clava</i>	星虫动物 Sipuncula	革囊星虫 <i>Phascolosoma</i> sp.

表 3 牡蛎指标和礁体动物群落指标之间的相关系数(P)
Table 3 Correlation coefficient (P) between the oyster metrics and the benthic community metrics

指标 Factors	牡蛎密度 Oyster density	牡蛎生物量 Oyster biomass	礁体动物密度 Benthic macroinvertebrate density
牡蛎生物量 Oyster biomass	0.204 (0.526)		
礁体动物密度 Benthic macroinvertebrate density	0.918 (<0.001)	0.178 (0.600)	
礁体动物生物量 Benthic macroinvertebrate biomass	0.864 (<0.001)	0.042 (0.903)	0.920 (<0.001)

定居性礁体动物群落是评估牡蛎礁生态现状、生物多样性和生境价值的重要指标之一^[23]。本研究报道的礁体动物密度明显低于江苏海门蛎蚜山牡蛎礁^[9,28]、长江口牡蛎礁^[27]和美国东海岸牡蛎礁^[24—26], 原因可能是调查期间该海域平均水温低于 10℃, 许多底栖动物仍未经历春季的资源补充; 但牡蛎礁内动物密度仍高于曹妃甸近岸海域底栖动物密度^[29]。另外, 本研究也发现牡蛎密度与礁体动物群落总密度和总生物量之间呈现显著的正相关关系, 原因是牡蛎密度越高, 其聚集生长形成的礁体结构越复杂, 而生境结构的复杂性与其

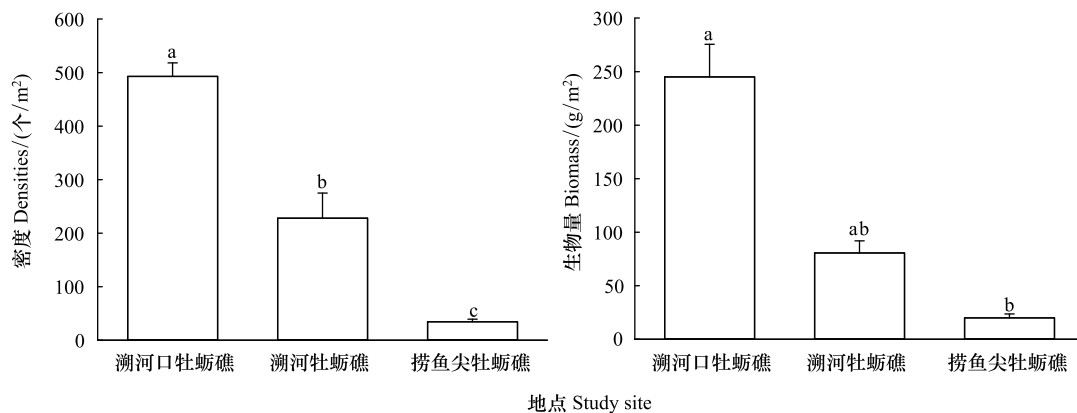


图6 3个牡蛎礁区间大型底栖动物群落总密度和总生物量的比较

Fig.6 Comparisons on total densities and biomass of benthic macroinvertebrates among three oyster reef zones

误差棒为标准误差,不同小写字母表示显著性差异 ($P < 0.05$)

