

牡蛎礁

生态减灾修复手册



自然资源部
2024年11月

组织机构和人员

指导机构

自然资源部海洋预警监测司

编制单位

自然资源部第二海洋研究所
中国水产科学研究院东海水产研究所
中国科学院海洋研究所
自然资源部海洋减灾中心
大自然保护协会北京代表处
自然资源部第四海洋研究所
山东省海洋科学研究院
上海海洋大学
自然资源部北海生态中心
河北省近海生态修复技术创新中心
山东清海生态环境研究院有限公司

编制组成员

孙 丽	谭勇华	莫 微	全为民	李 莉	程 杰	王德刚	陈新平
吕兑安	程 珺	于 淼	徐 晧	初梦如	范亦婷	温国义	王 威
张 祎	于 硕	宋静静	张 硕	刘 青	王 玥	张云岭	李子彬
王沈同	李楠楠	郑 洋	马秀芬	兰思群	姜 伟	范瑞良	

前言

INTRODUCTION

自然灾害是人类面临的最重大的全球性问题之一。为有效应对自然灾害对人类的严重影响，基于自然的解决方案（NbS）、基于生态系统的减轻灾害风险（Eco-DRR）等方法在世界上受到广泛关注，旨在通过对生态系统的保护、恢复和可持续管理，利用生态系统服务功能应对灾害挑战，确保社会经济可持续和有韧性的发展。这些方法与中国的生态文明理念和新时代防灾减灾指导思想高度契合。

在沿海地区，滨海盐沼、牡蛎礁、砂质海岸、海草床等海岸带生态系统能够有效地防潮御浪、固堤护岸，是天然的“海洋卫士”，在减轻海洋灾害风险方面发挥着重要作用。通过实施海岸带生态保护修复，有助于发挥生态系统的减灾功能，提升沿海抵御台风、风暴潮等海洋灾害的能力。为加强对实践工作的指导，自然资源部组织编制了滨海盐沼、牡蛎礁、砂质海岸、海草床生态减灾修复系列手册，以生态与减灾协同增效为目标，对生态本底调查、生态问题诊断、修复目标、修复措施以及跟踪监测、效果评估和适应性管理等全链条技术环节给出详细说明。手册注重科普性、实用性和可操作性，图文并茂，通俗易懂，可为沿海地方科学实施海岸带生态减灾修复提供技术支撑。

生态减灾修复系列手册编制得到了财政部、世界自然保护联盟（IUCN）的支持，在此表示衷心感谢，并对海岸带生态减灾的实践者和专家表示敬意。

限于时间和水平，本系列手册难免存在不足之处，敬请批评指正。



C 目录 CONTENTS

1. 适用范围	1
2. 术语和定义	2
3. 修复原则	3
4. 总体技术流程	4
5. 本底调查	6
5.1 调查目的	6
5.2 调查内容和方法	6
6. 问题诊断与修复适宜性评估	20
6.1 灾害问题诊断	20
6.2 牡蛎礁生态问题诊断	20
6.3 修复适宜性评估	21
7. 修复目标	22
7.1 短期目标	22
7.2 中长期目标	22
8. 修复方式	24
9. 修复措施	26
9.1 自然恢复方式的修复措施	26
9.2 人工辅助修复和重建性修复措施	29
9.3 后期管护	43

10. 跟踪监测、效果评估和适应性管理 44

10.1 跟踪监测..... 44

10.2 效果评估..... 49

10.3 适应性管理..... 50

11. 牡蛎礁修复案例 53

11.1 案例 1—美国阿拉巴马州牡蛎礁生态减灾修复项目 53

11.2 案例 2—祥云湾贝藻礁生态系统修复项目 57

11.3 案例 3—潍坊寿光市莱州湾近江牡蛎牡蛎礁修复 60

11.4 案例 4—长江口牡蛎礁修复项目 64

附录 我国沿海常见牡蛎物种及牡蛎礁分布情况 65

参考文献 70

1. 适用范围



本手册给出了牡蛎礁生态修复原则、技术流程、本底调查、问题诊断与修复适宜性评估、修复目标、修复方式、修复措施、跟踪监测、效果评估和适应性管理等内容。

本手册适用于沿海及河口退化牡蛎礁的生态修复工作。修复对象包括正在退化的牡蛎礁和历史上有牡蛎礁现在已消失殆尽的海域。



2. 术语和定义



下列术语和定义适用于本手册。

(1) 牡蛎礁 Oyster reef

由活体牡蛎和死亡牡蛎的壳堆积组成的聚集体。

(2) 牡蛎礁生态系统 Oyster reef ecosystem

栖息于牡蛎礁的生物与环境共同构成一个相互作用的整体。

(3) 对照区 Control area

为分析评估生态修复的效果，选定的与生态修复区自然环境相同或相近、且保持适当距离的区域。

(4) 参照系 Reference system

由反映生态系统特征的一系列关键指标的具体数值所构成的参照系统，能够反映某一阶段生态系统的质量。

(5) 生态修复适应性管理 Adaptive management of ecological restoration

根据修复后生态系统的监测结果，评估修复目标的实现情况及技术措施的有效性，持续性检验和修正生态修复管理决策过程，以促进生态系统正向发展的生态管理方法。

3. 修复原则



(1) 问题导向，因地制宜。科学准确识别生态问题，分析生态系统退化原因，充分论证生态修复的必要性。以生态本底和自然禀赋为基础，统筹考虑技术、时间、资金、生态影响等因素，因地制宜、分类施策。

(2) 自然恢复为主，人工修复为辅。遵循自然生态系统内在机理和演替规律，维护生态系统多样性和连通性。注重天然牡蛎礁的保护，优先开展退化牡蛎礁的修复。充分利用牡蛎礁生态系统的自然恢复能力，尽量减少人类活动的干扰；只有在自然恢复不能实现的情况下，采取适当的人工辅助措施，促进牡蛎礁生态系统实现自我调节。

(3) 统筹规划，稳步推进。修复项目应符合区域发展、国土空间规划以及用海、用岛、用地规定，避免因牡蛎礁生态修复破坏其他重要湿地，以及对航道等用途空间产生影响。充分考虑生态修复活动空间上的系统性和时间上的连续性，分步骤、分阶段进行修复工作，并开展全过程的监督、生态环境跟踪监测和适应性管理。

(4) 合理节约，风险可控。投入成本合理，在保证修复成效的前提下尽量采用成本经济的修复手段、技术和原材料。充分考虑生态修复活动与周边区域的相互影响，关注邻近社区民众的生计和受益，不宜采用无法预估实施后是否会对修复区域或周边区域造成不利影响的技术措施。

4. 总体技术流程



牡蛎礁生态修复项目实施流程如下：

- （1）在生态本底调查的基础上，掌握退化牡蛎礁及其周边区域的生态环境现状，评估牡蛎礁生态系统的退化程度，分析区域生态问题的表现形式和产生原因，识别区域生态系统受损的核心因素；
- （2）根据本底调查和牡蛎礁退化原因分析结果，进行修复项目必要性和可行性分析；
- （3）确定参照系，围绕提升牡蛎礁生态系统的主导功能、消除胁迫因素、优化区域生态格局等方面，制定生态修复的中长期目标，确定生态修复方式；
- （4）根据生态退化分析结论和生态修复目标编制方案，制定具体的修复内容和技术措施等，明确修复项目短期内实现的具体目标；
- （5）按照相关管理要求，开展项目报批、招标等手续。依据方案和设计文件，开展修复工程项目施工。施工期间，同步开展生态环境监测；
- （6）持续开展修复后跟踪监测和阶段性修复效果评估。对照生态修复目标，发现生态修复过程中的问题和风险，及时调整修正，开展基于生态系统的生态修复适应性管理。

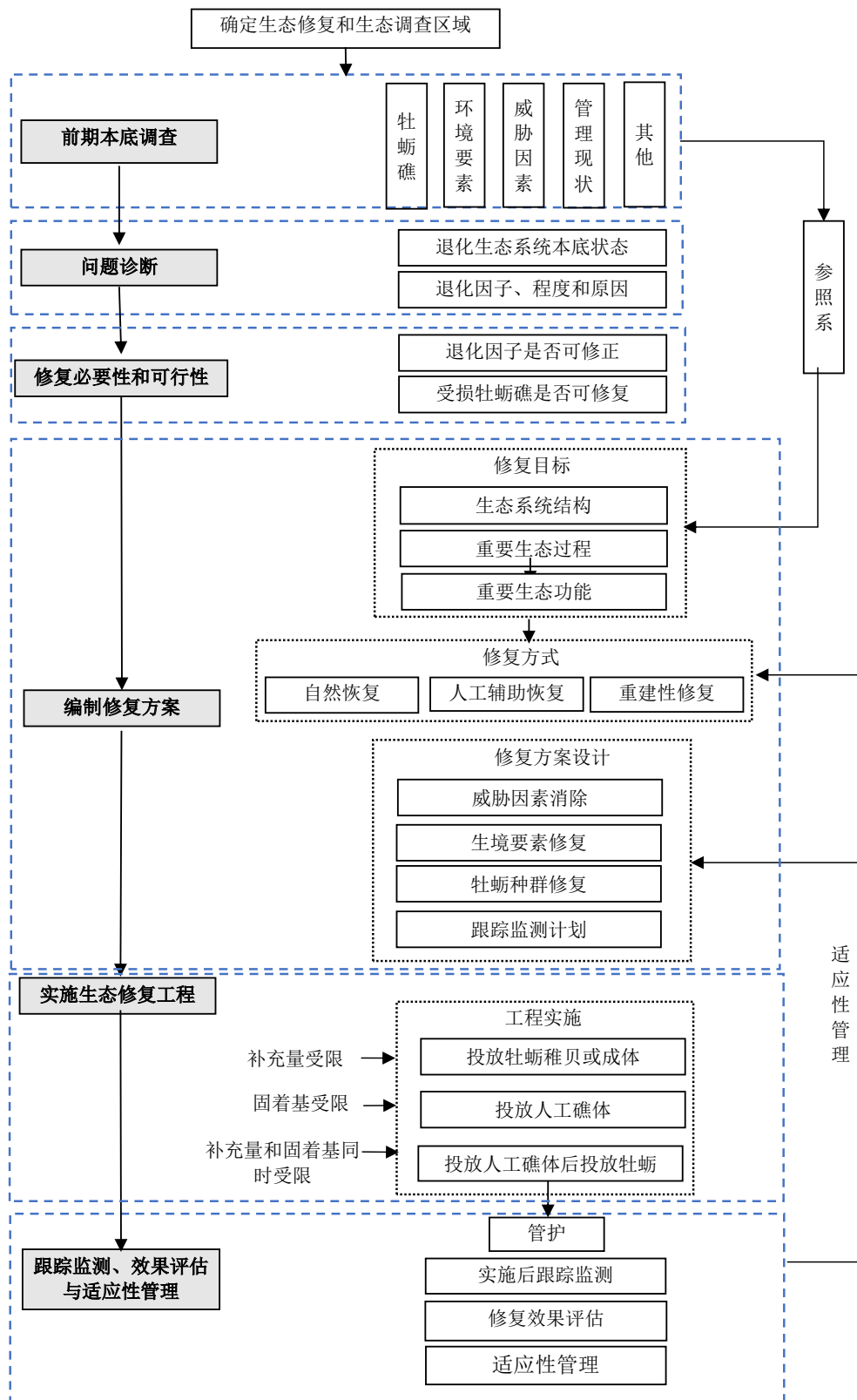


图 1 牡蛎礁生态减灾修复项目流程图

5. 本底调查



5.1 调查目的

生态本底调查的目的是掌握牡蛎礁生态系统现状，了解历史上该区域牡蛎礁的分布情况，为分析牡蛎礁退化程度、制定修复目标、确定修复方式、制定生态修复方案提供依据，同时为牡蛎礁修复效果评估提供对比数据。

5.2 调查内容和方法

5.2.1 调查范围

对于牡蛎礁生态修复区域明确的项目，本底调查区域应包括拟修复的区域及可能影响项目实施或受到项目实施影响的周边区域。

对于历史上曾有牡蛎礁或牡蛎分布或对牡蛎礁生态功能有需求但不能明确具体的修复区域时，调查区域宜涵盖牡蛎分布区域所在的河口、海湾等区域，必要时可以包括周边的河口、海湾等区域。如有可设定为参照系的牡蛎礁或对照区，调查区域应覆盖参照系和对照区所在区域。

如何设定参照系？

- a) 参照系可以是退化前的牡蛎礁生态系统。收集调查区域的历史资料，包括常规监测、专项调查、文献资料等有代表性的、能够反映生态系统变化的生态系统数据；
- b) 如退化前牡蛎礁的生态系统信息不可获取，或者不足以满足退化诊断和修复目标设定等需要，可选择周边区域具有相似生境条件的天然牡蛎礁作为参照系统；
- c) 如上述条件都不满足，则可通过文献资料和历史数据等，构建一个理想的生态系统模型。

对照区如何选择？

对照区与修复区的距离应根据修复区大小而定，以不受生态修复项目影响为宜，一般与修复区边缘的距离为 5 倍 ~10 倍修复区长度或直径。

5.2.2 调查指标

牡蛎礁作为结构性的海岸带栖息地，可有效抵抗波浪、海流、潮汐对邻近的盐沼等植被栖息地或海防设施的冲刷和侵蚀。研究显示，牡蛎礁在平均低低潮位（MLLW） $\pm 0.6\text{m}$ 范围内有短期波浪（有效波高小于 0.9m ）的海湾和河口海域，能够发挥良好的波浪消减作用^[1]。以生态减灾为目标的牡蛎礁修复项目本底调查应重点围绕牡蛎礁、环境要素、威胁因素及管理现状四方面内容进行调查分析，主要调查指标包括：

牡蛎礁：1) 牡蛎礁现状及历史分布情况：牡蛎礁斑块面积、礁区面积、礁体高度；2) 牡蛎：物种、密度、壳高、补充量与固着高峰期；

环境要素：1) 水质：水温、盐度、溶解氧、pH、悬浮物、叶绿素 a；2) 底质环境：底质类型、沉积速率、地基淤泥 / 软土深度（若为淤泥质底质类型）；3) 水动力环境：水位 / 潮位、波高、流速、流向；4) 地形：水深、坡度、受侵蚀的岸线或堤线的位置和高程；5) 风况；

威胁因素：1) 岸线侵蚀或受损情况；2) 导致牡蛎礁退化的威胁因素，如捕食者、水体污染、病害、海岸带开发、海漂垃圾等；

管理现状：1) 与修复区有关的空间规划；2) 工程区及周边海域用海情况；3) 已开展的生态保护与修复项目进展及效果。

生态本底调查通过资料收集、现场调查和社会调查的方式进行。工程区、参照系和对照区的调查应同时开展。本底调查应开展春秋两个季节调查，常规监测调查每年至少 1 次，时间宜设定在春季。牡蛎固着高峰期和补充量调查时间根据当地牡蛎种类的繁殖期安排。

