

doi: 10.12029/gc20220613002

杨朋, 李建芬, 王福, 胡云壮, 石保佳, 王文宇, 王宏. 2023. 我国天然牡蛎礁现状及保护修复建议[J]. 中国地质, 50(4): 1082–1092.

Yang Peng, Li Jianfen, Wang Fu, Hu Yunzhuang, Shi Baojia, Wang Wenyu, Wang Hong. 2023. Present situation and protection restoration suggestions on the natural oyster reefs in China[J]. Geology in China, 50(4): 1082–1092(in Chinese with English abstract).

我国天然牡蛎礁现状及保护修复建议

杨朋^{1,2,3}, 李建芬^{1,2,3}, 王福^{1,2,3}, 胡云壮^{1,2,3}, 石保佳⁴, 王文宇⁵, 王宏^{1,2,3}

(1. 中国地质调查局天津地质调查中心(华北地质科技创新中心), 天津 300170; 2. 中国地质调查局海岸带地质环境重点实验室, 天津 300170; 3. 中国地质调查局华北地质科技创新中心, 天津 300170; 4. 河北农业大学海洋学院, 河北 秦皇岛 066000; 5. 山东科技大学地球科学与工程学院, 山东 青岛 266590)

摘要:【研究目的】牡蛎礁具有重要生态价值, 掌握其现状对于海岸带生态保护修复具有重要意义。【研究方法】本文系统搜集整理中国和世界天然牡蛎礁调查研究成果, 针对中国天然牡蛎礁现状、变化历史及存在的主要生态问题进行了论述, 在此基础上, 结合国内外牡蛎礁生态系统修复实践, 提出了中国天然牡蛎礁保护修复建议。【研究结果】结果显示, 近一个世纪以来, 全球天然牡蛎礁退化了 85%, 其中亚太地区超过 90% 的礁体已经消失。中国天然牡蛎礁亦严重退化, 目前, 已知的天然活牡蛎礁主要分布于河北曹妃甸、天津大神堂、山东滨州港、山东莱州湾、江苏小庙洪、福建深沪湾和金门等地, 退化严重区域的牡蛎礁现存面积不足原来的十分之一, 造成河口和滨海生态系统的结构与功能严重受损, 亟需开展保护修复工作。【结论】国内外牡蛎礁修复实践表明大面积开展牡蛎礁生态系统修复工作可行且意义重大, 为充分发挥牡蛎礁的生态系统服务功能, 提升海岸带固碳能力, 本文提出推进牡蛎礁保护相关立法、系统开展天然活体牡蛎礁调查与研究、试点实施牡蛎礁修复示范项目和建设“中国海岸带牡蛎礁生态走廊”等 4 项天然牡蛎礁保护修复建议, 以期为中国海岸带生态修复提供支撑。

关键词: 海岸带; 牡蛎礁; 海洋; 生态功能; 生存现状; 生态走廊; 地质调查工程

创 新 点: 牡蛎礁具有重要生态价值, 在系统总结分析中国天然牡蛎礁分布现状、历史变化及主要生态问题的基础上, 根据国内外牡蛎礁修复实践, 提出中国天然牡蛎礁保护修复建议。

中图分类号: Q958.8 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2023)04-1082-11

Present situation and protection restoration suggestions on the natural oyster reefs in China

YANG Peng^{1,2,3}, LI Jianfen^{1,2,3}, WANG Fu^{1,2,3}, HU Yunzhuang^{1,2,3},
SHI Baojia⁴, WANG Wenyu⁵, WANG Hong^{1,2,3}

(1. Tianjin Center, China Geological Survey (North China Center for Geoscience Innovation), Tianjin 300170, China; 2. Key Laboratory of Coast Geo-environment, China Geological Survey, Tianjin 300170, China; 3. North China Center for Geoscience

收稿日期: 2022-06-13; 改回日期: 2022-08-21

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20211301, DD20221727)资助。

作者简介: 杨朋, 男, 1990 年生, 博士, 高级工程师, 主要从事海岸带环境地质、工程地质研究; E-mail: dcyangpeng@163.com。

通讯作者: 王宏, 男, 1948 年生, 博士, 研究员, 主要从事泥质海岸带第四纪地质学研究; E-mail: wanghong_tj@mail.cgs.gov.cn。

Innovation, China Geological Survey, Tianjin 300170, China; 4. Ocean College, Hebei Agricultural University, Qinhuangdao 066003, Hebei, China; 5. College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, Shandong, China)

Abstract: This paper is result of marine geological survey engineering.

[Objective] Oyster reef has important ecological value, and studying its present situation is of great significance for coastal ecological protection and restoration. **[Methods]** This article reviewed the investigation and research data of the natural oyster reefs at home and abroad. In addition, the present situation, historical changes, as well as the major ecological problems of the natural oyster reefs in China were also discussed. On the basis of the results, combined with indigenous and abroad oyster reef ecosystem restoration practices, suggestions on the protection and restoration of the natural oyster reefs in China were put forward. **[Results]** The results show that the global oyster population has declined by 85% over the past century, with more than 90% of reefs in the Asia-Pacific region have already disappeared. The natural oyster reefs in China are also severely degraded, and the known natural living oyster reefs are mainly distributed in Caofeidian, Hebei, Dashentang, Tianjin, Binzhou Port and Laizhou Bay, Shandong, Xiaomiaohong, Jiangsu, Shenhu Bay and Kinmen, Fujian, etc. The existing oyster reefs in severely degraded areas are less than one-tenth of what they were in the past, causing serious damage to the structure and function of the estuary and coastal ecosystems. Therefore, the protection and restoration work is needed urgently. **[Conclusions]** The practices of oyster reef restoration at home and abroad show that it is feasible and quite significant to carry out area restoration of oyster reef ecosystem. In order to make full use of the ecological service function of oyster reefs, provide support for the ecological restoration, and improve the carbon sequestration capacity of coastal zones, this paper proposes four suggestions on protection and restoration, including promoting relevant legislation on oyster reef protection, conducting systematical survey and research on the natural living oyster reefs, pilot to carry out oyster reef restoration demonstration projects, and constructing "China Coastal Oyster Reef Eco-Corridor".

Key words: coast; oyster reef; marine; ecosystem function; present situation; eco-corridor; geological survey engineering

Highlights: Oyster reef has important ecological value. The present situations, historical changes and main ecological problems of the natural oyster reefs in China are systematically summarized and analyzed. On the basis of the practices of oyster reef restoration at home and abroad, some suggestions on the protection and restoration of natural oyster reefs are put forward.