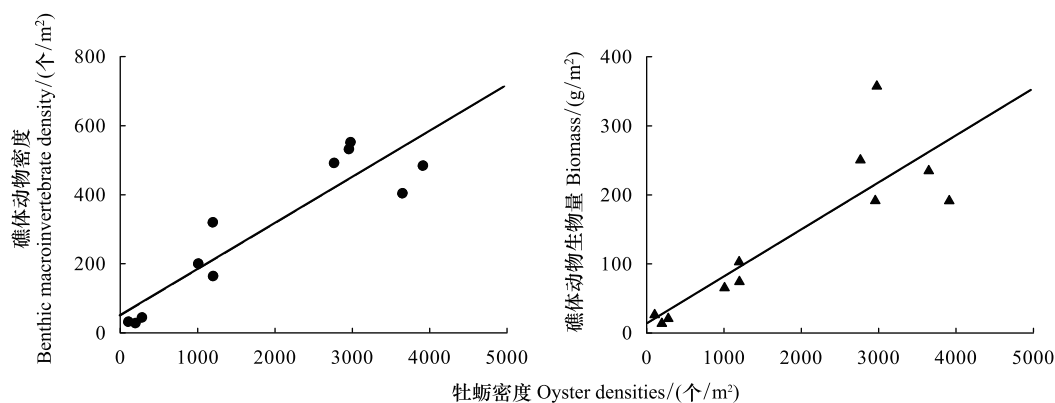


图7 3个牡蛎礁区中牡蛎密度和礁体动物群落总密度和总生物量之间的线性回归关系

Fig.7 Linear regressions between oyster densities and benthic macroinvertebrate communities metrics (densities and biomass) across three oyster reef zones

维持的礁体动物丰度之间有显著的正相关性^[30]。

3.3 牡蛎礁保护与生态修复策略

牡蛎礁是生态系统服务价值最高的海洋生境之一。基于北美自然牡蛎礁的评估结果表明^[3],牡蛎礁的生态系统服务价值约为 $10.6 \text{ 万美元 } \text{hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 高于红树林 ($8.2 \text{ 万美元 } \text{hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$)、海草场 ($3.1 \text{ 万美元 } \text{hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$) 和永久湿地 ($2.1 \text{ 万美元 } \text{hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$)。如对该自然牡蛎礁加以保护并免遭破坏,其生态系统服务价值将高达 $6.90 \times 10^8 \text{ 元/年}$;以鲜活牡蛎平均单价 10 元/kg 计算,则该牡蛎礁产生的生态系统服务价值相当于每年生产 $0.69 \times 10^8 \text{ kg}$ 牡蛎的经济产值,按牡蛎礁面积 10 km^2 计算,则每 1 m^2 牡蛎礁的生态系统服务价值相当于 6.9 kg 可捕规格牡蛎的经济产值(69 元)。

自 2018 年春季开始,该自然牡蛎礁持续面临较高的捕捞压力,主要捕捞工具为牡蛎专用拖网,该网具网口下杠有钢制耙,拖网作业除捕捞活体牡蛎外,也破坏了牡蛎礁生境结构,调查期间观察到大量牡蛎壳随活体牡蛎一同被捕捞,生境结构的破坏不仅降低了牡蛎幼体的附着基数量,也减少了活体牡蛎礁面积,从而对自然牡蛎礁造成长期的负面影响。随着近两年的持续捕捞,该海域牡蛎资源量急剧下降,2018 年拖网渔获中活体牡蛎的比例达到 70%,至 2019 年调查时下降至 20%,表明该牡蛎礁的生态现状不容乐观,亟待加强保护和修复。

曹妃甸-乐亭海域水流较缓,具有广阔的潮间带滩涂和潮下带浅水区,生境类型异质多样,分布有大面积的自然牡蛎礁和海草场,水体初级生产力高,生物资源十分丰富^[16]。建议以溯河口海域自然牡蛎礁和海草场为核心区域,通过投放小型的适合牡蛎附着生长的人工礁体(牡蛎壳、混凝土模块)^[31],快速修复当地的牡蛎礁生境及其生物资源,建设一个牡蛎礁国家级海洋牧场示范区,重建鱼类重要栖息生境,发挥牡蛎礁和海草场的鱼类育幼场功能,养护海洋渔业资源,修复与优化海洋生态系统,探索以经济鱼类、蟹类和螺类为产出的海洋牧场利用模式。

致谢:感谢唐山市曹妃甸蚕沙口村鱼满仓渔业捕捞专业合作社杨连革和朱振江同志在海上调查采样中提供的帮助,感谢上海市水产研究所安传光博士鉴定礁体动物样品。

参考文献 (References):