5.2.3 调查方法

(1) 牡蛎礁调查

① 牡蛎礁现状及历史分布情况

反映牡蛎礁区整体状况的调查要素应包括但不限于牡蛎礁斑块面积、礁区面积、礁体高度。

【面积调查】

面积是最直观反映牡蛎礁状态的度量数据。牡蛎礁斑块面积和牡蛎礁区面积均可反映牡蛎礁分布面积。位于潮间带区域的牡蛎礁，可采用无人机航拍或全球定位系统调查牡蛎礁斑块边界；位于潮下带区域的牡蛎礁，可采用声纳结合潜水采样的方法调查牡蛎礁斑块边界。野外调查结束后，采用地理信息系统平台对野外调查的图像进行空间分析，勾绘牡蛎礁分布范围，计算牡蛎礁占地面积的总和，即为牡蛎礁斑块面积；勾绘牡蛎礁斑块外围线，计算外围线包围形成的区域面积，即为牡蛎礁区面积。

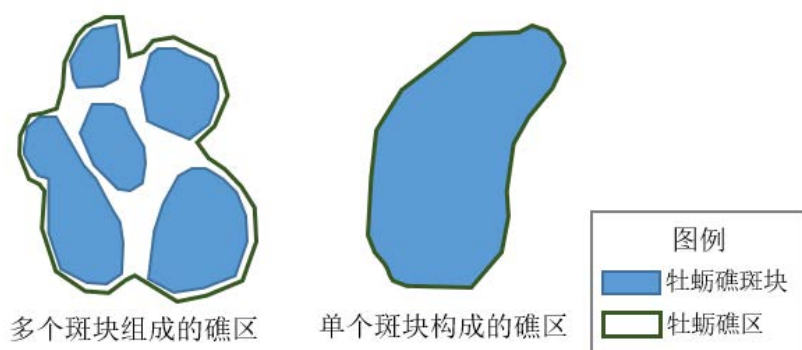


图2 牡蛎礁斑块及牡蛎礁区示意图

(图片来源：自然资源部第二海洋研究所 孙丽)

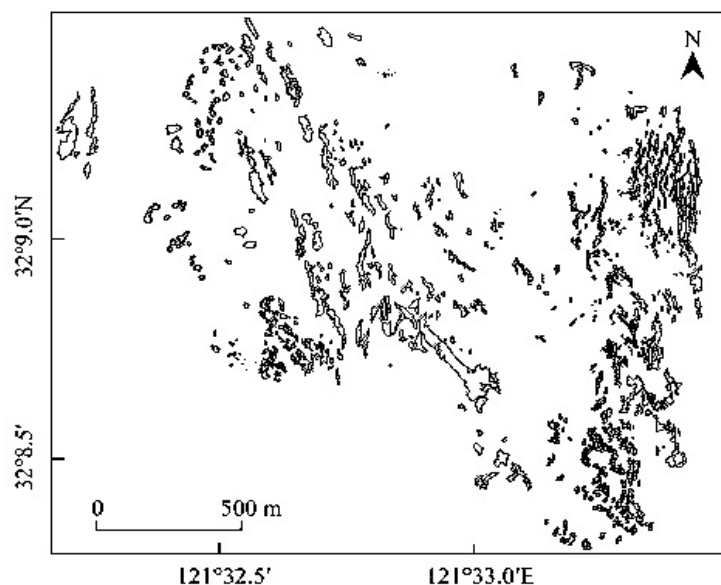


图3 无人机航拍解译的江苏海门蛎岬山潮间带牡蛎礁斑块分布图

(图片来源：中国水产科学研究院东海水产研究所 全为民)

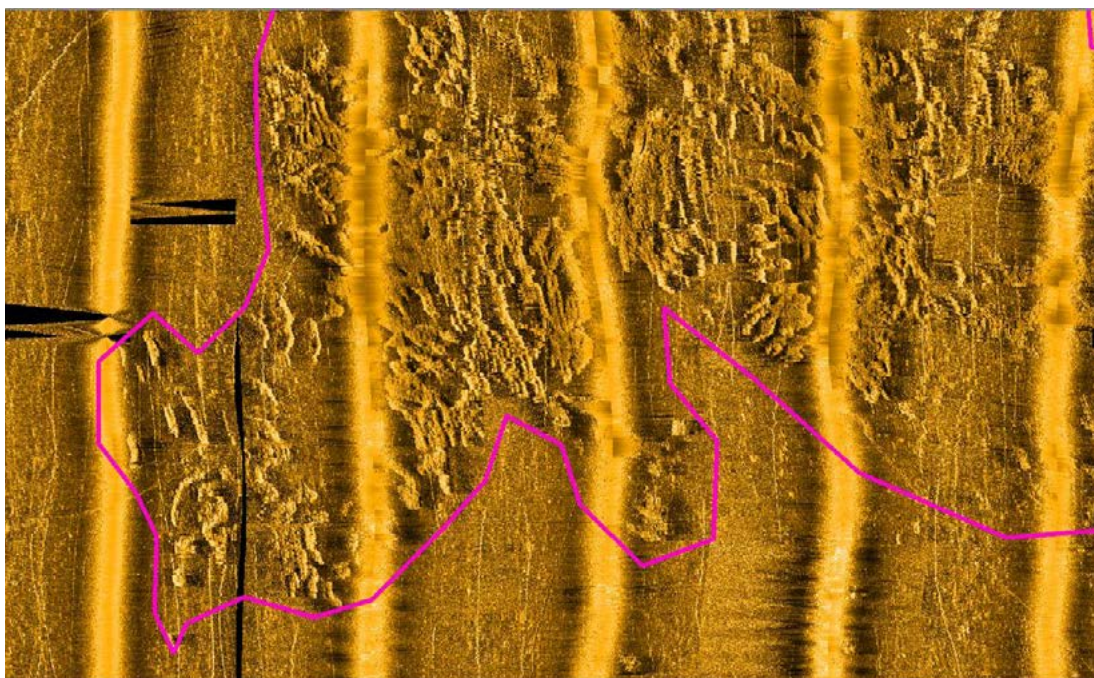


图4 采用单波束水深测量和侧扫声纳测量调查的大神堂牡蛎礁分布情况

(图片来源：自然资源部北海生态中心 张祎)

【礁体高度调查】

牡蛎礁的礁体高度为礁体相对于牡蛎固着的基质的高度，能够反映牡蛎礁年度增长情况。礁体高度的测量应沿礁脊方向或牡蛎礁长轴中心线方向进行测量，必要时可钻孔测量。

潮间带礁体可采用传统测量方法，即人工钻孔后，使用直尺测量；在人工难以调查的海域，也可采用实时动态测量、无人机数字摄影或机载激光雷达扫描等方法测量。

潮下带礁体可采用传统测量方法，即潜水钻孔后，使用直尺测量；在人工难以调查的海域，也可使用测深杆或采用单波束、多波束测深，结合浅地层剖面测量，辅以钻孔验证。

采用传统测量方法的，礁脊或礁区长轴长度大于 200 m 时，测点间隔 20 m~50 m；礁脊或礁区长轴长度不大于 200 m 时，测点间隔 5 m~10 m。

②牡蛎调查

牡蛎是牡蛎礁的主要组成物种，其生长状况与牡蛎礁总体状态密切相关。针对牡蛎的调查要素应包括但不限于物种、密度、壳高、补充量、固着高峰期。主要采用现场调查的方法获取。

牡蛎礁调查断面布设原则

- a) 布设断面时，应在空间上涵盖整个调查区域，能够反映调查区内牡蛎礁整体生态状况；
- b) 选取有代表性的地点布设断面，包括活体牡蛎礁、死亡牡蛎礁、修复的牡蛎礁分布区，能够反映调查区内牡蛎礁的不同生态状况；
- c) 断面走向宜垂直于海岸，或与环境要素（水深、盐度等）的梯度变化方向一致；
- d) 断面数量根据牡蛎礁分布面积或牡蛎礁沿海岸带分布长度确定。

牡蛎礁调查站位布设方法

- a) 根据牡蛎礁分布特征和可达性布设站位。原则上每一断面布设不少于 3 个站位；
- b) 站位设置应具有代表性。针对断面无法覆盖的牡蛎礁斑块，应单独布设站位；
- c) 确定站位后，记录各站位地理坐标，以便进行长期监测。

【物种调查】

实地调查时，每个站位取不少于 3 个 25 cm×25 cm 的样方，采集活体牡蛎带回实验室，根据牡蛎的分布区域、外部形态、内部构造结合分子手段鉴定牡蛎物种。



图 5 潮间带牡蛎礁采样（图片来源：自然资源部北海生态中心 张祎）



图6 潮下带牡蛎礁采样（图片来源：中国科学院海洋研究所 王威）

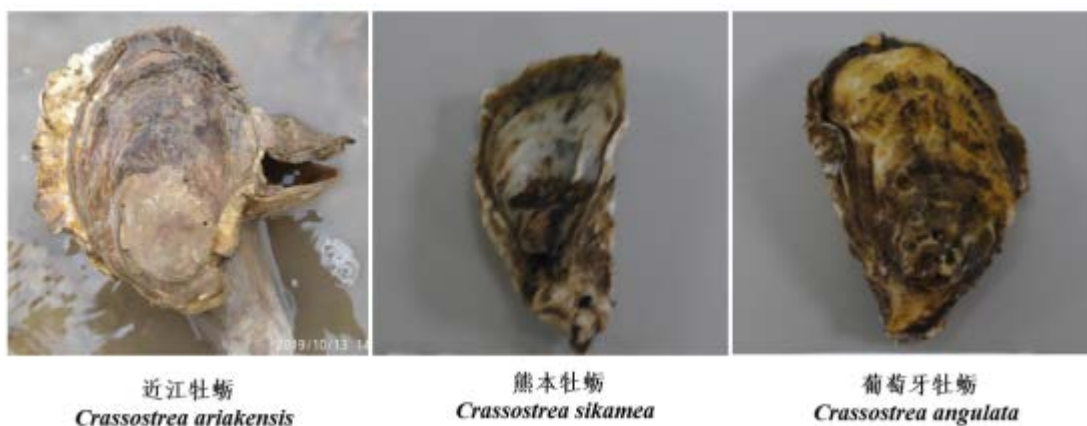


图7 三门县健跳港内3种牡蛎

（图片来源：中国水产科学研究院东海水产研究所 全为民）

【密度和补充量调查】

牡蛎密度是指单位面积内活体牡蛎的数量，可以使用物种调查采集的牡蛎样本。牡蛎补充量是指单位面积内牡蛎稚贝的数量。牡蛎补充量调查时间宜安排在牡蛎幼苗固着高峰期结束后3个月~5个月。牡蛎补充量的调查也可采用挂板调查，在牡蛎幼苗固着高峰期前挂放试板，固着高峰期结束后3个月~5个月内回收。



图8 使用定量框调查牡蛎密度（图片来源：自然资源部第二海洋研究所 孙丽）



图9 牡蛎稚贝（图片来源：自然资源部第二海洋研究所 孙丽）

【壳高调查】

大量的牡蛎壳高统计数据表现为牡蛎种群中个体大小的分布情况，能够反映牡蛎生长过程中某一阶段内种群存活或死亡情况。可以使用上述采集的牡蛎样本，使用游标卡尺分别测量每个活体牡蛎壳高，按壳高每 5mm 差值为一组，记录每组牡蛎数量，形成以壳高为横轴、每组牡蛎平均密度为纵轴的直方图。

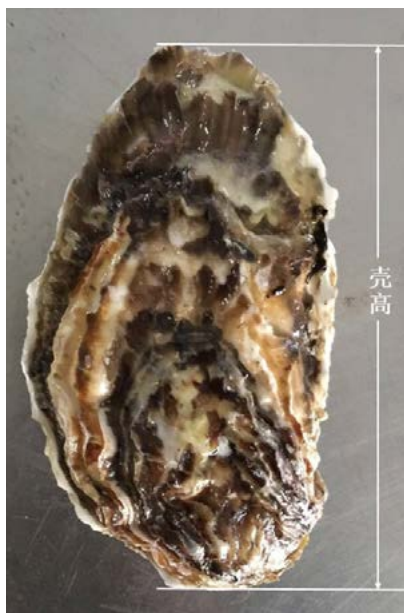


图 10 牡蛎壳高测量示意图（图片来源：自然资源部第二海洋研究所 孙丽）

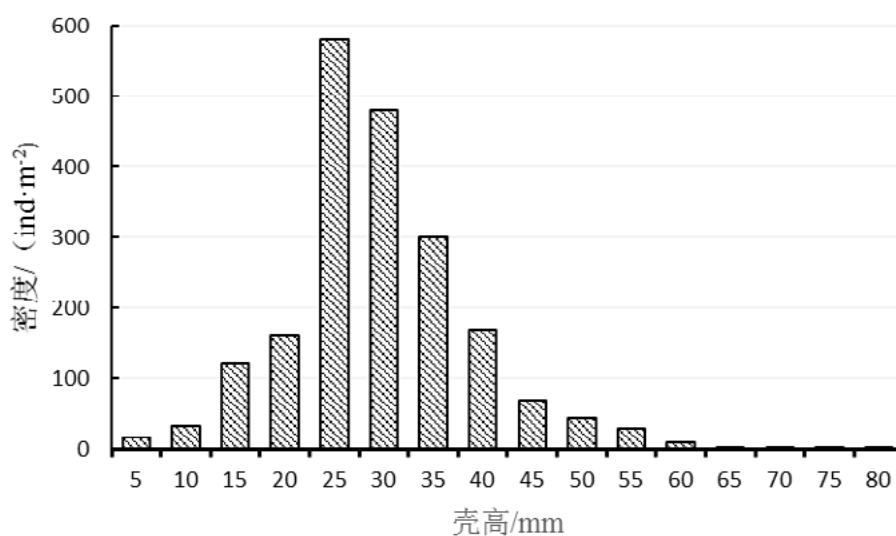


图 11 牡蛎壳高一频率分布图示例（图片来源：自然资源部第二海洋研究所 孙丽）

【固着高峰期调查】

固着高峰期调查可采用两种方法。

一种是在牡蛎繁殖季节进行牡蛎幼虫拖网调查。一般在牡蛎产卵后 5~6d 开始，在拟修复海域采集牡蛎浮游幼虫。用 25 号筛绢制作的浮游生物网，分别在中、下层水体中，每隔 1~2d 进行一次拖网取样，记录牡蛎各发育阶段浮游幼虫数量。当幼虫壳高达 $300\mu\text{m}$ 以上，眼点幼虫比例达 30% 以上时，认为牡蛎处于固着高峰期。或者牡蛎壳顶后期幼虫数量至少达到 $25\sim 60$ 个 $/\text{m}^3$ 时，可认为牡蛎处于固着高峰期。