About the first author: YANG Peng, male, born in 1990, doctor, engineer, engaged in the research on coastal environmental geology; E-mail: dcyangpeng@163.com.

About the corresponding author: WANG Hong, male, born in 1948, doctor, researcher, engaged in research on muddy coastal quaternary geology; E-mail: wanghong_tj@mail.cgs.gov.cn.

Fund support: Supported by the projects of China Geological Survey (No. DD20211301, No. DD20221727).

1 引言

牡蛎礁(oyster reef)是由大量牡蛎固着生长于硬底物表面所形成的一种广泛分布于温带和亚热带河口和浅海区的特殊海洋生境(Coen and Luckenbach, 2000)。牡蛎礁具有净化水质(TNC, 2020)、提供生物栖息地(Nelson et al., 2004)、固碳(Dame et al., 2000)和减灾(Miller et al., 2009)等重要生态功能,被称为“生态系统工程师”(La Peyre et al., 2014)。天然牡蛎礁对于海岸带生态修复具有重要现实意义。国内以往系统的研究工作集中在天津大神堂、江苏小庙洪等局部地区的天然牡蛎礁,缺少全国层面的系统研究;此外,已有的研究数据又过多地集中于基础研究,导

致牡蛎礁作为“生态系统工程师”的作用并未较好发挥。针对中国海岸带生态保护修复需求,亟需开展全国性的天然牡蛎礁调查研究工作。有鉴于此,本文系统搜集整理中国和世界天然牡蛎礁调查研究成果,采用ArcGIS空间分析功能,对中国天然牡蛎礁现状、变化历史及存在的主要生态问题进行了论述,结合国内外牡蛎礁修复实践,提出了中国天然牡蛎礁保护修复建议,以期为中国天然牡蛎礁保护修复和高效可持续利用提供支撑。

2 天然牡蛎礁分布和生存现状

2.1 天然牡蛎礁分布现状

近一个世纪以来,由于过度捕捞、病害、栖息地

退化、水质恶化和气候变化等原因,全球多数海湾和生态区内的牡蛎种群数量急剧下降,全球天然牡蛎礁退化了85%(图1)(Beck et al., 2014; TNC, 2020)。曾广泛分布在亚太地区的牡蛎礁体亦严重退化,超过90%的礁体已经消失(Beck et al., 2014)。河口和浅海生态系统的结构与功能受到严重破坏,近岸海域富营养化问题越来越严重(全为民等, 2006; 李梅娜等, 2022)。

历史上,中国曾拥有丰富的天然牡蛎礁资源,在温带和亚热带各大河流入海河口、潮间带及浅海区域分布着大量的天然牡蛎礁系统,为中国水产品和渔业提供了重要的自然资源。然而,近年来受过度采捕、水体污染、栖息地退化、海岸带开发等因素影响,中国天然牡蛎礁退化严重,大都处于功能灭绝状态。前人调查研究成果显示,中国已知的天然活牡蛎礁主要分布在河北曹妃甸(全为民等, 2022)、天津大神堂(房恩军等, 2007; 范昌福等, 2008, 2010)、山东滨州港(郭九涛和黄新宇, 2021)、山东莱州湾(耿秀山等, 1991)、江苏小庙洪(张忍顺等, 2004; 全为民等, 2012)、福建深沪湾和金门(姚庆元, 1985; 俞鸣同等, 2001)等地(图2)。近年来,专家学者认为在中国渤海、黄海、东海和南海沿岸

的潮间带和浅水潮下带均应有天然牡蛎礁分布,特别是在天然牡蛎种苗区及其周边海域大概率发育一定规模的天然牡蛎礁,如福建莆田、广东台山、广东珠海、广东湛江、广西钦州等地,但由于文献资料有限、系统性调查成果缺少,多数礁体的详细分布和生存现状不明(李辉尚等, 2017)。

2.2 存在的主要生态问题

如前文所述,中国已知现存天然牡蛎礁主要分布在天津大神堂、河北曹妃甸、山东滨州港、山东莱州湾、江苏小庙洪、福建深沪湾和金门等地,但受过度采捕、水体污染、气候变化、栖息地退化、海岸带开发等因素影响,绝大多数天然牡蛎礁面临生境破坏、面积萎缩、功能退化等生态问题。

天津大神堂天然牡蛎礁生长于天津大神堂村南部水深2.5~5.0 m的潮下带海区,由长牡蛎(*Crassostrea gigas*)组成。1970年代之前,大神堂牡蛎礁尚未遭到人类大规模捕捞破坏,礁体连片发育,面积约35 km²,礁顶高度可达到平潮位(范昌福等, 2008, 2010)。自20世纪90年代起,当地渔民开始大规模、高强度捕捞牡蛎。据不完全统计,1999—2006年,当地渔民累计捕捞活牡蛎多达10万t(范昌福等, 2010; 李建芬等, 2020)。至2007年,大