- [1] 全为民, 沈新强, 罗民波, 陈亚瞿. 河口地区牡蛎礁的生态功能及恢复措施. 生态学报, 2006, 25(10): 1234-1239.
- [2] 孙兆跃, 范瑞良, 隋延鸣, 唐保军, 姜伟, 修玉娜, 李楠楠, 李雪英, 全为民. 3种无脊椎动物对近江牡蛎 *Crassostrea ariakensis* 和熊本牡蛎 *C. sikamea* 的捕食研究. 生态学报, 2021, 41(7): 2895-2901.
- [3] McLeod I M, Zu Ermgassen P S E, Gillies C L, Hancock B, Humphries A. Chapter 25-can bivalve habitat restoration improve degraded estuaries? //Wolanski E, Day J W, Elliott M, Ramachandran R, eds. Coasts and Estuaries. Amsterdam: Elsevier, 2019, 427-442.
- [4] Jackson J B C, Kirby M X, Berger W H, Bjorndal K M, Botsford L W, Bourque B J, Bradbury R H, Cooke R, Erlandson J, Estes J A, Hughes T P, Kidwell S, Lange C B, Lenihan H S, Pandolfi J M, Peterson C H, Steneck R S, Tegner M J, Warner R R. Historical overfishing and the recent collapse of coastal ecosystems. Science, 2001, 293(5530): 629-637.
- [5] Beck M W, Brumbaugh R D, Airolidi L, Carranza A, Coen L D, Crawford C, Defeo O, Edgar G J, Hancock B, Kay M C, Lenihan H S, Luckenbach M W, Toropova C L, Zhang G F, Guo X M. Oyster reefs at risk and recommendations for conservation, restoration, and management. Bioscience, 2011, 61(2): 107-116.
- [6] 房恩军, 李雯雯, 于杰. 渤海湾活牡蛎礁(Oyster reef)及可持续利用. 现代渔业信息, 2007, 22(11): 12-14.
- [7] 耿秀山, 傅命佐, 徐孝诗, 李培英. 现代牡蛎礁发育与生态特征及古环境意义. 中国科学 B 辑, 1991, (8): 867-875.
- [8] 顾勇, 齐德利, 葛云健, 于蓉, 张忍顺. 江苏小庙洪牡蛎礁生态评价与保护区建设. 海洋科学, 2005, 29(3): 42-47.
- [9] 全为民, 安传光, 马春艳, 黄厚见, 成伟, 王云龙, 沈新强, 陈亚瞿. 江苏小庙洪牡蛎礁大型底栖动物多样性及群落结构. 海洋与湖沼, 2012, 43(5): 992-1000.
- [10] 全为民, 周为峰, 马春艳, 冯美, 周振兴, 唐峰华, 吴祖立, 范瑞良, 王云龙, 包小松, 沈辉, 成伟. 江苏海门蛎岬山牡蛎礁生态现状评价. 生态学报, 2016, 36(23): 7749-7757.
- [11] 俞鸣同, 藤井昭二, 坂本亨. 福建深沪湾牡蛎礁的成因分析. 海洋通报, 2001, 20(5): 24-30.
- [12] 姚庆元. 福建金门岛东北海区牡蛎礁的发现及其古地理意义. 台湾海峡, 1985, (1): 108-109.
- [13] 孙万胜, 温国义, 白明, 李彤, 张萍, 董学鹏, 于洁. 天津大神堂浅海活牡蛎礁区生物资源状况调查分析. 河北渔业, 2014, (9): 23-26, 76-76.
- [14] 范昌福, 裴艳东, 田立柱, 王福, 刘志广, 王宏. 渤海湾西部浅海区活牡蛎礁调查结果及资源保护建议. 地质通报, 2010, 29(5): 660-667.
- [15] 张忍顺. 江苏小庙洪牡蛎礁的地貌-沉积特征. 海洋与湖沼, 2004, 35(1): 1-7.
- [16] 季荣耀, 陆永军, 左利钦. 渤海湾曹妃甸深槽形成机制及稳定性分析. 地理学报, 2011, 66(3): 348-355.
- [17] 周毅, 许帅, 徐少春, 岳世栋, 顾瑞婷, 张晓梅, 许敏, 张玉, 张云岭, 张振海. 中国温带海域新发现较大面积(大于 0.5 km²)海草床: II 声呐探测技术在渤海唐山沿海海域发现中国面积最大的鳎草海草床. 海洋科学, 2019, 43(8): 50-55.
- [18] 岳军, Dong Y, 张宝华, 韩芳, 赵希涛, 刘冬雁, 段焕春, 张百鸣, 赵长荣. 渤海湾西北岸的几道牡蛎礁. 地质学报, 2012, 86(8): 1175-1187.
- [19] 黎刚, 孙祝友. 曹妃甸老龙沟动力地貌体系及演化. 海洋地质与第四纪地质, 2011, 31(1): 11-19.
- [20] Chang A L, Deck A K, Sullivan L J, Morgan S G, Ferner M C. Upstream-downstream shifts in peak recruitment of the native Olympia oyster in San Francisco bay during wet and dry years. Estuaries and Coasts, 2018, 41(1): 65-78.
- [21] Grossman S K, Grossman E E, Barber J S, Gamblewood S K, Crosby S C. Distribution and transport of Olympia oyster *Ostrea lurida* larvae in northern Puget Sound, Washington. Journal of Shellfish Research, 2020, 39(2): 215-233.
- [22] 徐凤山, 黄修明. 中国近海牡蛎超科的新记录. 海洋科学集刊, 1993, (34): 175-179.