第二种是采用挂板调查。试板可以使用石片、贝壳、粗糙的环氧酚醛玻璃布层压板等。根据资料记载或调研结果，自牡蛎繁殖期始，每隔 7 天更换挂放一组试板，记录挂板时间和编号，定期查看试板上牡蛎稚贝固着情况。以牡蛎稚贝密度最大的试板挂放时间为牡蛎固着高峰期。



图 12 挂放试板（图片来源：中国科学院海洋研究所 许飞）



图 13 贝壳试板（图片来源：自然资源部第二海洋研究所 孙丽）

(2) 环境要素

环境要素调查能够反映生境条件是否适合牡蛎生长及种群建立。环境要素的调查包括水质、底质环境、水动力环境、地形、风况等。

①水质

水质调查要素应包括但不限于水温、盐度、溶解氧、pH、悬浮物、叶绿素 a。尽量收集历史资料，掌握平均数据和极值数据。

不同牡蛎物种适应的温度范围不同，比如分布在我国北方的长牡蛎生长适宜温度为 5℃~30℃，繁殖期适宜温度为 20~26℃；而分布在我国南方的香港牡蛎生长适宜温度为 6℃~32℃，繁殖期适宜温度为 24~31℃。尽管牡蛎可通过较低的无氧代谢维持数日，但极端高温会抑制牡蛎的有氧代谢率，水温过低将严重减缓牡蛎个体生长速率。

不同牡蛎物种适应的盐度范围也有所不同，比如密鳞牡蛎适宜生活在 25~34 的高盐度

海区，近江牡蛎、香港牡蛎等适宜生活在偏低盐度海区。尽管有些牡蛎物种短时间内可耐受高盐或低盐环境，但长时间高盐或低盐环境会影响牡蛎的抗病性和存活率。

溶解氧通常是潮下带牡蛎的生长限制因子。在水深过大的区域，可能会发生低氧和缺氧的情况，导致牡蛎死亡。

牡蛎是典型的钙化生物。若海水 pH 值过低，会导致牡蛎钙化速率降低，牡蛎幼虫发育异常或者死亡。

牡蛎是滤食性贝类，通过过滤水体中的悬浮颗粒进食。若水体中泥沙含量过高，会引起牡蛎窒息死亡。

叶绿素 a 是浮游植物中的一种重要色素，其含量可反应水体中的藻类生物量。牡蛎以微小藻类和有机碎屑为食，水体中藻类生物量太低可能导致牡蛎摄食不足，藻类生物量太高可能导致水体富营养化。

②底质环境

底质环境调查要素应包括但不限于底质类型、沉积速率、地基淤泥 / 软土深度。底质类型和地基淤泥 / 软土深度通过现场调查获取，沉积速率以收集资料为主。

底质类型分为硬相底质（岩石、生物礁体、混凝土等）和软相底质（泥滩、泥沙滩、沙滩等）。根据底质类型可以初步判断调查区域是否缺乏固着基，是否适宜构建人工礁体，以及判断适合作为固着基的人工礁体类型。

沉积速率以年为单位，统计海洋沉积物每年在单位面积上堆积的厚度。若现场调查，应均匀布设测量点，测量底质一年时间内的淤积厚度。根据沉积速率可以初步判断是否适宜建设牡蛎礁，以及人工礁体的设计重量。一般不建议在沉积速率高的区域开展牡蛎礁修复工程。

地基淤泥 / 软土深度调查采用钻孔调查方法。

③水动力环境

水动力环境调查要素应包括但不限于水位、波高、流速、流向，采用现场调查和资料收集相结合的方法。开展牡蛎礁减灾功能的修复项目可行性评估与方案设计需要掌握拟修复区的水位和波高。

水位影响牡蛎出露水面的时间，是影响河口区潮间带牡蛎礁生长的主要因素之一。

水位调查数据可以为人工礁体的投放位置和设计高度提供参考。牡蛎露空时间以不超过 4 小时为宜。

波高将严重影响人工礁体的稳定性。一次风暴潮极有可能导致牡蛎礁整体倾斜，甚至倒塌。

流速和流向对处于固着期的牡蛎幼虫影响很大。牡蛎幼虫的游泳能力很弱，主要随海水浮游。当发育到一定程度，幼虫会选择硬性的固着基进行固着和变态。若此时流速过大，牡蛎幼虫将难以固着。

④地形

地形调查包括但不限于水深、坡度、受侵蚀的岸线或堤线的位置和高程，是为牡蛎礁生态修复前的设计阶段提供参考。

⑤风况

风况调查以资料收集为主，现场调查为辅。

(3) 威胁因素

通过威胁因素调查，一是可以分析岸线侵蚀或受损的原因；二是可初步分析牡蛎礁退化，并判定是否适合开展牡蛎礁生态修复。

①岸线侵蚀或受损威胁因素

海平面上升会导致海岸侵蚀后退，但影响力相对较小。

波浪作用对海岸的冲击是导致海岸侵蚀的重要因素。

潮流运动可使悬移物质向其他地点运输，从而导致海岸侵蚀。

风暴潮引起增水，在大浪作用下会加剧海岸侵蚀。

生物的新陈代谢和繁殖会对海岸的岩石产生破坏力，从而导致海岸侵蚀。

人为因素包括不合理的海岸工程、采砂活动、入海河流上游水利工程等。

②牡蛎礁退化威胁因素

威胁因素包括自然因素和人为因素。

自然因素调查主要有捕食者、竞争者、牡蛎病害、牡蛎入侵物种等。

捕食牡蛎的生物有黑鲷、鲹鱼、鲱鱼、梭鱼等鱼类，红螺、荔枝螺、玉螺等肉食性螺类，海燕、海盘车等棘皮动物，拟穴青蟹、锯缘青蟹等甲壳动物，蛎鹬等鸟类。

牡蛎的竞争者有藤壶、紫贻贝、突壳肌蛤、海鞘、薺枝虫、苔藓虫等生物。

牡蛎病害有很多种，有些病害会导致牡蛎种群的大量死亡。凿贝才女虫、凿穴蛤、穿贝海绵等穿穴生物可穿破牡蛎壳，穴居其中，引起细菌性疾病的发生，也可在壳顶部集中穿穴，使牡蛎从礁体脱落。常见的牡蛎病害有包拉米虫病、马尔太虫病、海水派金虫病、疱疹病毒、吸虫等。

牡蛎入侵物种是指威胁牡蛎礁生态系统稳定的牡蛎外来入侵物种，通常是由于附近的牡蛎养殖引入。

人为因素调查包括捕捞、滤食性贝类养殖、海洋工程、污染排放。捕捞和海洋工程是导致我国天然牡蛎资源锐减的最主要原因。受经济利益驱使，牡蛎捕捞方式从人工潜水采摘转向大规模底拖网捕捞，对沿海牡蛎礁造成严重破坏。海洋工程侵占沿海牡蛎生存空间，引起的沿海滩涂淤积导致牡蛎生境改变，造成天然牡蛎礁生态系统退化。



图 14 采挖后的牡蛎壳（图片来源：自然资源部第二海洋研究所 孙丽）

(4) 保护、管理和利用现状

区域保护、管理和利用现状调查方法包括：资料收集、现场调研、采样调查、座谈和问卷调查等。采用资料收集的调查内容，应涵盖市级和县级行政单元的信息。

调查内容包括但不限于以下内容：

拟修复区及周边区域的相关规划，包括国土空间规划、区域发展规划、生态保护红线等。

拟修复区的权属情况、行政管理部门、牡蛎礁生态修复潜在的社会影响（风险）和利益相关者。

拟修复区的保护管理现状，包括保护区范围及管理情况、已实施的修复项目情况等。

对于修复面积较大的项目，宜了解区域范围内或周边地区的礁体材料、成体牡蛎和稚贝的供应能力。如岩石、贝壳的来源及供应量等，成体牡蛎物种、数量、规格、价格等，育苗场对稚贝的供应量或附苗能力等。



6. 问题诊断与修复适宜性评估



6.1 灾害问题诊断

根据海岸侵蚀或受损情况，分析灾害问题产生的原因，以及是否能够通过实施牡蛎礁生态修复工程改变海岸侵蚀状态。

6.2 牡蛎礁生态问题诊断

在生态本底调查的基础上，分析退化牡蛎礁和参照系的状态，包括牡蛎礁健康状况、生物群落和生境条件的状态，条件允许时还可分析牡蛎礁重要生态过程和功能的状态。

以参照系或设定目标值为基准值，对牡蛎礁斑块面积变化、牡蛎礁礁体高度变化、牡蛎密度变化各站位平均值、牡蛎补充量变化各站位平均值进行赋值，评估牡蛎礁健康状况。对除牡蛎外的其他要素进行单要素评估或定性评价，评估牡蛎礁是否退化以及退化程度，判别退化因子。具体评估方法参照 HY/T 0460.7-2024。

比较同一礁区各项生物要素、水文要素、水体化学要素、威胁因素在本底调查时和跟踪调查时的异同，分析导致牡蛎礁退化的原因，退化因子是否有必要通过修复措施恢复。明确退化牡蛎礁的修复目标，针对目标确定需要开展修复的要素（可以是某一生境因子、生物因子，或生态过程等）。

常见的牡蛎礁退化情形

- a) 海洋工程直接侵占牡蛎生存空间；
- b) 岸滩淤积造成牡蛎栖息地消失；
- c) 水文条件变化，影响牡蛎幼虫固着，牡蛎礁缺乏幼苗补充，牡蛎礁逐渐老化、消失；
- d) 过度采捕导致牡蛎种群数量严重减少，难以成礁；
- e) 底拖网破坏潮下带牡蛎礁体，导致牡蛎斑块碎片化；
- f) 水体泥沙含量高、水体缺氧等环境变化导致牡蛎死亡；
- g) 气候变化引起海水温度、盐度、酸碱度变化，影响牡蛎生长发育，牡蛎礁生态系统退化；
- h) 寄生虫、疾病、细菌和病毒等造成牡蛎繁殖能力低，甚至死亡。

6.3 修复适宜性评估

根据问题诊断的结果，开展牡蛎礁生态减灾修复适宜性评估，评估分析内容主要包括——

牡蛎礁受损机理分析：包括牡蛎礁生态受损情况、岸滩淤积、周边人类活动、海洋工程影响、水质污染等；

政策规划适宜性分析：牡蛎礁修复选址应符合但不限于政策法规、海洋功能区划、海域使用规划、国土空间规划、城市建设规划等政策规划要求。

水文环境适宜性分析：采用现场调查和数值模拟等手段，分析修复区及其周边海域的温度、盐度、波浪、潮汐、海流等水文水动力条件对牡蛎礁生长的潜在影响，研判修复的适宜性。

地形地貌适宜性分析：分析修复区是否具备，或通过人工措施形成适宜牡蛎礁生长的地形地貌环境；

水质底质环境适宜性分析：分析修复区水质条件、沉积物等是否满足修复需求，分析修复施工对后续牡蛎礁生态系统演化的影响。

7. 修复目标



根据项目的主要目的（比如减轻海岸带侵蚀、提升湾区水质等）和主要利益相关者的期望（比如经济就业机会、景观的美观度、符合地方文化等）制定相应的修复目标。生态修复目标是生态修复内容、技术措施设定和选择的依据，也是评价生态修复是否成功的标准。

以生态减灾为目的的牡蛎礁修复项目，在制定目标时需要从两个方面进行考虑：一方面从牡蛎礁生长的生态属性考虑建立可持续的种群，另一方面需要从减灾防灾的角度考虑所构建的牡蛎礁在缓流、消浪和促淤方面能够发挥最优作用。

7.1 短期目标

短期评估监测指标反映在修复项目实施期限内或者修复后的初期，被修复的具体对象 / 生态系统要素预期达到的水平。修复项目短期指标的实现期限以 2~5 年为宜。具体指标可结合工程实施的具体内容进行设定，考虑以下内容：

牡蛎种群的增殖：牡蛎礁斑块面积、礁区面积、礁体高度、牡蛎密度、牡蛎补充量、成体牡蛎比例等；

防灾减灾能力：波浪衰减程度；

水质改善：悬浮物浓度、无机氮等；

提高生物多样性：底栖生物、微生物、鱼卵、仔稚鱼等；

威胁因素的消除：捕捞量控制、污染物排放、固着基数量 / 面积、病虫害、捕食者和竞争者数量控制、海漂垃圾的数量和影响程度等。

7.2 中长期目标

设定中长期评估监测指标时，生物和自然环境因子可设定为 10 年，生态过程和生态功能的恢复以 20 年为宜。中长期评估监测指标的设定可参考以下内容：

防灾减灾能力：波浪衰减程度、海岸高程、岸线侵蚀速率、沉积速率等；

生物群落的恢复：底栖生物、微生物、鱼卵、仔稚鱼等；

重要生态过程的恢复：初级生产、生态系统稳定性、牡蛎更新、与周边水体环境的生物和化学物质交换等。



8. 修复方式



牡蛎礁生态修复的方式包括自然恢复、人工辅助修复和重建性修复三种类型。

自然恢复。区域内分布大量适合牡蛎固着生长的固着基，且牡蛎补充量充足，但由于过度捕捞、污染、捕食者和竞争者等原因导致牡蛎生态系统退化。上述情况下，如果牡蛎礁退化程度相对较轻，可通过强化捕捞管理、控制陆源污染、加大牡蛎捕食者和竞争者的捕捞力度等管理措施，消除引起牡蛎礁退化的干扰因素（消除威胁因素的具体措施见 9.1）。在去除外界压力或干扰后，牡蛎礁可通过自然再生实现自我修复，不需要实施人工修复措施。

人工辅助修复。水文及生态环境适宜牡蛎生长、有足够的牡蛎补充量，但缺乏可供牡蛎固着生长的固着基的环境称为固着基受限环境；水文及生态环境适宜牡蛎生长且分布大量适合牡蛎固着生长的固着基，但牡蛎补充量低的环境称为补充量受限环境。在水文及生态环境适宜的区域，牡蛎种群数量严重下降，主要原因一般是补充量受限或固着基受限。在补充量受限的情况下，通过人工辅助的措施，在现有礁体结构上补充成体牡蛎或稚贝，提高牡蛎种群数量；在固着基受限的情况下，通过补充硬相底质材料，为牡蛎提供可固着变态的基质，促进牡蛎礁生态系统的自然恢复（具体措施见 9.2）。

重建性修复。当补充量和固着基同时受限时，通常牡蛎礁退化比较严重，需要进行重建性修复，即不仅要消除引起退化的干扰因素，还需要在可行的情况下重建出能够可持续繁殖生长的牡蛎种群。在开展牡蛎礁生态修复时，应格外慎重对待重建性修复工程。对于拟修复区内及附近海域历史上和当前时期无牡蛎分布的区域，原则上不建议开展重建性修复工作。如拟修复区内及附近海域历史上曾经有牡蛎，当前时期无牡蛎分布的区域，应对修复的必要性和可行性进行严格论证后，方可实施重建性修复。重建性修复需要先投放硬相底质材料，再人工补充成体牡蛎或稚贝。