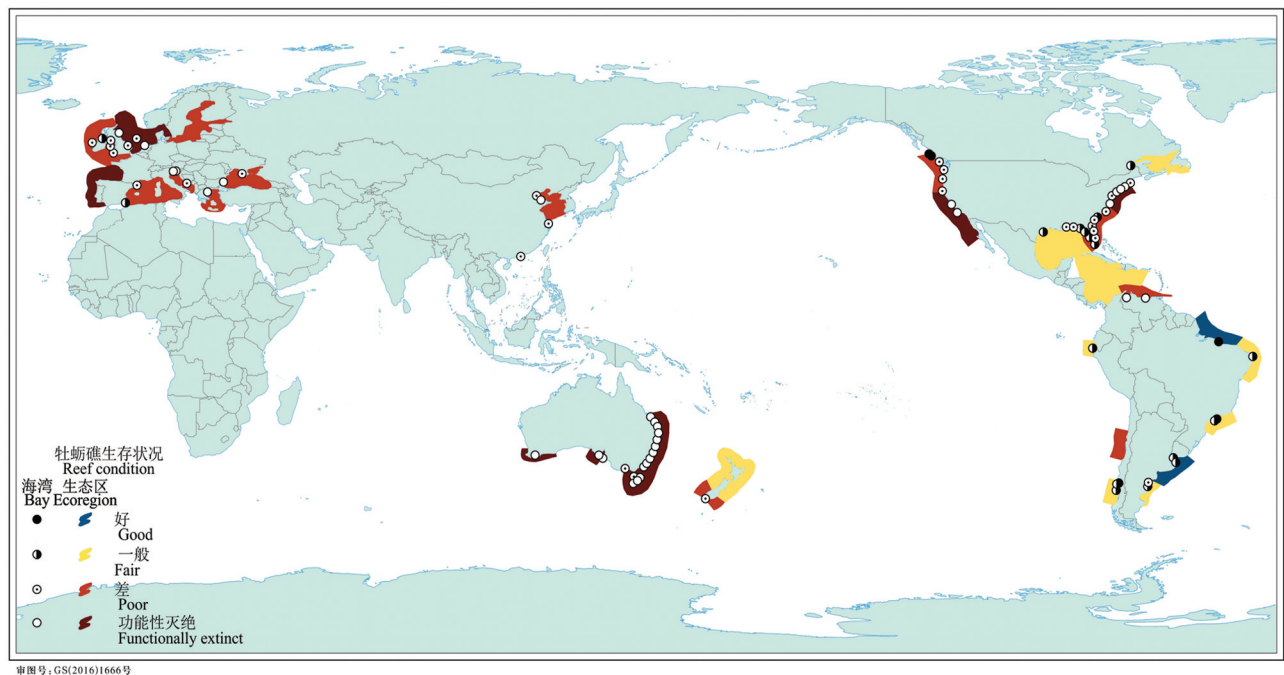


图1 全球活牡蛎礁分布现状及生存状况(据 Beck et al., 2011)

Fig.1 Global distribution and survival situation of the living oyster reefs (after Beck et al., 2011)



图2 中国天然活牡蛎礁分布示意图

Fig.2 Distribution of the natural living oyster reefs on the coast of China

神堂牡蛎礁仅存3个分散的礁区,面积已不足3 km²。2011年调查结果显示,大神堂牡蛎礁进一步退化,礁体面积已不足2 km²。为限制海洋开发活动对大神堂牡蛎礁的影响,2012年原国家海洋局正式批准建立天津大神堂牡蛎礁国家级海洋特别保护区,保护区面积34 km²。2019年最新调查结果表明,得益于多年来采取的各类保护和限制措施,大神堂牡蛎礁出现了新生的连片牡蛎礁,面积恢复到近3 km²,但仍不及1970年代的十分之一(李建芬等, 2020;王宏, 2022)。2021年现场调查结果显示,大神堂及周边海域牡蛎礁受当地渔民过度捕捞现象依旧严重,生存状况依旧不容乐观(图3)。

河北曹妃甸天然牡蛎礁位于河北省唐山市曹妃甸南侧0~5.0 m水深的潮间带—浅海区,区内多

分布离岸沙岛(障壁岛)、深槽和浅滩。曹妃甸牡蛎礁总面积近15 km²,牡蛎种类为长牡蛎和侏儒牡蛎(*Nanostrea fluctigera*),长牡蛎在数量上占绝对优势。自2018年春季开始,曹妃甸牡蛎礁遭到当地渔民大肆捕捞,用于捕捞牡蛎的专用拖网在捕捞作业时将活体牡蛎和大量牡蛎壳一同从海底捞出,严重破坏牡蛎礁生境结构,对天然牡蛎礁造成毁灭性破坏(全为民等, 2022)。近几年的过度捕捞导致礁体面积持续减少,牡蛎资源量急剧下降,牡蛎礁生存现状不容乐观,亟待加强保护和修复。

山东滨州港天然牡蛎礁分布于滨州港南东侧一条近南北走向的人工大坝上,大坝建成已有20多年,涨潮时大坝顶部被海水淹没,退潮时大坝顶部则露出水面。满潮时,大坝顶部可位于水面以下2



图3 渔民正在大神堂码头分拣从当地海域捕捞的天然牡蛎

Fig.3 Fishermen are sorting the natural oysters caught from local ocean at the Dashentang Pier

m左右。滨州港天然牡蛎礁由长牡蛎组成,礁体长约5000 m,宽10 m,厚度约80 cm,总面积达5 ha,其是迄今为止长江口以北保护完好的单个面积最大的长牡蛎礁(郭九涛和黄新宇,2021)。目前,该牡蛎礁尚未受到周边渔民捕捞和破坏。

山东莱州湾天然牡蛎礁主要分布于莱州湾的4处河口,其中,淄脉沟口和小清河口的牡蛎礁规模最大,由长牡蛎和近江牡蛎(*Crassostrea ariakensis*)构成。20世纪60年代前期至80年代,受黄河入海口泥沙扩散、海面变化、过度捕捞以及水体污染的影响,两处河口牡蛎礁不断向海延伸生长,与此同时,河口侧的牡蛎礁逐渐死亡。20世纪80年中后期的调查结果显示,淄脉沟口死亡礁体面积约0.89 km²,仅在向海最外侧存活有0.17 km²牡蛎礁;小清河河口存活的礁体面积为0.2 km²(耿秀山等,1991)。由于近30年缺乏系统性调查,莱州湾内牡蛎礁的生存现状尚不清楚。

江苏小庙洪(海门蛎岬山)天然牡蛎礁位于江苏省海门市东灶港小庙洪海区。文献资料显示,小庙洪牡蛎礁的造礁牡蛎具有明显的沉积层次,礁体剖面表明,礁体由2种牡蛎组成且分层明显,礁体下部为长牡蛎,上部则渐变为近江牡蛎(张忍顺,2004)。2003年测量结果表明,小庙洪牡蛎礁的礁体分为主礁区、洪西堆和三沟堆等三个区域,总面

积3.55 km²(张忍顺等,2007)。2006年,为保护海门蛎岬山牡蛎礁资源,原国家海洋局批准设立江苏海门蛎岬山牡蛎礁国家级海洋特别保护区;2012年,批准更名为海门江苏蛎岬山国家海洋公园。2013年调查结果显示,由于海域环境发生变化、人为捕捞及泥沙沉积等原因,小庙洪牡蛎礁内牡蛎个体逐渐变小、礁体面积不断缩小,与2003年相比,面积下降了约38.8%(全为民等,2016)。

3 牡蛎礁保护修复

目前,牡蛎礁保护修复流程主要包括前期规划、了解生物安全许可、制定修复方法以及后期监测等过程,修复周期一般在10年左右(Luckenbach et al., 2003)。为了科学评估牡蛎礁保护修复项目的修复成效以及生态影响是否达到预期目标,所有保护修复项目都应遵循BACI原则(Before-After-Control-Impact,修复前-修复后-对照组-实验组)设计和执行监测。此外,国际上对于牡蛎礁保护修复成功的评价指标和评价标准仍有较大的争议,常用的评价指标包括牡蛎密度、个体大小、礁体面积、礁体高度和礁体动物等(Bagget et al., 2014)。