- [23] Quan W M, Humphries A T, Shen X Q, Chen Y Q. Oyster and associated benthic macrofaunal development on a created intertidal oyster (*Crassostrea ariakensis*) reef in the Yangtze river estuary, China. *Journal of Shellfish Research*, 2012, 31(3): 599-610.
- [24] Luckenbach M W, Coen L D, Ross P G Jr, Stephen J A. Oyster reef habitat restoration: relationships between oyster abundance and community development based on two studies in Virginia and South Carolina. *Journal of Coastal Research*, 2005, (40): 64-78.
- [25] Erbland P J, Ozbay G. A comparison of the macrofaunal communities inhabiting a *Crassostrea virginica* oyster reef and oyster aquaculture gear in Indian River Bay, Delaware. *Journal of Shellfish Research*, 2008, 27(4): 757-768.
- [26] Rodney W S, Paynter K T. Comparisons of macrofaunal assemblages on restored and non-restored oyster reefs in mesohaline regions of Chesapeake Bay in Maryland. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2006, 335(1): 39-51.
- [27] Quan W M, Zhu J X, Ni Y, Shi L Y, Chen Y Q. Faunal utilization of constructed intertidal oyster (*Crassostrea rivularis*) reef in the Yangtze River estuary, China. *Ecological Engineering*, 2009, 35(10): 1466-1475.
- [28] Quan W M, Fan R L, Li N N, Sun Z Y, Jiang W, Wang T N, Shi W J, Li X Y. Seasonal and temporal changes in the Kumamoto oyster *Crassostrea sikamea* population and associated benthic macrofaunal communities at an intertidal oyster reef in China. *Journal of Shellfish Research*, 2020, 39(2): 207-214.
- [29] 梁森, 姜倩, 李德鹏, 柳圭泽, 陈兆林, 崔雷, 于大涛. 曹妃甸近岸海域大型底栖动物群落特征. *水产科学*, 2019, 38(4): 479-491.
- [30] Quan W M, Fan R L, Wang Y L, Humphries A T. Long-term oyster recruitment and growth are not influenced by substrate type in China: Implications for sustainable oyster reef restoration. *Journal of Shellfish Research*, 2017, 36(1): 79-86.
- [31] 全为民, 冯美, 周振兴, 吴祖立, 唐峰华, 王云龙, 包小松, 沈辉, 成伟. 江苏海门蛎岬山牡蛎礁恢复工程的生态评估. *生态学报*, 2017, 37(5): 1709-1718.