表 1 修复方式选择

退化原因	退化程度	自然再生能力	限制条件	修复方式	修复措施
过度捕捞、污染、捕食者和竞争者过多	低	完好	水文及生态环境适宜，牡蛎补充量充足	自然恢复	消除威胁因素
缺乏固着基	偏高	弱	水文及生态环境适宜牡蛎生长、有足够的牡蛎补充量	人工辅助修复	消除威胁因素，构建人工礁体
牡蛎补充量不足	偏高	弱	水文及生态环境适宜牡蛎生长、分布大量适合牡蛎固着生长的固着基	人工辅助修复	补充牡蛎
存在严重的威胁因素或生境条件发生改变	严重退化	弱或完全丧失	历史上该区域有牡蛎生长	重建性修复	消除威胁因素，先构建人工礁体，再补充牡蛎



9. 修复措施



9.1 自然恢复方式的修复措施

通过自然恢复的方式进行牡蛎礁修复，主要针对因自然或人为威胁因素影响牡蛎礁受到损害的情况，需消除威胁因素。牡蛎礁的人为威胁因素包括过度捕捞、水体污染等，自然威胁因素有非生物的危害、生物敌害、牡蛎疾病等。

(1) 人为威胁因素的消除措施

过度捕捞对牡蛎礁造成威胁的，应采取对应的限制保护措施，包括限制采捕区、限制采捕规格、限制采捕量等；同时，加强对赶海群众、底拖网渔船等的管理，尽量减少人类活动的干扰，充分利用牡蛎礁生态系统的自然恢复能力，实现牡蛎礁生态系统的自我调节。温州市龙港市为营造适宜贝类生长的生境，在潮间带区域投放了石块、混凝土等贝类附着基质。退潮时，礁体出露水面，礁体上固着的牡蛎易被采挖。为保护修复的牡蛎礁，当地管理部门设置了警示标语，提醒群众保护牡蛎生境。

水体污染对牡蛎礁造成威胁的，应分析污染源的基本情况。一般海区应严控入海污染物总量，生态保护海区应禁止入海污染物排放。



龙港市修复的牡蛎礁



部分牡蛎被采挖



图 15 龙港市设标禁止采挖牡蛎（图片来源：自然资源部第二海洋研究所 孙丽）

（2）自然威胁因素的消除措施

①非生物因素威胁的消除措施

盐度 牡蛎是渗透压随变者，体内渗透压会随着周围海水盐度的变化而变化，不同种类牡蛎对盐度的耐受范围不同，当渗透压的变化超过自身调节最大限度，就会出现大量死亡现象。长牡蛎（*Crassostrea gigas*）是广盐分布种，能够在盐度 10~37 的海区栖息，最适盐度范围是 20~32；近江牡蛎（*Crassostrea ariakensis*）能够在盐度 6~33 的海区栖息，最适盐度范围是 10~30；香港牡蛎（*Crassostrea hongkongensis*）能够在盐度 3~20 的海区栖息；福建牡蛎（*Crassostrea angulata*）最适盐度范围是 20~30；熊本牡蛎（*Crassostrea sikamea*）能够在盐度 15~25 的海区栖息，适宜生长盐度为 20~25。盐度骤变对牡蛎的影响难以消除，但在构建礁体或（和）投放牡蛎时，需要在盐度适宜牡蛎生长的海区开展。

温度 牡蛎对温度的抵抗力较强，但分布于南方的熊本牡蛎等位于潮间带的牡蛎在夏

季往往因烈日暴晒而死，特别是刚固着不久的稚贝受害更为严重。北方位于潮间带的牡蛎则易因冬季温度过低而死亡。温度对牡蛎的影响难以消除，因此在牡蛎礁生态修复工程设计时，应充分考虑当地的温度和修复区的潮位，避免牡蛎礁长时间露出水面。

巨浪 台风引起的巨浪对牡蛎礁破坏严重。一方面，巨浪可能把潮间带附近的牡蛎连同固着基一起推倒；另一方面，巨浪搅动海底浮泥，会引起牡蛎窒息死亡。位于潮间带的牡蛎礁受台风影响更大，在台风来临前可操作的预防措施较少，在台风过后应立即对牡蛎礁进行抢救整理，清除杂物，扶正礁体，避免牡蛎被浮泥埋没。

②生物因素威胁的消除措施

生物因素的威胁主要依靠人工捕捞或铲除。

海洋经济物种 牡蛎的敌害生物中，河豚、鲷类、黑鲷、海鲫等肉食性鱼类和红螺、荔枝螺、玉螺等肉食性腹足类以及锯缘青蟹等甲壳类海洋生物都有经济价值，可采用围网或诱捕等方式进行人工捕捞。

附着生物 藤壶、不等蛤等与牡蛎处于同一生态位的附着生物会和牡蛎争夺固着基和食料，影响牡蛎的固着和生长。因藤壶的繁殖季节一般比牡蛎早，需要掌握好投放固着基和采苗的时间，避开其他竞争性附着生物的繁殖高峰期。不同海区不同种类的藤壶繁殖时间不同，如浙江南麂列岛的网纹藤壶繁殖盛期是7、8月；泥藤壶比网纹藤壶大约早一个月，在吕泗洋的附着期是6~10月，在泉州湾是4~10月；主要分布于浙江沿岸的三角藤壶附着期是6~10月，盛期是8月^[2]。此外，一般在平均低潮面下15~65cm处牡蛎固着量多，藤壶附着量少，投放固着基和采苗时应注意选址区潮位。

(3) 牡蛎疾病

牡蛎的疾病种类很多，有病毒性疾病、细菌性疾病、真菌性疾病，以及马尔太虫、派金虫等原生动物引起的疾病，蠕虫、寄生甲壳类等引起的疾病。对于生态修复的牡蛎礁来说，目前尚无有效治疗方法。

有些疾病在环境改变时能自行停止对牡蛎的侵害，比如疱疹型病毒病多发于水温高的海区，当海水温度降至12℃~18℃时，患病牡蛎就可能停止感染和死亡；患单孢子虫病的牡蛎在高盐度区的死亡率为90%~95%，在低盐度区的死亡率为50%~70%；患派金虫病的牡蛎在盐度15以下，或水温低于20℃时，一般不会死亡^[3]。有些疾病不足以引起牡蛎死亡，牡蛎可以带病生存。

牡蛎疾病的预防措施

- a) 在牡蛎固着生长前将固着基彻底清刷干净，将患病的老牡蛎壳完全除掉；
- b) 牡蛎生长到适当大小时，可定期安排适量收获；
- c) 避免使用已感染的牡蛎作为亲贝。

9.2 人工辅助修复和重建性修复措施

采用人工辅助方式或重建性方式进行牡蛎礁生态修复前，应先消除引起牡蛎礁退化的威胁因素。对于固着基受限环境，需要构建人工牡蛎礁体，为牡蛎幼虫提供可固着变态的硬质结构。对于补充量受限环境，需要补充牡蛎成体或稚贝。

9.2.1 构建人工礁体

9.2.1.1 修复区选址

牡蛎礁生态修复项目的选址直接影响修复成效。在大尺度上，修复区宜选择在波浪（浪高小于 0.9m）期短的河口、海湾区域，不适宜选择在开放海域或大型波浪频发的区域。

修复区选址时需考虑牡蛎分布、水温、盐度、溶解氧、pH 值、水动力、地形、沉积速率、底质类型、牡蛎饵料等影响因素。其中，溶解氧要在连续 24h 中，16h 以上大于 5mg/L，其余任何时候不低于 3mg/L；pH 值范围在 7.8~8.5 之间；水动力要在潮流通畅，无漩涡流、对撞流，牡蛎固着高峰期平均流速不大于 60cm/s 的环境中；地形要平缓，坡度小于 5°；沉积速率小于牡蛎礁体高度增长速率，以冲淤平衡或微冲刷环境为宜，浮游植物应供应充足。

底质选择较硬、泥沙淤积少的底质，避开淤泥较深的软泥底和流速大的细沙底。底质强度以能够支撑人行走为宜；也可选择软泥厚度不超过 0.3m 的泥质底质；有研究表明卵石底质和泥质底质对活体牡蛎的丰度并无显著性差异^[4]；

完成选址后，还应进一步确定修复区范围。不同牡蛎物种适宜生长的水深要求不同。根据牡蛎物种确定的潮间带牡蛎礁修复区宜选择于平均海平面和平均最低潮位之间的区域，潮下带牡蛎礁修复区宜选择于平均海平面至以下 10m 水深的区域。在确定修复范围时，应尽量适当增加斑块数量，在增加海水流通通道的同时防止礁体造成淤积。

9.2.1.2 修复方案设计

修复方案设计时需同时考虑生态目标和防灾减灾目标，既要满足牡蛎生长的基本条件，如潮位和固着底质，也要根据减灾需求设计礁体被淹没水位、礁高和礁宽。牡蛎礁修复方案设计分别从生态和项目目标角度应考虑的因素见下表。

表 2 以生态减灾为目标的牡蛎礁修复方案需要考虑的重要设计标准^[5]

设计因素	生态角度 (形成自我持续生长的牡蛎礁)	工程角度 (消减波浪、积聚沉积物)	生态与工程的互作角度
修复后的礁体位置	提供幼苗补充 - 补充量与时间 栖息环境适宜 - 盐度、水动力等 支持种群长期生长	减少沉积物横向运输 消减波浪	牡蛎生长 (如: 密度、大小) 对波浪和沉积物运输的影响 波浪能对牡蛎长期存活的影响 (如幼苗补充、牡蛎存活与牡蛎死亡) 沉积物积聚对牡蛎固着与存活的影响
礁体材料	供牡蛎幼苗固着 躲避捕食者	礁体结构的稳固与完整性	波浪引起的湍流对牡蛎幼苗固着的影响 不同的礁体表面的复杂性或粗糙度如何改变上述影响
礁体长度	礁体斑块大小与形状 - 影响幼苗补充 (如边缘效应)	增强沿岸流	牡蛎生长 (如: 密度、大小) 对水流的影响
礁体宽度	礁体斑块的空间布局 - 影响幼苗补充与存活 (如边缘效应对幼苗固着和食物的影响)	以消减波浪为目的的礁体宽度与入射波长间的计算关系	礁体边缘效应 (如增长速度) 对牡蛎生长和种群长期存活的影响 (如幼苗补充、牡蛎存活与牡蛎死亡)
礁体高度	适宜牡蛎固着、生长和存活的潮区和深度	破浪 波浪增水	牡蛎种群生长与破浪、波浪增水随时间的影响变化

(1) 生态减灾布局设计

以消浪减灾为目的的牡蛎礁布局，通常以线型或曲线型的方式沿自然环境水深等深线排布。针对预期保护海岸长度目标，应对修复区所在地的风暴潮（约 2~10 年一遇）进行波浪数值模拟，分析波浪的衰减程度，预测不同长度牡蛎礁布局对海岸的影响，确定需要布置的牡蛎礁长度。在条件允许的情况下，牡蛎礁排布方向应根据数字模型或物理模型模拟结果，最大发挥牡蛎礁阻滞水流、消耗海浪能量的作用。

(2) 牡蛎礁修复工程位置设计

牡蛎礁在消浪弱流、防止岸线侵蚀方面发挥着重要作用。牡蛎礁生态减灾的原理是，当礁体淹没或部分淹没于水下时，波浪从深海向近岸牡蛎礁传播过程中受到水深急剧变化和底床摩擦的影响，发生浅化、破碎和沿礁衰减；海岸带的沉积物则因波浪能的减弱而减少冲刷与转运，减轻沉积物流失；减缓的水流还能促进水体中悬浮颗粒物在礁体向岸侧的沉降，从而减缓岸线后退与海滩下蚀速度。以生态减灾为目的的牡蛎礁修复地点的潮区设置需要兼顾工程目的（即耗散波浪能、稳固沉积物）与生态目的（即适宜牡蛎种群生长）的双重考量，才能使牡蛎礁最大限度地长期发挥岸线防护功能，且兼具生物多样性提升等多重效益。我国的造礁牡蛎（熊本牡蛎除外）大多生长在平均较低低潮位附近，因此，以生态减灾为目的的牡蛎礁修复工程一般应设置于低潮间带至中潮间带。对于以潮下带造礁牡蛎物种为修复对象的生态减灾修复项目，可结合当地水深、波高、地形等条件，通过数学模型或物理模型的方式评估潮下带牡蛎礁修复具有减浪功能的可行性。

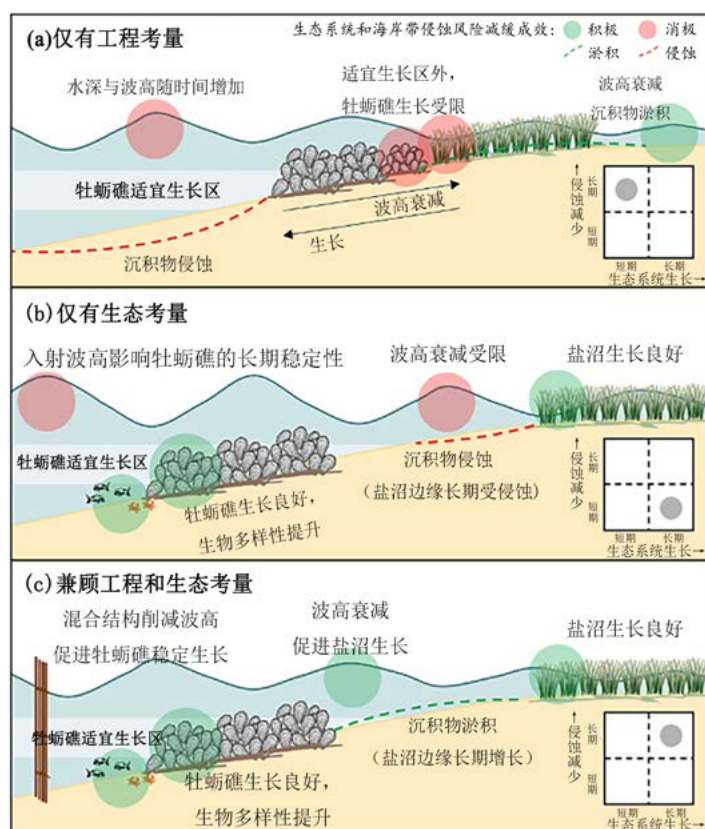


图 16 以减少岸线侵蚀与促进盐沼生长为目的的牡蛎礁修复示意图^[6] (a) 仅有工程考量的修复成效局限性；(b) 仅有生态考量的修复成效局限性；(c) 兼顾工程与生态考量的修复成效潜力最大化。

(图片基于《Restoring estuarine ecosystems using nature-based solutions: Towards an integrated eco-engineering design guideline》进行翻译, Dunlop et al. 2023)