3.1 国外牡蛎礁修复实践

为重振牡蛎产业、恢复牡蛎礁生境及其提供的生态服务价值,自20世纪90年代,美国、澳大利亚

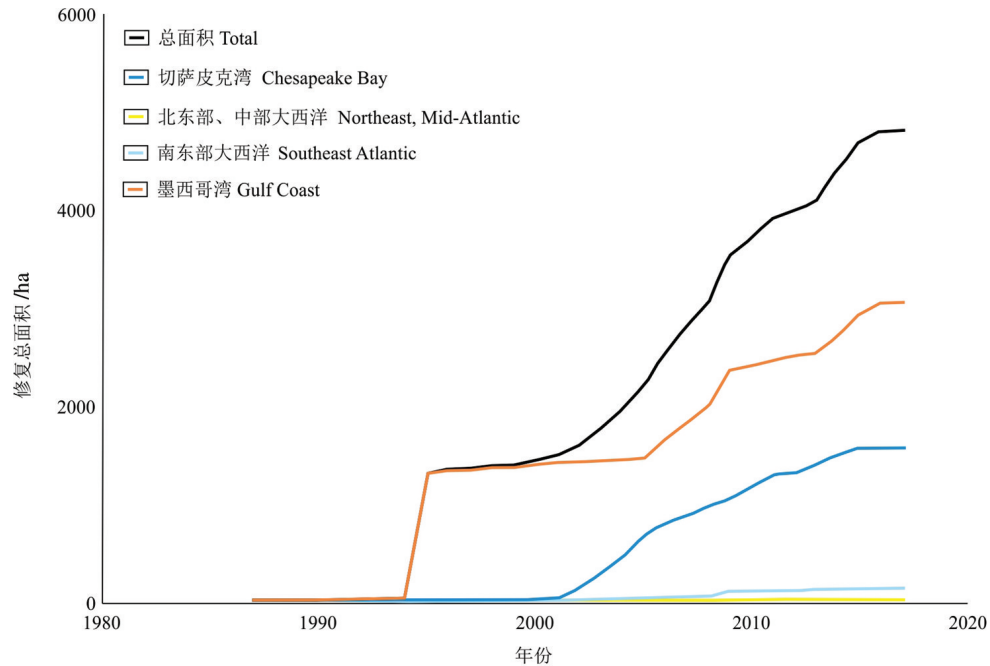


图4 1987年以来美国各海区构建的牡蛎礁体累计面积 (据 Hernandez et al., 2018)

Fig.4 Total area of oyster reefs constructed in various coastal regions of the United States since 1987 (after Hernandez et al., 2018)

及新西兰等国家陆续开展了一系列的牡蛎礁修复项目。美国是全球较早关注和开展牡蛎礁栖息地修复活动的国家,实施了大量牡蛎礁修复项目(Kennedy, 2011)。自2000年以来,美国平均每年建造的美洲牡蛎(*Crassostrea virginica*)礁体面积达190 ha(图4)(Hernandez et al., 2018)。其中,纽约港自20世纪90年代开始便开展了牡蛎礁修复研究和实践,并设定了2020年前修复8 ha牡蛎礁,2050年前修复809 ha牡蛎礁的修复目标,截至2019年,至少已经修复了6 ha牡蛎礁(McCann, 2018)。澳大利亚牡蛎礁修复项目已覆盖全境,从东海岸昆士兰州的努萨到澳大利亚南部海岸,再到西澳大利亚州的佩思分布有数十个牡蛎礁修复项目(TNC, 2020)。

位于大西洋海岸中部的切萨皮克湾曾经生活着大量天然活牡蛎,但由于水体污染和病害等原因,如今只剩当年的1%(Newell, 1988)。切萨皮克湾的牡蛎礁修复工作开始于20世纪90年代。早期,在切萨皮克湾基金会、美国鱼类基金会、美国环境保护局等机构的资助下开展了小规模试点工作,旨在评估礁体结构的重要性,以及试验小范围增殖放流能否有效增加种群补充量。近年来,随着相关科学知识的增加和经验的积累,在13508号总统行政令(2009年)、切萨皮克湾流域各州州长与联邦政

府签署的《切萨皮克湾流域协议》(2014年)等两项政策的推动下,开始了更大规模、多方协作的牡蛎礁修复工作。

2011年启动的美国切萨皮克湾哈里斯溪牡蛎礁修复工程是全球最大规模的牡蛎礁修复项目,涉及美国国家海洋和大气管理局、美国陆军工程兵团、马里兰州自然资源部门、马里兰大学以及牡蛎恢复合作关系等多个科研院校和社会组织,从前期设定修复目标、规划项目,到实施后的长年监测与评估,耗时8年,2011—2015年共修复142 ha牡蛎礁(TNC, 2020)。2017年监测结果显示,98%的礁体上的牡蛎生物量和密度都达到了修复成功的最低标准(TNC, 2020)。该项目展示出一套完整的、科学系统的大规模牡蛎礁修复方法,目前已推广到湾内其他9条需要修复的支流,为其他大规模牡蛎礁修复项目提供可借鉴经验。

相关学者通过数学模型估算哈里斯溪修复的牡蛎礁每年可移除46650 kg氮和2140 kg磷,每年至少创造300万美元的生态价值(Kellogg et al., 2018)。此外,另有相关模型预测,与未修复时相比,哈里斯溪修复的礁体成熟时,当地的蓝蟹(*Callinectes sapidus*)捕获量将增长超过150%,白鲈鱼(*White Perch*)的捕获量将增加650%,预计该区域

内渔业总产出每年增长2300万美元(Knoche et al., 2018)。

目前,经过前期小规模修复实验,美国切萨皮克湾、澳大利亚菲利普港湾和圣文森特湾已经开展了大规模的牡蛎礁修复项目,并取得了良好的修复成效或进展,这不仅为当地带来了生态、社会和经济效益,也为全球其他地区的大规模牡蛎礁修复提供了可供借鉴的修复管理经验。