以鱼类增殖功能为目标的修复工程，宜将礁体建造于潮下带，构造出复杂的三维结构，为海洋生物提供栖息空间。

以提升水质功能为目标的修复工程，宜将礁体建造于潮下带，大面积均匀分散布设，尽量延长牡蛎的滤水时间。

（3）礁体材料选择

以松散的牡蛎壳构建的礁体容易在水流快、波浪能高的环境中失去结构完整性和稳固性，从而影响牡蛎幼苗补充、牡蛎种群生长以及礁体结构增长。以生态减灾功能为目的的修复，礁体宜使用石头、混凝土块等沉重材料，同时应结合现场底质情况，考虑礁体下陷程度。

（4）礁体尺寸设计

以生态减灾为目标的礁体尺寸设计，需要在适宜牡蛎种群长期生长的前提下，基于当地的波高、水深、水底坡度、底质沉降等水动力、地形和底质特征，从生态和工程角度来设计礁体的长度、高度与宽度。通常，礁体顶部与水位间的深度（即礁体淹没深度）与减浪效果呈负相关^[7、8]，礁顶宽度与减浪效果呈正相关^[9]。有研究表明，设计牡蛎礁顶部距平均海平面以下 0.3~0.5m，当水深 0.5~1.0m 时，波高平均降低 30~50%；当水深 1.0~1.5m 时，波高平均降低 0~20%；水深大于 1.5m 时，波高平均降低 < 10%^[10]。对于淤泥质的底质环境，礁体高度的设计还应考虑礁体的沉降。另外，随着牡蛎礁的生长发育，礁体的大小、牡蛎密度、表面粗糙度等形态发生改变，与水动力和沉积物运输间的相互影响程度也将发生变化，需强化后期监测和减灾效果研究。

（5）生态减灾功能最大化设计

为最大化发挥牡蛎礁的生态减灾功能，在实际生态减灾修复工程中，通常与红树林、盐沼植物、海草床等其他海岸带典型生态系统修复一起，共同构建综合的海岸带生态减灾体系。如利用牡蛎礁的消浪功能支持红树林的早期生长发育；在近岸和离岸环境中，利用海草床和牡蛎礁结合的方式抵御海浪侵袭。

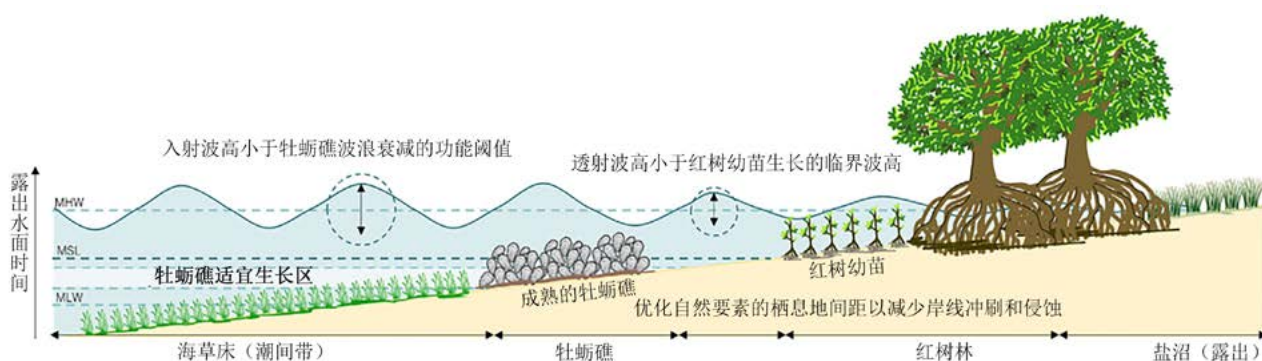


图 17 利用牡蛎礁的消浪功能支持红树林早期生长发育^[6]

(图片基于《Restoring estuarine ecosystems using nature-based solutions: Towards an integrated eco-engineering design guideline》进行翻译, Dunlop et al. 2023)

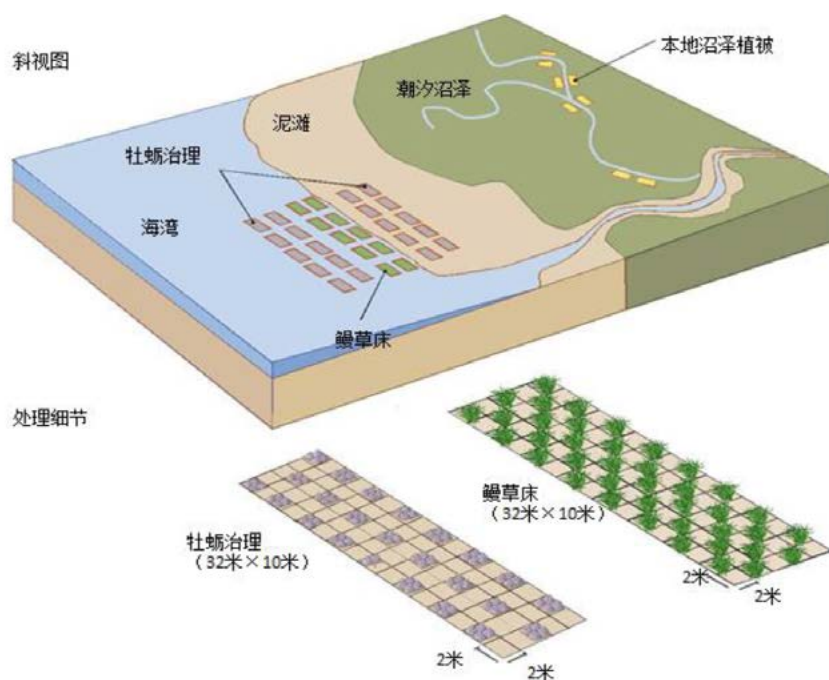


图 18 牡蛎礁（近岸型 + 离岸型）配合鳗草床对海岸保护效果模式图^[11]

(布拉德·埃文斯 / 环境科学协会, 引自《Natural Shoreline Infrastructure: Technical Guidance for the California Coast》)

复合型海岸带生态减灾体系不仅在减灾功能上有叠加效应, 与牡蛎礁相邻的海草(藻)场或盐沼湿地还可为牡蛎提供足够的食物碎屑。研究发现, 与孤立泥滩上的牡蛎礁相比, 靠近海草(藻)场的牡蛎礁贝类固着率更高, 修复效果更显著。海草(藻)场还能为螃蟹等生物在牡蛎礁和盐沼之间移动提供了一条安全廊道, 为牡蛎礁的生态系统稳定提供保障。

9.2.1.3 施工前的准备工作

(1) 编制牡蛎礁生态减灾修复实施方案

- a) 实施方案应遵循区域空间规划、海岸带保护与利用规划、流域综合规划、防潮（洪）专业规划等相关规划，符合生态红线保护和海岸线管控等要求；
- b) 实施方案应充分考虑海陆生态系统连通性、完整性和生态缓冲作用等因素，根据空间划分以及不同海岸类型，结合适宜性评价结果，因地制宜地提出牡蛎礁生态减灾修复工程的空间布局方式；
- c) 实施方案设计应注重发挥生态和减灾综合效益，避免因工程建设造成空间资源消耗，产生新的生态环境问题；
- d) 实施方案设计应细化具体措施的技术要求、建设方法、范围尺度等内容；
- e) 实施方案应从经济、社会、环境等方面进行全面分析论证，作为工程建设的主要内容，其深度达到工程可行性研究报告的要求；

(2) 修复项目环境影响评价

根据《建设项目环境影响评价分类管理名录（2021 版）》的要求，海洋生态修复工程应依要求开展环境影响评价。

表 3 海洋生态修复工程环境影响评价分类管理要求

海洋生态修复工程项目类别	环评类别
工程量在 10 万 m ³ 及以上的清淤、滩涂垫高等工程；涉及环境敏感区的堤坝拆除、临时围堰等改变水动力的工程	环境影响评价报告书
工程量在 10 万 m ³ 以下的清淤、滩涂垫高等工程；涉及环境敏感区的其他海洋生态修复工程	环境影响评价报告表
不涉及环境敏感区的退围、退养、退堤还海等近岸构筑物拆除工程；种植红树林、海草床、碱蓬等植被；修复移植珊瑚礁、牡蛎礁等	环境影响评价登记表

注：依据生态环境部《建设项目环境影响评价分类管理名录（2021 年版）》。表中环境敏感区包括：（1），自然保护区、海洋特别保护区；（2），除（1）外的生态保护红线管控范围，海洋公园，重点保护野生动物栖息地，重点保护野生植物生长繁殖地，封闭及半封闭海域。

(3) 用海项目论证

牡蛎礁生态修复后应加强后期管护，为明确管理主体，建议遵照相关规定设立海域使用权。构建人工礁体对局部水动力环境有一定影响，减灾功能显著，在开展海域使用论证时，应开展水动力环境数值模拟，突出生态和减灾功能。

(4) 修复试点验证

选址结束后，应开展小型实验性修复，以验证牡蛎礁生态修复项目在所选区域的可行性。小型实验性修复项目面积一般不超过 5000m²。

9.2.1.4 礁体构建

(1) 礁体材料处理

人工礁体投放前应对礁体材料进行处理，以消除材料上的其他物种和病原体。处理措施包括热处理、氯处理、淡水浸泡、风化曝晒等。大量贝壳需要进行至少 6 个月的风化曝晒，曝晒时需将贝壳材料摊平，定期翻动，保证大部分贝壳能够得到曝晒。



图 19 以岸线防护为目的构建的潮间带牡蛎礁^[12]

(图片来源：Chowdhury et al.2021)

a-c: 直接以牡蛎壳或牡蛎壳包构建的礁体结构 (摄影：Loren D. Coen, Judy Haner, Judy Haner); d-f: 将牡蛎壳装入石笼网或金属笼内构建礁体结构 (图片来源：Brenda Waller, Mark Dumesnil, Mark Dumesnil); g-l: 以混凝土构件构建的礁体结构 (图片来源：Megan La Peyre, Peter Kingsley-Smith, Megan La Peyre, Megan La Peyre, Megan La Peyre, M. Shah Nawaz Chowdhury).

人工礁体材料选取原则

- a) 尽量选择无污染、环保、坚固耐用、易获得、成本低的材料；
- b) 根据材料的适用范围和优缺点选择使用；以消浪减灾为目的的牡蛎礁修复项目通常位于水流快、波浪能高的区域，建议使用石头、混凝土构件或填充牡蛎壳的金属笼等耐用、沉重的固着基构建礁体结构，以松散的牡蛎壳、小石块等轻质固着基构建的礁体在这类环境下稳定性差；
- c) 对不同材料进行试验，选择当地种牡蛎偏好固着的材料。

(2) 修复场地的整理

在潮间带区域开展牡蛎礁生态修复的，在投放固着基之前，需要对场地进行整理，以提高牡蛎固着量。在大潮退潮时清除滩涂上的敌害生物和杂物，必要时垂直海岸方向疏通潮沟，潮沟至少从中潮区延至低潮区，原则上要做到修复场地潮流畅通，运输材料和管理操作方便，有利于礁体稳定。潮下带不宜开展场地整理，修复区应尽量选择海底地形平坦的区域。

(3) 人工礁体的投放

人工牡蛎礁体宜投放于潮间带低潮区（平均低潮水位 1m 以下）至潮下带（平均低潮水位时水深小于 10m），或现有牡蛎礁受损区域。根据修复目标确定最佳的建礁地点、礁体结构和布局方案。

为提高牡蛎固着效率，人工礁体投放时间应在牡蛎固着高峰期前或牡蛎移植前 1 个月内。

投放地点位于潮间带或浅水区的，可趁高潮时从船台直接投放，或用吊机把礁体吊至海面脱钩投放，低潮时至现场进行人工整理；投放地点位于深水区的，礁体为大型构件的，宜使用吊机从海面吊至海底再脱钩投放，以提高投放位置的精度和礁体稳定性；礁体为块石的，可使用抛石船载运石块到指定区域后投放。

9.2.2 补充牡蛎

补充量受限环境需补充牡蛎。应尽量选择本地种的牡蛎，视修复需求可以使用牡蛎成体或稚贝。一般大规模修复宜使用牡蛎稚贝。牡蛎成体可使用当地人工养殖的本地牡蛎物种。牡蛎稚贝可从育苗场自主培育，也可从自然海区采苗。贝类移植是入侵物种扩散和疾病传播的主要途径，生态环境不同的水体之间应避免贝类移植。



图 20 牡蛎固着基质示意图

(图片来源：中国水产科学研究院东海水产研究所 全为民)

9.2.2.1 补充牡蛎成体

牡蛎成体可使用筏式养殖的牡蛎或人工滩养的本地牡蛎物种。

牡蛎运输一般采用干运法，气温 15℃以下，途中防风干，防日晒，运输时间 10h 以内，成活率可达 95% 以上。气温超过 15℃，可用草帘等覆盖，随车备海水，途中经常用海水淋湿草帘，使牡蛎保持一定湿度。

牡蛎单体尽量使用网袋、网笼、麻绳等固定，防止被海浪冲散。延绳养殖的牡蛎可直接将绳固定于待修复的人工礁体或天然礁体上。固着于石块或混凝土构件的牡蛎可直接堆放或垂直竖立插于待修复区。具体投放方式视底质类型而定，如底质较硬，也可直接散布于修复区。

9.2.2.2 补充牡蛎稚贝

稚贝来源可通过育苗场育苗，也可从海区采苗。

(1) 育苗场育苗

应选择大小整齐、体质健壮、无损伤、无病害的牡蛎作为亲贝。通常采用贝壳（牡蛎壳、扇贝壳、蚶壳等）、小石片等作为固着基。固着基的投放时间应在牡蛎幼虫即将变态之前，可串联成串后垂挂于池中，也可平铺于池底。采苗密度以不少于 1 粒 /cm² 稚贝为宜。有条件的情况下，稚贝固着后 5~7d 可移至附近海区暂养。太平洋牡蛎、长牡蛎、福建牡蛎等平均壳长 2~3cm 时，熊本牡蛎平均壳长 0.5~2cm 时，将固着基取出，运送至修复场地。如果修复规模大，不适宜将稚贝移至海区暂养，可直接在育苗池中养至上述大小后，将固着基和稚贝运送至修复场地。



图 21 附苗前的固着基制备（图片来源：中国科学院海洋研究所 李莉 王威）

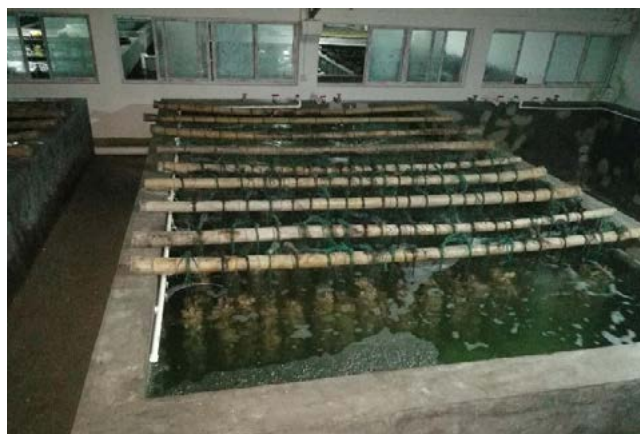


图 22 育苗池附苗（图片来源：中国科学院海洋研究所 黎奥）

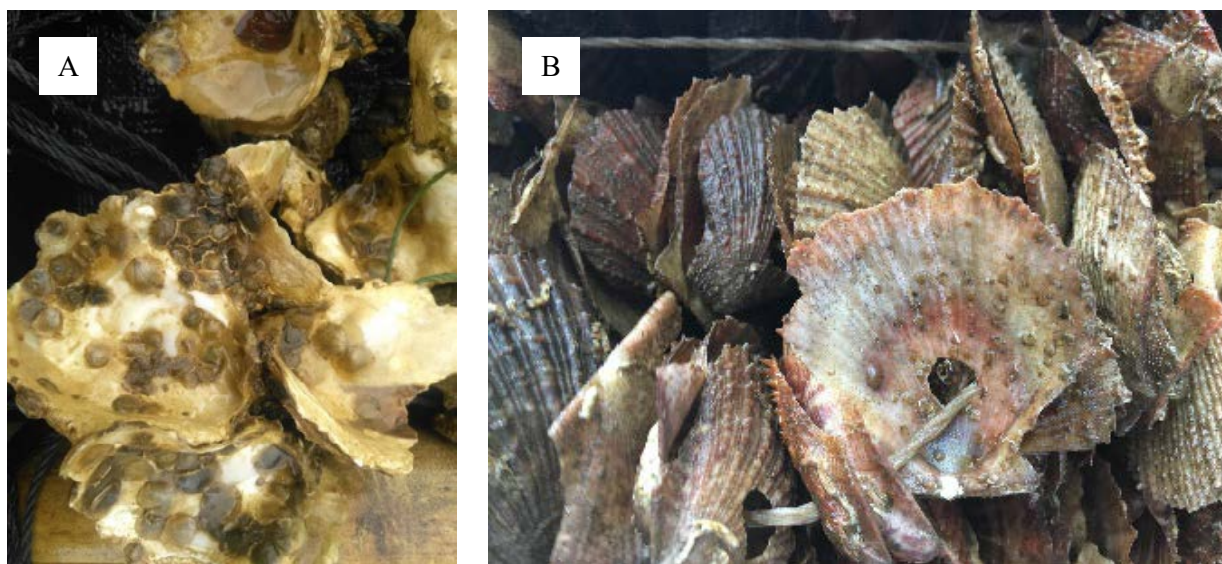


图 23 附苗的固着基

(图片来源: A. 中国科学院海洋研究所 黎奥; B. 中国科学院海洋研究所 王威)

(2) 自然海区半人工采苗

采苗场地宜选择在有牡蛎幼虫分布的海区和波浪较平静的海湾,一般选择地势平坦的区域。

根据固着基材质选择不同的采苗方式,软泥底以插杆采苗为宜,较硬的砂泥底以投石采苗为宜,筏式采苗对底质无要求。

固着基一般放置于潮间带的中低潮区附近至水深 0.4m 的浅水区,以大潮期间每天露空时间不超过 4 小时为宜。

投放固着基的时间应选择在每年的牡蛎繁殖高峰期前 7 天内。不同牡蛎的繁殖高峰期不同,采苗时的适宜水温也不同,我国主要造礁牡蛎物种的繁殖期指标见下表。

表 4 我国主要造礁牡蛎物种繁殖期部分指标适宜范围

牡蛎物种	繁殖期	繁殖期温盐	
		温度	盐度
香港牡蛎 <i>Crassostrea hongkongensis</i>	4 月 ~7 月 9 月 ~11 月	24℃ ~31℃	3~20
福建牡蛎（原葡萄牙牡蛎） <i>Crassostrea angulata</i>	4 月 ~10 月	22℃ ~30℃	20~30
长牡蛎 <i>Crassostrea gigas</i>	5 月 ~8 月	20℃ ~26℃	20~30
熊本牡蛎 <i>Crassostrea sikamea</i>	6 月 ~8 月	20℃ ~28℃	18~35
近江牡蛎 <i>Crassostrea ariakensis</i>	5 月 ~8 月	24℃ ~31℃	15~25

固着基投放 4d 后检查采苗效果，一般牡蛎密度应不少于 1 粒 /cm²。如果藤壶大量固着而牡蛎数量较少时，应清理固着基再次采苗。



图 24 立石采苗（图片来源：自然资源部第二海洋研究所 孙丽）



图 25 栅式采苗（图片来源：自然资源部第二海洋研究所 孙丽）



图 26 水泥制件采苗（图片来源：自然资源部第二海洋研究所 孙丽）



图 27 扇贝壳装笼采苗（图片来源：中国科学院海洋研究所 许飞）

(3) 运输

稚贝同固着基一起运输，一般采用干运法。将固着基装箱或直接装车，覆盖草帘。车上备用海水，途中需经常向草帘上淋水，使牡蛎保持一定湿度。气温在 25℃ 以下，运输时间 8h 以内；气温 7℃ 时，运输时间 10h，牡蛎稚贝成活率仍可达 90% 以上^[13]。

(4) 投放

修复区位于潮间带的，选择低潮时将稚贝同固着基一起投放于修复区礁体上，应避开中午烈日暴晒时间。必要时，可使用网兜、麻绳等固定。



9.3 后期管护

牡蛎礁修复完成后，一般管护期 2 年以上。

牡蛎礁修复工程结束后 1 个月内，进行牡蛎礁区面积测量及 GPS 定位，绘制牡蛎礁分布的数字地图，并在礁体四周设置明显标识。如条件允许，可在修复区外侧布置围网，防止人为采捕牡蛎。

每年至少开展 1 次常规维护，强台风、风暴潮、赤潮、绿潮、海洋污染等海洋灾害事件过后应增加 1 次应急维护。检查人工牡蛎礁体完整性和稳定性情况，对发生倾覆、破损、移位的人工礁体采取补救和修复措施。检查牡蛎礁表面及四周泥沙淤积和杂物堆积情况，视淤积程度开展相应的清洁维护工作。

不定期采取捕捉、驱赶等措施清除牡蛎的捕食者、竞争者和入侵生物等。

定期巡视检查，防止人为采捕和破坏。可参考唐山海洋牧场实业有限公司在河北省祥云湾实施的潮下带牡蛎礁修复经验，修复主体与海钓公司达成合作协议，共同管护修复的牡蛎礁区生境，海钓公司可依托该海域组织实施海钓活动；也可参考大自然保护协会和中国水产科学研究院东海水产研究所在浙江省三门县实施的潮间带牡蛎礁修复试点经验，修复主体与当地社区或附近养殖户、渔民达成合作协议，由当地社区或沿海群众负责看护修复的牡蛎礁，考虑待牡蛎礁群落经评估稳定后，可在牡蛎繁殖期后适量采捕成体牡蛎^[14]。



10. 跟踪监测、效果评估和适应性管理



为评估生态修复效果，宜设置对照区和参照系。

对照区是选定的与生态修复区自然环境相同或相近、且保持适当距离的区域。对照区与修复区的距离应根据修复区大小而定，以不受生态修复项目影响为宜，一般与修复区边缘的距离为 5~10 倍修复区长度或直径。

参照系是能够作为生态修复目标或基准的特定生态系统。宜选择修复区附近或相近纬度海域现有或历史上有较好的牡蛎礁生态系统作为参照系。

10.1 跟踪监测

10.1.1 监测范围

监测范围应涵盖修复区、对照区、参照系全部区域，宜扩大范围至项目实施可能影响的区域。

10.1.2 监测指标及监测方法

牡蛎礁生态修复监测指标包括水环境、牡蛎礁、生物群落和其他指标 4 方面。根据牡蛎礁生态修复效果评估要求，宜参照但不限于表 5。水环境样品按照 GB 17378.3 第 4 章规定的要求进行现场采集，但仅采集离底 2m 一个水层。

以生态减灾为目的的生态修复项目中，除了监测牡蛎礁本身的生长和分布情况外，也应着重监测与减灾成效相关的环境指标，包括水动力环境，如水位 / 潮位、流速、流向、波高衰减率；以及地形特征，如水深、坡度、岸线侵蚀速率等。

表 5 牡蛎礁生态修复监测指标及监测方法

指标类型	监测指标	监测方法	适用范围		
			常规监测	项目目标实现情况评估	生态系统恢复效果评估
水环境	水温	按照 GB/T12763.2 确定的温盐深仪法或颠倒温度表法, 仅测量底层海水温度	★		
	盐度	按照 GB 17378.4 确定的温盐深仪法或盐度计法, 仅测量底层海水盐度	★		
	溶解氧	按照 GB 17378.4 确定的碘量法或使用溶解氧仪测量	★		
	pH 值	按照 GB 17378.4 确定的 pH 计法	★		
	叶绿素 a	按照 GB 17378.7 确定的荧光分光光度法或分光光度法		★	★
	活性磷酸盐	按照 GB 17378.4 确定的磷钼蓝法		★	★
	硝酸盐	按照 GB 17378.4 确定的镉柱还原法和锌 - 镉还原法		★	★
	亚硝酸盐	按照 GB 17378.4 确定的盐酸萘乙二胺分光光度法		★	★
	铵盐	按照 GB17378.4 确定的靛酚蓝分光光度法或次溴酸盐氧化法		★	★
	浊度	按照 GB 17378.4 确定的浊度计法		★	★
	悬浮物	按照 GB 17378.4 确定的重量法		★	★
牡蛎礁	牡蛎礁斑块面积	参考本文件 5.2.2 节	★	★	★
	礁区面积	参考本文件 5.2.2 节	★	★	★
	礁体高度	参考本文件 5.2.2 节	★		★
	牡蛎密度	参考本文件 5.2.2 节	★	★	★
	牡蛎补充量	参考本文件 5.2.2 节	★	★	★
	牡蛎肥满度	每个站位随机选取不少于 10 个成体牡蛎, 撬开贝壳后, 取软体部烘干至恒重, 称干肉重。清除牡蛎壳上的寄生物和杂质, 烘干至恒重, 称干壳重。按公式 (1) 计算牡蛎肥满度。 $\alpha = \frac{F}{S} \times 100\% \dots\dots\dots (1)$ 式中: α ——牡蛎肥满度; F ——牡蛎干肉重, 单位为克 (g) ; S ——牡蛎干壳重, 单位为克 (g) 。	★		★
	壳高	参考本文件 5.2.2 节	★		★

指标类型	监测指标	监测方法	适用范围		
			常规监测	项目目标实现情况评估	生态系统恢复效果评估
其他生物群落	大型底栖生物种类组成、种类数、密度	按 GB/T 12763.6 执行		★	★
	牡蛎捕食者和竞争者	按 GB/T 12763.6 执行	★		
其他指标	泥沙、杂物覆盖率	采用目测的方法确定泥沙、杂物覆盖情况，估算泥沙、杂物覆盖面积占牡蛎礁斑块面积的百分比。	★		
	人工礁体保存率	目测投放的人工礁体的现存状态，估计人工礁体能够满足牡蛎生长和造礁条件，认为该人工礁体处于有效状态。统计调查区内处于有效状态的人工礁体数量占投放人工礁体总数量的百分比。	★	★	
注：“★”表示适用。					

10.1.3 监测站位

监测站位布设应遵循以下原则：

- a) 修复区、对照区、参照系、修复项目实施可能影响的区域均应布设不少于 3 个监测站位；
- b) 站位布设应具有代表性，站位数量能够满足牡蛎礁生态修复效果评估的要求；
- c) 针对断面无法覆盖的牡蛎礁斑块，应单独布设站位。

10.1.4 监测期限和频次

(1) 监测期限

生态修复监测宜涵盖生态修复实施前、实施过程和在修复工程实施后的不同阶段生态系统的状态。如生态监测不涉及对照区，在生态修复措施实施前开始开展生态监测，至少在修复区域开展 1 次生态监测；如采用对照区代表生态修复区域修复前的状态，可在修复后开展修复区域和对照区域的同步监测。

如开展修复项目实施过程中周边区域的环境监测，根据《建设项目海洋环境影响跟踪监测技术规程》的要求执行。

牡蛎礁生态修复工程实施后，跟踪监测的时间跨度与修复目标的实现时间一致，为评估修复目标实现情况提供监测数据。生物群落和生境条件的监测时间可设定为 10 年，生态功能的监测以 20 年为宜。如不具备开展长期跟踪监测的条件，监测时限可设定为 5 年，以满足短期目标评估的需要。

参照系和对照区至少开展 1 年的监测；条件允许时，监测期限可与修复区域的跟踪监测相同。

(2) 监测频次

以补充牡蛎为主的生态修复项目，在项目实施完成后 1 年内宜间隔 3 个月开展 1 次牡蛎成活率的监测。以投放固着基为主的生态修复项目，在项目实施完成当年内，牡蛎繁殖高峰期后 3 个月内每个月开展 1 次牡蛎密度的监测。

在牡蛎礁生态修复初期（2~5 年内）宜逐年开展生态监测，每年至少开展 1 次监测。威胁因素强度的监测根据威胁因素类型设置。

牡蛎礁生态修复中长期监测根据需求确定监测时间和频次。

如生态修复工程设定了阶段性目标，监测频次也需要依据阶段性目标实现的时间设定。



图 28 人工礁体固着效果监测（图片来源：自然资源部第二海洋研究所 程杰）



图 29 人工礁体固着效果监测（图片来源：自然资源部第二海洋研究所 程杰）



图 30 新生自然牡蛎礁区生物量评估（图片来源：中国科学院海洋研究所 王威）

10.2 效果评估

10.2.1 评估内容

根据生态修复的阶段性目标、中长期目标和生态修复监测的实施进度，进行生态系统修复效果的阶段性和终期评估。根据项目实际情况选择生态修复效果评估的内容。修复效果评估的内容可包括但不限于：

牡蛎礁面积的恢复；

生物群落的恢复；

生境条件的恢复；

消浪减灾作用；

威胁因素的消除；

重要生态功能的恢复。

牡蛎礁生态修复效果评估应以生态修复项目实施前设定的预期指标为评估指标。评价指标应与监测参数对应并明确计算方法。

在生态修复工程完成后 5 年内，重点评估牡蛎种群恢复情况、生物群落恢复情况、海岸带防灾减灾程度、威胁因素消除效果等。以生态减灾为目的的生态修复，效果评估应重点选取波高衰减率、海岸侵蚀速率等指标。

在生态修复工程完成 5 年后，宜增加开展重要生态学过程恢复和生态功能恢复效果的评估，其中生态功能包括生态系统成熟度、生物多样性维持、牡蛎礁自我补充能力等。

10.2.2 评估方法

每个评估指标以所有监测站位的平均值作为修复区域的评估结果。根据生态修复监测结果，可以从生态系统指标改善与提升评估、生态修复目标实现程度两个方面进行修复效果评估。评估方法可参照 T/CAOE 21.6-2020。