3.2 中国牡蛎礁修复实践

中国对牡蛎礁栖息地的关注度以及研究实践相对较少。文献资料显示,国内早些年已开展过一些以构建或恢复牡蛎礁生境为目的的修复实践。例如,1998—2011年,中国水产科学院东海水产研究所的研究人员通过在长江口深水航道以混凝土为材质的导堤和丁坝上移植人工培育的近江牡蛎,建立当地可持续的牡蛎种群和人工牡蛎礁生态系统,旨在利用牡蛎礁的生态系统服务功能缓解长江口深水航道工程建设对河口生态及渔业资源的影响(陈亚瞿等, 2013)。中国水产科学院东海水产研究所和天津渤海水产研究所的科研人员分别于2013年和2014年,采用投放牡蛎壳包以增加牡蛎附着基的方法分别对江苏小庙洪和天津大神堂的牡蛎礁进行修复(全为民等, 2017)。2019年, TNC与浙江省三门县政府、中国水产学会以及中国水产科学院东海水产研究所合作,在当地的养殖滩涂启动了牡蛎礁修复试点项目,以支持当地牡蛎种质资源的保护与修复(TNC, 2020)。中国科学院海洋研究所科研人员立足黄渤海区长牡蛎与近江牡蛎野生资源,结合当地海域潮位信息等水文资料、底质特征、测试礁体的生长存活情况,利用自主开发的牡蛎生态礁构建专利技术,在不同潮位滩涂点构建牡蛎礁区7.5 ha,尝试进行牡蛎礁修复工作(中国科学院实验海洋生物学重点实验室, 2020)。

由中国东海水产研究所率先启动的长江口牡蛎礁生态系统修复项目,通过巨牡蛎的增殖放流,依靠深水航道导堤和丁坝,构造了长达147 km,面积约75 km²的人工牡蛎礁体。后期监测发现,牡蛎密度和生物量均呈指数增长,附近水域底栖动物物种数、密度和生物量均有所增加,极大地增加了长江口牡蛎种群的数量,改善了附近水域生态系统结构与功能(全为民等, 2017)。监测结果表明,人工牡

蛎礁和天然牡蛎礁具有相似的动物群落和食物网结构(Brown et al., 2014; Dillon et al., 2015)。遗憾的是,该项工作近年来未见进一步的进展。以上结果表明,人为保护修复牡蛎礁构建牡蛎礁生态系统是可行的。

3.3 中国牡蛎礁保护修复建议

为充分利用牡蛎礁的生态系统服务功能,有效服务中国天然牡蛎礁保护修复和可持续利用,基于牡蛎礁分布和生存现状、国内外牡蛎礁修复实践等调查研究成果,提出以下中国天然牡蛎礁保护修复建议。

3.3.1 推进相关立法工作

从管理角度,亟需推进相关立法工作,切实加强牡蛎礁生态保护工作。红树林和珊瑚礁都已经有的地方性保护规定和条例,天然牡蛎礁由于其生存范围广,亟需从全国层面开展立法工作,促进对天然牡蛎礁的科学保护。随着沿海地区经济社会高速发展,入海污染物总量不断增加,围填海工程占用近海栖息地,导致近岸海域环境质量恶化、生态系统服务功能下降。同时,由于过度捕捞,中国近岸海域天然牡蛎礁面积快速减少,生态功能退化严重。为充分发挥牡蛎礁的生态系统服务功能,在当前形势下加强牡蛎礁生态保护工作,对于保护海域生态环境、加强渔业资源养护具有重要意义。

3.3.2 系统开展天然活体牡蛎礁调查与研究

从科学角度,亟需系统开展天然活牡蛎礁调查与研究。开展中国沿岸天然牡蛎礁的系统性调查研究,在传统形态分类及解剖分类的基础上,运用DNA序列测定与比对方法进行牡蛎定名,进一步查清其分布、生存现状,评估重点省市或海域的生态系统服务功能。针对近年来泥质岸线“牡蛎扩张”(The Oyster Expansion)现象,系统开展综合研究。建议选择渤海湾和苏北—长江口为示范区,对这些地区已有和新出现的牡蛎礁进行持续观测,查清牡蛎扩张的原因,以及与互花米草之间的生态学关系,为滩涂基于牡蛎礁的生态修复提供经验和技術。

3.3.3 试点实施牡蛎礁修复示范项目

参照目前牡蛎礁保护修复流程、后期监测及效果评价流程,选择典型区域实施牡蛎礁修复示范项目。修复成功后,牡蛎过滤海水量按200升/只/天(Nelson et al., 2004),单位面积牡蛎个数按850个/m²

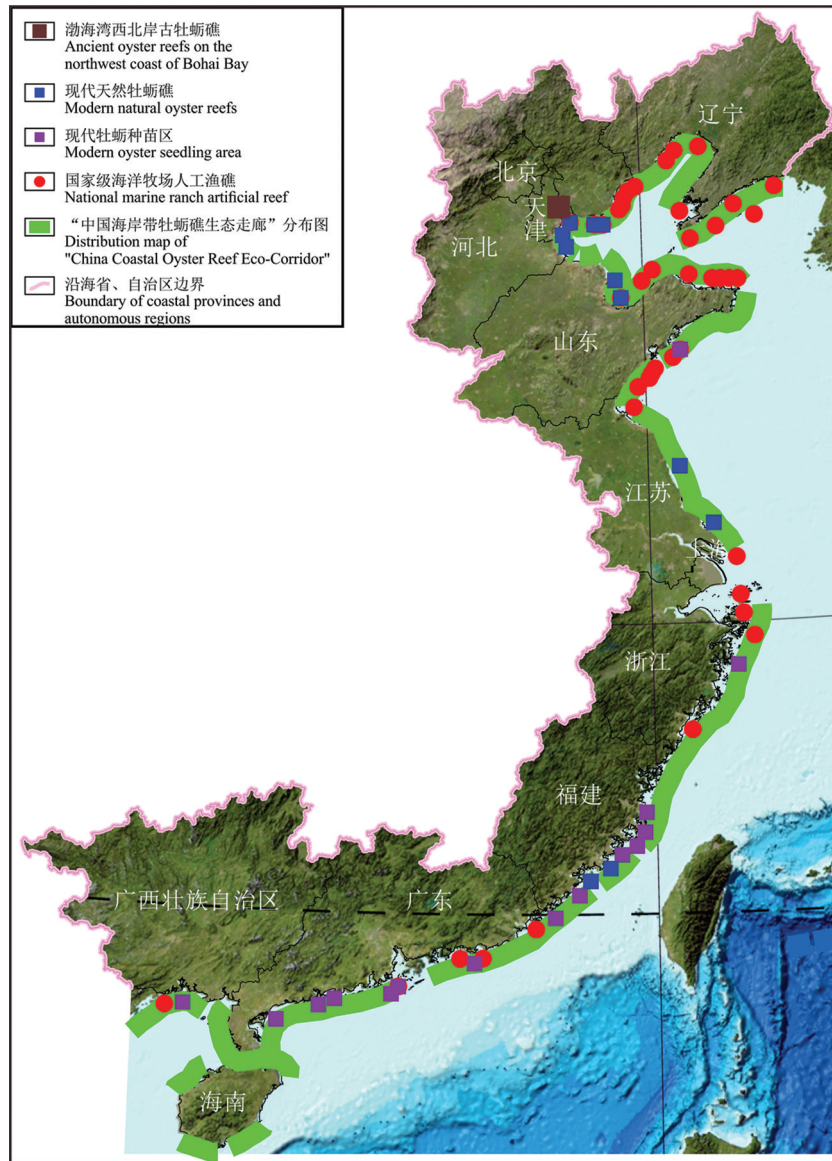


图5 “中国海岸带牡蛎礁生态走廊”分布示意图
Fig.5 Distribution map of "China Coastal Oyster Reef Eco-Corridor"