(1) 目标值确定

目标值的确定应遵循以下原则：

项目目标实现情况评估时，以生态修复项目实施前设定的项目实施过程中或完成后某

一阶段的预期效果指标值为目标值；

生态系统恢复效果评估时，以参照系生态基线监测值为目标值；

当参照系为历史上较好的牡蛎礁生态系统时，以历史数据为基础，经专家评议后作为目标值；

对于无法从参照系获得目标值的评估指标，可采用指标最大值或参考文献数据作为目标值。

(2) 生态系统指标改善与提升评估

生态修复工程也可以通过将评估指标的现状值与生态修复前的状态值或对照生态系统的现状值对比，评估各指标变化情况和趋势，反映生态系统状况的改善和功能的提升。

(3) 生态修复目标实现程度

对于明确了修复目标值的评估指标，通过对比相关指标在评估时的现状值和目标值来反映生态修复目标的实现情况。如在修复目标设定阶段没有明确评估指标目标值，可以将评估指标的现状值与参照系的状态值进行比较，当这些指标达到或接近参照系的状态时，可认为生态系统实现恢复。

评估生态修复目标实现程度时，对于未显著恢复的指标，可采用专家咨询或调查、试验的方法进一步分析其是否仍处于退化状态或对生态系统的恢复造成不利影响。

根据生态减灾修复项目的目标、指标选择和实现程度评估方法，制定相应的监测方案，以进行评估和分析。

10.3 适应性管理

根据生态系统指标改善与提升评估结果、生态修复目标实现程度结果、常规监测指标，综合分析牡蛎礁生态修复措施的有效性，可参照表 6 进行适应性管理。

表 6 评估结果说明及适应性管理措施表

评估目的	评估等级	分级说明	适应性管理措施
生态修复目标实现程度评估	I	生态修复措施效果明显，牡蛎礁生态修复项目达到预期目标	按实施方案继续实施牡蛎礁生态修复项目。
	II	生态修复措施有效，牡蛎礁生态修复项目基本实现预期目标	结合常规监测指标和指标实现情况评估结果，分析可能影响项目目标实现的原因。若非不可抗力因素影响，对可能造成影响的生态修复措施进行微调，经专家论证后实施。
	III	生态修复措施产生一定正面作用，但牡蛎礁生态修复项目未实现预期目标	结合常规监测指标和指标实现情况评估结果，分析影响项目目标实现的原因。若非不可抗力因素影响，应适当调整造成影响的生态修复措施，经专家论证后，报项目主管部门同意后实施。
	IV	生态修复措施基本无效，牡蛎礁生态修复项目未实现预期目标，甚至可能无法实现预期目标	结合常规监测指标和指标实现情况评估结果，分析影响项目目标实现的原因，论证生态修复项目继续实施的可行性。若可行，调整生态修复方案，经专家论证后，报项目主管部门同意后实施。
生态系统指标改善与提升评估	I	牡蛎礁生态系统得到较好恢复并朝着稳定生态系统的方向发展	分析牡蛎礁生态系统稳定性，以及生态系统是否拥有自我恢复能力。经专家论证判定是否有必要继续实施生态修复措施。
	II	牡蛎礁生态系统得到较好恢复，但未达到参照系水平	保留并继续实施现有的生态修复措施。
	III	牡蛎礁生态系统未得到较好恢复，与参照系水平有一定差距	对生态修复措施进行适当调整，经专家论证修改后实施。
	IV	生态修复措施未起作用，牡蛎礁生态系统基本没有得到改善甚至恶化	调整生态修复方案，经专家论证修改后实施。

根据不同类型的修复方式和修复阶段，可采取不同的改善措施。根据生态修复效果评估，判断修复采用的技术是否有效；对于修复效果不理想或修复目标未实现的，分析失败的原因，必要时调整修复措施和技术，或引入一些新的修复措施和技术。

不同修复方式可采取的改善措施

a) 自然恢复的牡蛎礁

对于采用自然恢复方式的生态修复项目，如在修复区内牡蛎种群恢复数量未达到预期目标，可采用少量的同种类成体牡蛎或稚贝进行补充。

b) 人工辅助修复和重建性修复

补充成体牡蛎的修复项目，在项目实施完成后 1 年内定期监测牡蛎死亡率和稚贝固着情况。当成体牡蛎死亡率超过 50% 时，宜补充投放成体牡蛎；当牡蛎繁殖高峰期后稚贝固着数量少，应考虑更换成体牡蛎来源，在下一年度牡蛎繁殖高峰期前投放。

补充稚贝的修复项目，在项目实施完成后 3 个月内，每个月监测一次稚贝死亡率。当稚贝死亡率超过 75% 时，宜补充投放稚贝。再次投放稚贝可考虑更换稚贝来源，比如更换育苗场的亲贝来源，更换采苗地点等。

投放固着基的修复项目，在牡蛎繁殖高峰期后监测稚贝固着情况。如稚贝固着效果差，可考虑更换固着基材料。



11. 牡蛎礁修复案例



11.1 案例 1—美国阿拉巴马州牡蛎礁生态减灾修复项目

牡蛎礁越来越多地被作为自然基础设施的一种，应用于海岸带防护与生态岸线的建设项目中。例如美国阿拉巴马州牡蛎礁生态减灾修复项目，就是以防护海岸线、减缓岸线侵蚀而设计修复的。美国旧金山湾生态岸线试点项目也在潮间带近潮下带区域修复了牡蛎礁和海草床，不仅提高了生物多样性，而且减少了 30% 的波浪能^[15]。另有研究，在孟加拉国东南海岸 Kutubdia 岛受侵蚀的潮间带泥滩上开展牡蛎礁修复试验，经监测牡蛎礁背海侧侵蚀量较对照区减少了 54%，能够有效促进泥滩稳定和盐沼湿地的扩张^[16]。



图 31 孟加拉国东南海岸 Kutubdia 岛 2017 年 12 月拍摄的牡蛎礁

(a) 和对照区 (b) 的盐沼植物生长差异，以及 2019 年 2 月拍摄的盐沼向海扩张情况^[16]

(图片来源: Chowdhury et al., 2019)

11.1.1 环境情况

美国阿拉巴马州位于墨西哥湾北部，其沿海地区在历史上分布着超过 3m 高的潮下带牡蛎礁，防护着后方海岸线上的盐沼湿地不受海浪侵蚀，也为海草床的生长提供了清洁的水质和稳定的生长环境^[17]。然而，在连年干旱、牡蛎天敌（如钻蚝螺，*Urosalpinx cinerea*）爆发的影响下，又先后经历了 2004 年的飓风伊万和 2005 年的飓风卡特里娜，造成了物理破坏和淤积，据统计，墨西哥湾的牡蛎礁对比历史记录已经减少了至少 50%^[18]。而 2010 年墨西哥湾漏油事件更加剧了这一退化，导致了相当于 40 亿到 83 亿只牡蛎成体因此直接死亡或无法繁殖而损失^[19]。也正因此，此次事件的赔偿金中规定了针对恢复当地牡蛎自然资源的 1.6 亿美元。随着牡蛎礁的退化，盐沼湿地、海草床以及滩涂也因岸线侵蚀而大面积退化——阿拉巴马州的部分海岸线后退的速率最高可达每年 1.86m^[20]。结合该州 600 英里的海岸线长度，这意味着在五十年内将损失 18000 英亩土地，价值 18 亿美元^[21]。

11.1.2 修复目标

在这一背景下，大自然保护协会（TNC）、阿拉巴马州海岸带基金会（Alabama Coastal Foundation）、莫比尔湾守护组织（Mobile Baykeeper）和海洋基金会（The Ocean Foundation）四家机构成立海岸线修复联盟，在阿拉巴马州共同发起了“100-1000：修复阿拉巴马州海岸”项目，旨在通过修复 100 英里的牡蛎礁，进而稳固海岸线，促进 1000 英亩的盐沼湿地与海草床恢复，使其在为海洋生物提供栖息环境的同时也为当地渔民社区带来可持续发展的机遇^[22]。

11.1.3 修复实施情况

（1）修复规划与方法

在经多方商讨，并运用“海岸带弹性工具（Coast Resilience）”叠加当地海湾受灾风险程度、适宜牡蛎礁栖息地修复的生态条件和社会经济条件进行情景模拟与分析，识别出牡蛎礁生态减灾修复项目（即建设由牡蛎礁构成的防波堤）的最佳地点，以实现最显著的波浪能消减作用和最优化的沿海财产安全保护效果。

(2) 礁体构建

自 2011 年起，项目团队在多个位点设计并投放了牡蛎礁“防波堤”，包括 3295 个礁球（Reef Balls™，图 32A）、14000 个牡蛎礁堡（Oyster Castle®）、190000 个牡蛎壳袋（图 32B）和 489 个牡蛎笼阵（ReefblkSM，图 32C），总长度达到 3600m。在礁体建设过程中，当地社区参与度极高，有 1500 余名当地志愿者协助执行。



(A)

(B)

(C)

图 32 阿拉巴马州建设牡蛎礁防波堤采用的 (A) 礁球（Reef Balls™）、
(B) 牡蛎壳袋和 (C) 牡蛎笼阵（ReefblkSM）

（图片来源：(A)、(B) Erika Nortemann/TNC；(C) Beth Maynor Young）

(3) 修复效果监测

后期持续的监测结果显示，阿拉巴马州的牡蛎礁生态减灾修复项目有效减缓了岸线侵蚀情况。例如，在阿拉巴马港口处建造的约 840m 长的牡蛎礁防波堤，已经促进向陆侧海草床与盐沼湿地的面积扩张，减缓了海浪对海岸线的侵蚀。而在 Swift Tract 投放的防波堤状牡蛎礁，在生长四年后，有效降低了岸线侵蚀速度，从历史上（1957–1981）的 0.35m yr^{-1} 降至 0.02m yr^{-1} ^[21]。除了防灾减灾的效益外，项目在实施过程中也为当地社区带来了就业机会，因此带动了如水泥制造等产业的销售额。另外，不同于传统硬质堤坝等海岸线防护措施，修复后的牡蛎礁还能成为有经济价值的鱼、虾、蟹等生物提供栖息地，促进当地商业捕捞和休闲海钓等相关产业。现在，通过修复牡蛎礁而实现生态减灾的方式也在墨西哥湾沿岸的其他地区得到应用，防护着当地的海岸线和基础设施，见图 33^[22]。



图 33 美国路易斯安那州沿岸牡蛎礁生态减灾修复工作，与阿拉巴马州采用了相似的防波堤设计
(图片来源: Erika Nortemann/TNC)

11.2 案例 2—祥云湾贝藻礁生态系统修复项目

11.2.1 环境情况

祥云湾地处渤海垂直暖流带与滦河交汇处，为泥沙质海底，水深 6~15m，水交换条件好，历史上曾为滦河口渔场，上世纪 80 年代渔场消失。历史上，渤海湾西北岸发育有古牡蛎礁^[23]，誉为“牡蛎礁平原”，是世界著名三大牡蛎礁群。唐山市海区大吴庄古牡蛎礁，厚达 6m，分布 25 个种属的硅藻。据 2019 年开展的初步调查，唐山溯河口及沿海区域仍有约 14.5km² 天然牡蛎礁，礁区内牡蛎与大型海藻共生。

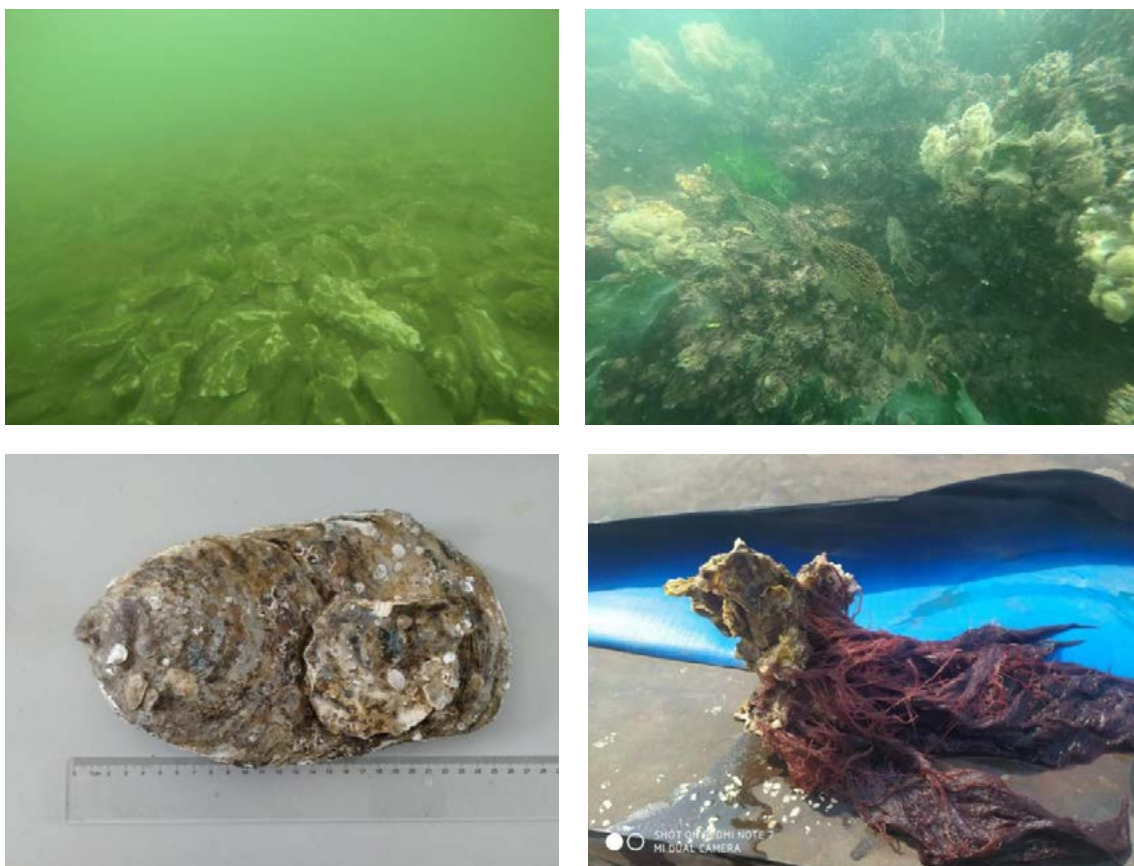


图 34 祥云湾天然牡蛎礁现状图

(图片来源：河北省近海生态修复技术创新中心，张云岭)

11.2.2 修复目标

自 2009 年起，唐山海洋牧场有限公司尝试通过投放人工礁体构建藻场，利用自然的海洋生态环境，有目的的建设海洋牧场。2016 年起，为营造以活体牡蛎礁和大型海藻场为核心，以自然、连通、互生、循环为特征的健康的复合生态系统，实施了针对牡蛎礁、海藻场、海草床三大生态系统的生态修复工作。