(全为民等, 2017), 单位面积固碳量按 2.7 kg/m^2 (沈新强等, 2011) 计算, 则每修复 1 km^2 牡蛎礁, 可过滤海水 $1.7 \times 10^{11} \text{ L/d}$, 固碳 $2.7 \times 10^3 \text{ t/a}$, 相当于 0.18 km^2 森林的年均碳汇量。通过总结试点牡蛎礁生态修复技术和国内相关经验, 建立中国牡蛎礁生态修复技术体系, 以便大面积推广应用。

3.3.4 建设“中国海岸带牡蛎礁生态走廊”(China Coastal Oyster Reef Eco-Corridor)

国家级海洋牧场示范区建设规划(2017—2025年)显示, 截至2016年, 中国沿海共建成国家级海洋牧场42个, 均涉及建造人工鱼礁, 同时, 沿海区域存

在数十处天然牡蛎礁及牡蛎种苗区。为充分利用牡蛎礁的生态系统服务功能, 本文建议在试点修复的基础上, 建设“中国海岸带牡蛎礁生态走廊”, 北起辽宁丹东, 南至广西防城港(图5)。预期在中国沿海岸线(堤)—潮下带之间构建牡蛎礁生态走廊, 在全国50%的海岸线上(长度约9000 km)建立宽约200 m的牡蛎廊道, 建成后除了能够有效提升海岸防护能力外, 预期每天可过滤海水 $3.06 \times 10^{14} \text{ L}$, 固碳 $4.86 \times 10^6 \text{ t/a}$, 相当于 320 km^2 森林的年均碳汇量, 可有效改善中国近海海域的水质, 并可提高自然碳储存能力。

4 结 论

目前,中国已知的天然活牡蛎礁主要分布于河北曹妃甸、天津大神堂、山东滨州港、山东莱州湾、江苏小庙洪、福建深沪湾和金门等地,但礁体的详细分布和生存现状仍不清楚,受过度采捕、水体污染、海岸带开发等因素影响,大都处于功能灭绝状态。为充分发挥天然牡蛎礁系统的生态服务功能,亟需开展相关保护修复工作。

针对天然牡蛎礁破坏造成的生态环境退化,自20世纪90年代,国内外开展了一系列牡蛎礁恢复项目,均取得了良好的修复成效或进展,不仅为当地带来了生态、社会和经济效益,也为全球其他地区大规模牡蛎礁修复提供了可供借鉴的修复管理经验。同时,表明人为保护修复牡蛎礁构建牡蛎礁生态系统是可行的。

为有效服务中国天然牡蛎礁保护修复和可持续利用,支撑中国海岸带生态保护修复工程,本文提出推进相关立法工作、系统开展天然活牡蛎礁调查与研究、试点实施牡蛎礁修复示范项目以及建设“中国海岸带牡蛎礁生态走廊”等保护修复建议。牡蛎礁生态走廊建成后,不仅能够有效提升中国海岸防护能力,而且可有效改善近海海域水质,提高海岸带自然碳储能力。

References

Baggett L P, Powers S P, Brumbaugh R. 2014. Oyster Habitat Restoration Monitoring and Assessment Handbook [M]. Arlington: The Nature Conservancy: 96.

Beck M W, Brumbaugh R D, Airoidi 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. 2011. Oyster reefs at risk and recommendations for conservation, restoration, and management[J]. *BioScience*, 61(2): 107–116.

Chen Yaqun, Quan Weimin, Shi Liyan. 2013. Creating a model for the combination of estuary and coastal engineering construction and aquatic ecological restoration in China: Research and application of key technologies for the construction of artificial oyster reef ecosystems in the Yangtze Estuary [J]. *Management and Research on Scientific Technological Achievements*, 10: 82–84(in Chinese).

Coen L D, Luckenbach M W. 2000. Developing success criteria and goals for evaluating oyster reef restoration: Ecological function or resource exploitation? [J]. *Ecological Engineering*, 15(3): 323–343.

Dame R F, Bushek D, Allen D M, Edwards D G, Gregory L, Lewitus A

J, Crawford S, Koepfler E T, Corbett C W, Kjerfve B, Prins T C. 2000. The experimental analysis of tidal creeks dominated by oyster reefs: The premanipulation year[J]. *Journal of Shellfish Research*, 19(1): 361–369.

Dillon K S, Peterson M S, May C A. 2015. Functional equivalence of constructed and natural intertidal eastern oyster reef habitats in a northern Gulf of Mexico estuary[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 528: 187–203.

Fan Changfu, Pei Yandong, Tian Lizhu, Liu Zhiguang, Wang Hong. 2010. Living oyster reefs and its resource conservation in western Bohai Bay, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 29(5): 660–667 (in Chinese with English abstract).

Fan Changfu, Tian Lizhu, Wang Fu. 2008. Comprehensive Investigation Report on the Living Oyster Reefs in Dashentang, Tianjin [R]. Tianjin: Tianjin Centre, China Geological Survey (in Chinese).

Fang Enjun, Li Wenwen, Yu Jie. 2007. Sustainable use of live oyster reef in Bohai Gulf[J]. *Modern Fisheries Information*, 11: 12–14(in Chinese with English abstract).

Geng Xiushan, Fu Mingzuo, Xu Xiaoshi, Li Peiying. 1991. Development and ecological characteristics of modern oyster reefs and their paleoenvironmental significance[J]. *Science China*, 21(8): 867–876(in Chinese with English abstract).

Guo Jiutao, Huang Xinyu. 2021. A new giant oyster discovered in the waters of Binzhou[N]. *Dazhong Daily*. <https://new.qq.com/omn/20210621/20210621A0DBHC00.html> (in Chinese).

Hernandez A B, Brumbaugh R D, Frederick P, Grizzle R, Luckenbach M W, Peterson C H, Angelini C. 2018. Restoring the eastern oyster: How much progress has been made in 53 years?[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 16: 463–471.

Kellogg M L, Brush M J, Cornwell J C. 2018. An Updated Model for Estimating TMDL-related Benefits of Oyster Reef Restoration[R]. Gloucester Point: Virginia Institute of Marine Science.

Kennedy V S. 2011. Lessons learned from efforts to restore oyster populations in maryland and virginia, 1990 to 2007[J]. *Journal of Shellfish Research*, 30: 719–731.

Key Laboratory of Experimental Marine Biology, Chinese Academy of Sciences. 2020. The Rapid Construction Technology of Oyster Ecological Reef Helping the Construction of Ecological Civilization in the Yellow River Delta[N]. http://www.qdio.ac.cn/emblc/xwzx/kyjz_51359/202006/t20200619_565330.html (in Chinese).

Knoche S, Ihde T, Townsend H. 2018. Estimating Ecological Benefits and Socio-Economic Impacts from Oyster Reef Restoration in the Choptank River Complex, Chesapeake Bay[R]. Baltimore: Morgan State University.

Laura A B, Jessica N F, Kenneth M B, Megan K L P. 2014. Oyster reef restoration in the northern Gulf of Mexico: Effect of artificial substrate and age on nekton and benthic macroinvertebrate assemblage use[J]. *Restoration Ecology*, 22(2): 214–222.

- Li Huishang, Li Jianming, Qin Xiaoming, Zeng Zhinan, Lin Zhishu, Li Qiongzhen. 2017. The status, problems, and countermeasure of oyster industry in China—Based on the an empirical analyses of Shandong Fujian and Guangdong Guangxi Provinces[J]. *Marine Sciences*, 41(11): 125–129(in Chinese with English abstract).
- Li Jianfen, Shang Zhiwen, Chen Yongsheng, Tian Lizhu, Jiang Xingyu, Wang Fu, Hu Yunzhuang, Li Yong, Yang Peng, Wen Mingzheng, Yuan Haifan, Shi Peixin, Wang Hong. 2020. Research status and protection suggestions on oyster reef in Bohai Bay[J]. *Geological Survey and Research*, 43(4): 317–333(in Chinese with English abstract).
- Li Meina, Yin Ping, Duan Xiaoyong, Dong Chao, Cao Ke, Yang Lei, Chen Xuanbo. 2022. Land use change and ecosystem effect in typical coastal zone of Yangtze River Delta in the last 20 years[J]. *Geology in China*, 49(4): 1114–1126(in Chinese with English abstract).
- Luckenbach M. 2003. Oyster reef habitat restoration: A review of restoration approaches and an agenda for the future [J]. *Journal of Shellfish Research*, 22: 341–350.
- McCann M. 2018. New York City Oyster Monitoring Report: 2016–2017[R]. New York, NY, USA: The Nature Conservancy.
- Miller A W, Reynolds A C, Sobrino C, Riedel G F. 2009. Shellfish face uncertain future in high CO₂ world: Influence of acidification on oyster larvae calcification and growth in estuaries [J]. *Plos One*, 4(5): e5661.
- Nelson K A, Leonard L A, Posey M H, Alphin T D, Mallin M A. 2004. Using transplanted oyster (*Crassostrea virginica*) beds to improve water quality in small tidal creeks: a pilot study [J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 298(2): 347–368.
- Newell R I E. 1988. Ecological Changes in Chesapeake Bay: Are They the Result of over Harvesting the American Oyster, *Crassostrea Virginica*?[R]. Gloucester Point, VA, USA: Chesapeake Research Consortium.
- Peyre M L, Furlong J, Brown L A, Piazza B P, Brown K. 2014. Oyster reef restoration in the northern Gulf of Mexico: Extent, methods and outcomes[J]. *Ocean & Coastal Management*, 89(2): 20–28.
- Quan Weimin, An Chuanguang, Ma Chunyan, Huang Houjian, Cheng Wei, Wang Yunlong, Shen Xinqiang, Chen Yaqu. 2012. Biodiversity and community structure of benthic macroinvertebrates on the Xiaomiaohong oyster reef in Jiangsu Province, China[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 43(5): 992–1000(in Chinese with English abstract).
- Quan Weimin, Feng Mei, Zhou Zhenxing, Wu Zuli, Tang Fenghua, Wang Yunlong, Bao Xiaosong, Shen Hui, Cheng Wei. 2017. Ecological assessment of the oyster *Crassostrea sikamea* population and associated benthic communities on restored oyster reefs along Jiangsu Province coast, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 37(5): 1709–1718(in Chinese with English abstract).
- Quan Weimin, Shen Xinqiang, Luo Minbo, Chen Yaqu. 2006. Ecological function and restoration measures of oyster reef in estuaries[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 25(10): 1234–1239(in Chinese with English abstract).
- Quan Weimin, Zhang Yunling, Qi Zunli, Xu Min, Fan Ruiliang, Wang Taoni, Li Nannan, Sun Zhaoyue, Zhou Haisheng, Li Chun, Zhang Xiuwen. 2022. Distribution and ecological status of natural oyster reefs on the coast of Caofeidian—Leting, Tangshan, Hebei Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 42(3): 1142–1152(in Chinese with English abstract).
- Quan Weimin, Zhou Weifeng, Ma Chunyan, Feng Mei, Zhou Zhenxing, Tang Fenghua, Wu Zuli, Fan Ruiliang, Wang Yunlong, Bao Xiaosong, Shen Hui, Cheng Wei. 2016. Ecological status of a natural intertidal oyster reef in Haumen County, Jiangsu Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 36(23): 7749–7757(in Chinese with English abstract).
- Shen Xinqiang, Quan Weimin, Yuan Qi. 2011. Restoration and assessment of carbon sink potential for aintertidal oyster reef in the Yangtze River Estuary, China[J]. *Journal of Agro—Environment Science*, 30(10): 2119–2123(in Chinese with English abstract).
- The Nature Conservancy (TNC). 2020. Saving Oyster Reefs Oyster Reef Restoration in Asia Pacific[N]. The Nature Conservancy's official account. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1674273283668823916&wfr=spider&for=pc>(in Chinese).
- The Nature Conservancy (TNC). 2020. Saving Oyster Reef The World's Largest Oyster Reef Restoration—The Case of Harris Creek, Chesapeake Bay[N]. The Nature Conservancy's official account. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1668165437056634996&wfr=spider&for=pc>(in Chinese).
- The Nature Conservancy (TNC) China Program. 2020. Oyster reef Ecosystem engineer[J]. *Man and the Biosphere*, (1): 30–32.
- Wang Hong. 2022. Barrier— island— and— lagoon characterized land formation in the Bohai Bay and its enlightenment to sustainability of coastal development[J]. *North China Geology*, 45(1): 1–17(in Chinese with English abstract).
- Yao Qingyuan. 1985. Discovery of oyster reefs in the northeast sea area of Kinmen Island, Fujian and its paleogeographical significance[J]. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 1: 108–109(in Chinese).
- Yu Mingtong, Shoji Fujii. 2001. Discussion on the genesis of the oyster bank in Shenhui Bay, Fujian Province[J]. *Marine Science Bulletin*, 20(5): 24–30(in Chinese with English abstract).
- Zhang Renshun. 2004. The geomorphology— sedimentology character of oyster reef in Xiaomiaohong Tidal Channel, Jiangsu Province[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1(35): 1–7(in Chinese with English abstract).
- Zhang Renshun, Qi Deli, Ge Yunjian, Yu Rong, Zhang Zhenglong, Gu Yong, Li Jialin, Wang Yanhong. 2004. Preliminary study on

- ecological evaluation and protection of Xiaomiaohong oyster reef in Jiangsu Province[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 32(S): 21–26(in Chinese with English abstract).
- Zhang Renshun, Wang Hongyan, Zhang Zhenglong, Jiang Jiaofang. 2007. Geomorphology and evolution of the Xiaomiaohong oyster reef of Jiangsu Coast, China[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 3(38): 259–265(in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 陈亚瞿, 全为民, 施利燕. 2013. 开创我国河口海岸工程建设与水生生态恢复相结合的典范: 长江口人工牡蛎礁生态系统构建关键技术研究及应用[J]. *科技成果管理与研究*, 10: 82–84.
- 大自然保护协会(TNC). 2020. 拯救牡蛎礁 | 亚太地区的牡蛎礁修复工作[N]. 大自然保护协会官方账号. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1674273283668823916&wfr=spider&for=pc>.
- 大自然保护协会(TNC). 2020. 拯救牡蛎礁 | 全球最大规模牡蛎礁修复——切萨皮克湾哈里斯溪案例[N]. 大自然保护协会官方账号. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1668165437056634996&wfr=spider&for=pc>.
- 大自然保护协会(TNC)中国项目. 2020. 牡蛎礁生态系统的工程师[J]. *人与生物圈*, (1): 30–32.
- 范昌福, 裴艳东, 田立柱, 刘志广, 王宏. 2010. 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*, 29(5): 660–667.
- 范昌福, 田立柱, 王福. 2008. 天津市大神堂海区活牡蛎礁体综合调查调查报告[R]. 1–74.
- 房恩军, 李雯雯, 于杰. 2007. 渤海湾活牡蛎礁(Oyster reef)及可持续利用[J]. *现代渔业信息*, 11: 12–14.
- 耿秀山, 傅命佐, 徐孝诗, 李培英. 1991. 现代牡蛎礁发育与生态特征及古环境意义[J]. *中国科学*, 21(8): 867–876.
- 郭九涛, 黄新宇. 2021. 滨州海域新发现一处巨型牡蛎[N]. 大众网. <https://new.qq.com/omn/20210621/20210621A0DBHC00.html>
- 李辉尚, 李坚明, 秦小明, 曾志南, 林治术, 李琼珍. 2017. 中国牡蛎产业发展现状、问题与对策——基于鲁、闽、粤、桂四省区的实证分析[J]. *海洋科学*, 41(11): 125–129.
- 李建芬, 商志文, 陈永胜, 田立柱, 姜兴钰, 王福, 胡云壮, 李勇, 杨朋, 文明征, 袁海帆, 施佩歆, 王宏. 2020. 渤海湾牡蛎礁的研究现状与保护建议[J]. *地质调查与研究*, 43(4): 317–333.
- 李梅娜, 印萍, 段晓勇, 董超, 曹珂, 杨磊, 陈选博. 2022. 近20年来长江三角洲海岸带典型区土地利用变化与生态环境效应研究[J]. *中国地质*, 49(4): 1114–1126.
- 全为民, 安传光, 马春艳, 黄厚见, 成伟, 王云龙, 沈新强, 陈亚瞿. 2012. 江苏小庙洪牡蛎礁大型底栖动物多样性及群落结构[J]. *海洋与湖沼*, 43(5): 992–1000.
- 全为民, 冯美, 周振兴, 吴祖立, 唐峰华, 王云龙, 包小松, 沈辉, 成伟. 2017. 江苏海门蛎蚜山牡蛎礁恢复工程的生态评估[J]. *生态学报*, 37(5): 1709–1718.
- 全为民, 沈新强, 罗民波, 陈亚瞿. 2006. 河口地区牡蛎礁的生态功能及恢复措施[J]. *生态学杂志*, 25(10): 1234–1239.
- 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. 2022. 河北唐山曹妃甸一乐亭海域自然牡蛎礁分布及生态意义[J]. *生态学报*, 42(3): 1142–1152.
- 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. 2016. 江苏海门蛎蚜山牡蛎礁生态现状评价[J]. *生态学报*, 36(23): 7749–7757.
- 沈新强, 全为民, 袁骥. 2011. 长江口牡蛎礁恢复及碳汇潜力评估[J]. *农业环境科学学报*, 30(10): 2119–2123.
- 王宏. 2022. 渤海湾障壁岛-潟湖型成陆过程及对今后海岸带可持续发展的启示——纪念天津地质调查中心第四纪地质调查与研究转入海岸带方向40年[J]. *华北地质*, 45(1): 1–17.
- 姚庆元. 1985. 福建金门岛东北海区牡蛎礁的发现及其古地理意义[J]. *台湾海峡*, 1: 108–109.
- 俞鸣同, 藤井昭二, 坂本亨. 2001. 福建深沪湾牡蛎礁的成因分析[J]. *海洋通报*, 20(5): 24–30.
- 张忍顺. 2004. 江苏小庙洪牡蛎礁的地貌—沉积特征[J]. *海洋与湖沼*, 1(35): 1–7.
- 张忍顺, 齐德利, 葛云健, 于蓉, 张正龙, 顾顺, 李加林, 王艳红. 2004. 江苏省小庙洪牡蛎礁生态评价与保护初步研究[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 32(增刊): 21–26.
- 张忍顺, 王艳红, 张正龙, 蒋姣芳. 2007. 江苏小庙洪牡蛎礁的地貌特征及演化[J]. *海洋与湖沼*, 3(38): 259–265.
- 中国科学院实验海洋生物学重点实验室. 2020. 牡蛎生态礁快速构建技术助力黄河三角洲生态文明建设[N]. http://www.qdio.ac.cn/embcl/xwzx/kyjz_51359/202006/t20200619_565330.html