11.2.3 修复实施情况

(1) 修复方案

祥云湾的牡蛎种类主要为长牡蛎。因祥云湾的牡蛎和藻类补充量充足，修复技术以投放附着基为主，人为补充野生牡蛎苗为辅。此外，还通过抛洒大型海藻孢子 and 大型海藻移植等方法提高海藻生物量。

(2) 礁体构建

试验性投放的附着基类型包括浮筏网礁、报废渔船、石块、钢筋沉箱、钢筋板框、水泥构件以及各种组合式礁体等。经试验，石块堆礁和钢框岩石组合礁体以及水泥构件礁体的牡蛎和藻类附着效果最好。

投放的礁体按“点—线—面”式排布。礁体占地面积约占礁区总面积的 10%。点式礁体排布是利用钢框岩石附着礁和 16 孔中小型沉箱礁，附着硅藻，留存海藻，聚集碎屑食物。线式礁体排布是用花岗岩石块建设成条带型贝藻礁体，改变原有生境缺乏贝藻类附着基状况，消减湍流涌浪。点式礁体和线式礁体间隔排布形成完整的面式礁体投放布局。

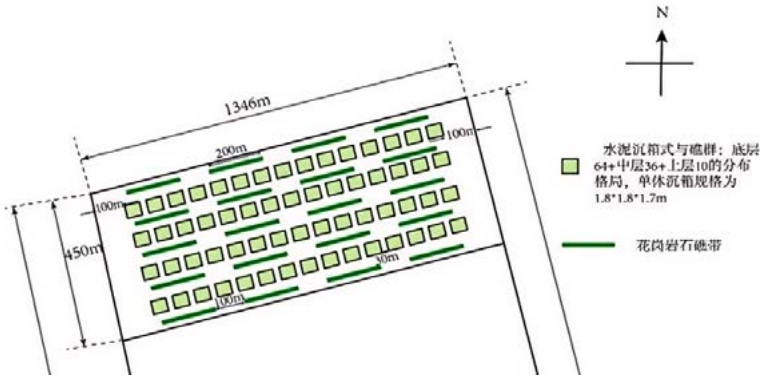


图 35：贝藻礁“点—线—面”式布局示意图

(图片来源：河北省近海生态修复技术创新中心，张云岭)

(3) 修复效果监测

至2018年，唐山海洋牧场共修复贝藻礁3213.5亩，实验4大类、20余种礁型，投放人工礁体77万空方。贝藻礁修复项目结束后3年，经监测其中的贝类主要为牡蛎，藻类包括马尾藻、孔石莼、裙带菜等。平均牡蛎密度达187个/m²，大型海藻的生物量约为145g/m²湿重，海藻覆盖率达15%以上。经评估，贝藻礁生态系统规模远远大于早期生态系统，系统能量总流通量增加5倍，总初级生产力增加4倍，总生产力增加4.3倍，总生物量增加42.3倍。贝藻礁生态系统食物链平均路径长度增加20%，能量流动路径多样性增加47%。第I-II营养级之间能量传递效率为87%，较修复前增加1.9倍，远高于一般自然生态系统中10%的能量传递效率值。II-III营养级之间能量传递效率为10%，增加4.9倍，达到一般自然生态系统的能量传递效率值。



图36 祥云湾贝藻礁修复前后对比图

(图片来源：河北省近海生态修复技术创新中心 张云岭)

11.3 案例 3—潍坊寿光市莱州湾近江牡蛎牡蛎礁修复

11.3.1 环境情况

项目位于潍坊市寿光市老河口区域。20 多年前，当地的牡蛎种类主要为近江牡蛎，分布于河口低盐水域低潮线以下水流畅通的河床及河口附近，大潮低潮时出露。由于本海区底质多为泥沙，无固着基，牡蛎固着于单个贝壳，久之，形成团块，形同礁石，当地渔民称之为“牡蛎山”。附近的支脉沟、小清河、老河、潍河、胶莱河等均有分布，分布面积约 80hm^2 ，资源总量约 $0.95 \times 10^4\text{t}$ ；其中，以分布于老河口区域附近牡蛎最为密集。

近年来，由于海岸带工农业的发展及城市用地的扩张，沿海浅水区不断被开发为水产用地、盐业用地、建筑用地等，滩涂湿地面积减少；沿海地区经济的高速发展，使该区域的入海污染物总量不断增加，水体浑浊且富营养化严重，近江牡蛎数量大量减少，导致当地的牡蛎礁生态系统退化，生物多样性降低，仅在部分保护区内有少量分布。

11.3.2 修复目标

针对日益严峻的海洋生态保护形势，潍坊市人民政府、潍坊市海洋发展和渔业局、寿光市海洋渔业发展中心组织申报并实施了 2021 年潍坊市海洋生态保护修复项目，目的是恢复该地已退化的近江牡蛎礁群，增强该区域的防灾减灾能力，增加生物多样性，提高生态系统服务功能。

11.3.3 项目实施情况

(1) 项目设计

山东清海生态环境研究院有限公司在开展工程区环境调查的基础上，根据底质与现存的牡蛎礁情况，设计投放玄武岩人工礁体与近江牡蛎幼苗附着基，以增加近江牡蛎附着载体与幼苗补充量，提高修复效果。

(2) 项目实施

项目自 2022 年 5 月开始实施，采用两种玄武岩人工礁体（图 37），在礁体表面捆绑近江牡蛎恢复单元，每个单元由 3m 长的玄武岩绳串 30 片近江牡蛎附着基（图 38）构成。共投放礁体 19200 个，近江牡蛎幼苗附着基 1000 万片，投礁面积 33hm^2 ，牡蛎礁恢复面积 107hm^2 。

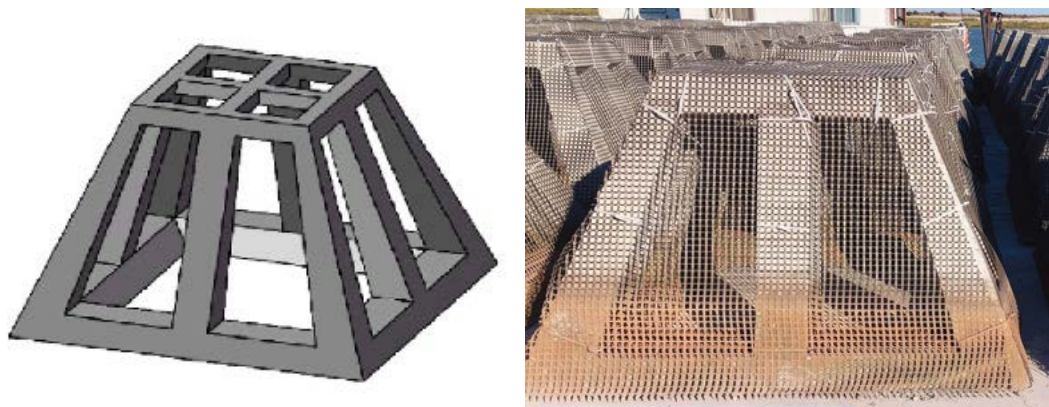


图 37 玄武岩人工礁体（图片来源：山东清海生态环境研究院有限公司 马秀芬）



图 38 近江牡蛎幼苗附着基

（图片来源：山东清海生态环境研究院有限公司 马秀芬）

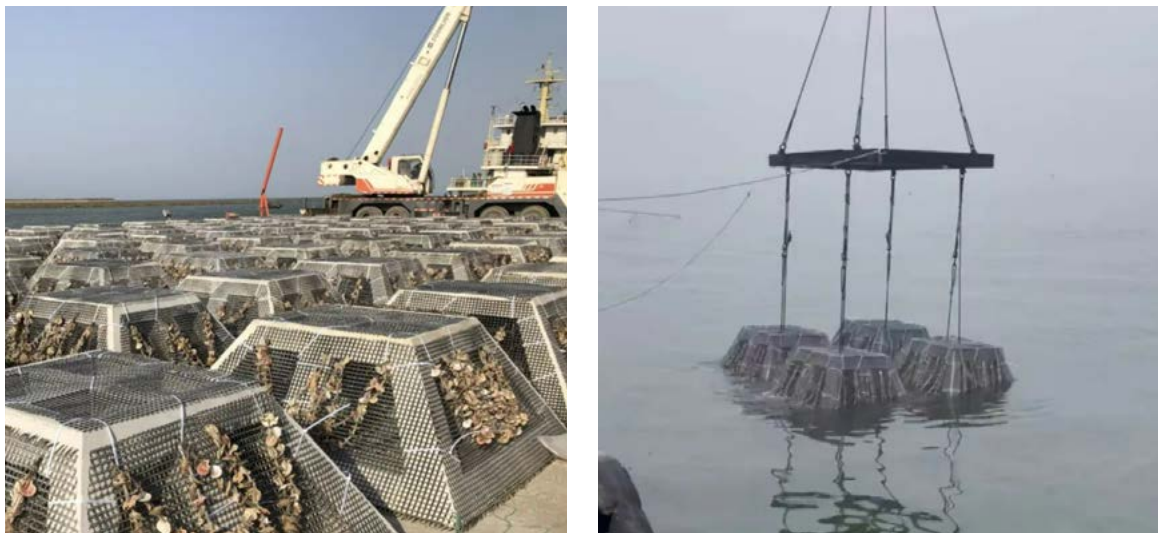


图 39 修复实施现场（图片来源：山东清海生态环境研究院有限公司 马秀芬）

（4）修复效果跟踪监测

项目实施一年后，修复效果已初步显现，根据监测结果，项目区内近江牡蛎密度为 338 个 / m^2 。牡蛎补充量为 56 个 / m^2 ，平均存活率为 79.00%。



图 40 修复后的近江牡蛎礁区航拍图

（图片来源：山东清海生态环境研究院有限公司 兰思群）

近江牡蛎礁体修复后，牡蛎礁的三维结构为其他水生生物提供了良好的栖息和觅食场所，项目区内的生物多样性显著提高，鲈鱼群、黄金海马等相继出现，促进了生态系统的良性循环。



图 41 近江牡蛎礁体内的海洋生物

(图片来源：山东清海生态环境研究院有限公司 兰思群)

11.4 案例 4—长江口牡蛎礁修复项目^[23]

长江口牡蛎礁修复始于 2004 年，为补偿长江口深水航道整治工程建设对河口生物资源和鱼类栖息地带来的破坏和损失，中国水产科学研究院东海水产研究所科研团队创造性地提出利用长江口深水航道整治工程水工建筑物（南北导堤和丁坝）的混凝土模块作为牡蛎固着礁体，通过增殖人工培育的近江牡蛎亲本 50t，构建了中国首个人工牡蛎礁生态系统，面积达到 26hm²。

2005–2010 年持续跟踪监测的结果显示，长江口已形成了一个自维持的近江牡蛎种群，牡蛎密度为 400~800 个 /m²，生物量（鲜肉重）为 2000~3000g/m²，总数量达到 590 亿个，总重量达到 106 万 t。



图 42 修复后的长江口牡蛎礁

（图片来源：中国水产科学研究院东海水产研究所 全为民）

附录 我国沿海常见牡蛎物种及牡蛎礁分布情况



目前已知我国沿海分布有 30 多种牡蛎^[24-30]。巨蛎属 (*Crassostrea*) 牡蛎物种主要有长牡蛎 (*C. gigas*)、福建牡蛎 (*C. angulata*)、香港牡蛎 (*C. hongkongensis*)、熊本牡蛎 (*C. sikamea*)、近江牡蛎 (*C. ariakensis*)、岩牡蛎 (*C. nippona*) 和艾氏牡蛎 (*C. iredalei*)，这些大多也是中国重要的养殖牡蛎物种，同时也是常见的牡蛎礁造礁物种^[31、32]，主要分布情况见图 43 和表 7。小蛎属 (*Saccostrea*) 的物种，如多刺牡蛎 (*S. echinata*) 和咬齿牡蛎 (*S. mordax*) 是我国南方沿海常见牡蛎种类，在福建以南沿海都有分布，长江以北沿海暂未有这种牡蛎的报道^[33-35]。牡蛎属 (*Ostrea*) 的密鳞牡蛎 (*O. denselamellosa*) 一般栖息于潮下带至水深 30m 以内的盐度较高且较稳定的浅海，在中国南北海区都有分布，但因针对密鳞牡蛎的调查评估较少，具体分布范围不详。

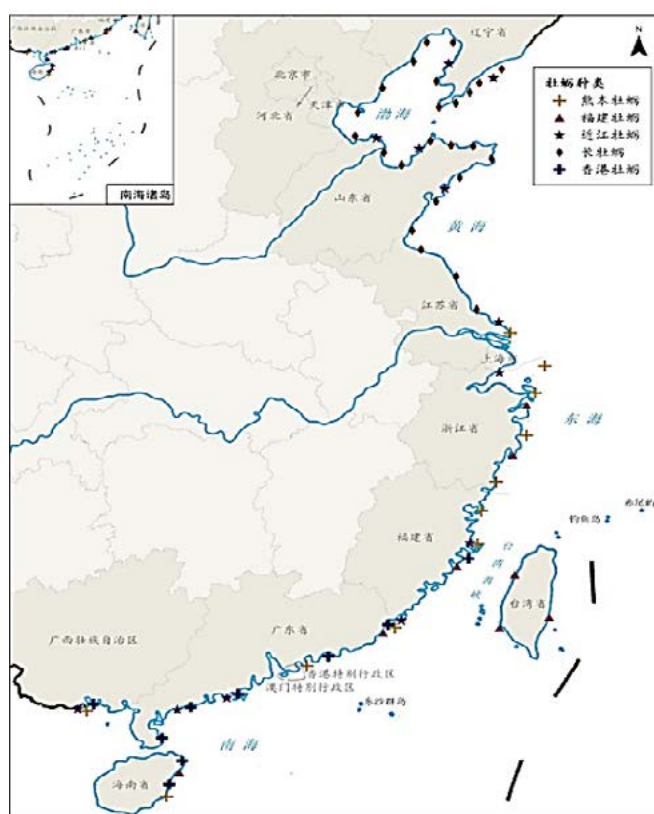


图 43 中国沿海地区巨蛎属牡蛎物种分布

(图片来源：中国科学院海洋研究所，由罗永梅于 2022 年摹画 (审图号：GS 京 (2022) 0140 号)。

引自《中国牡蛎礁栖息地保护与修复研究报告》/ 大自然保护协会 (TNC)。

表 7 我国几种常见牡蛎物种主要分布区域

序号	牡蛎物种	物种特征	主要分布区域
1	近江牡蛎 <i>Crassostrea ariakensis</i>	低盐广温广布种	鸭绿江口到海南沿海，低潮线至 10m 水深的河口、海湾及浅海低盐区
2	长牡蛎 <i>Crassostrea gigas</i>	广温性种	辽宁至江苏沿海，潮间带至 10m 水深的浅海
3	密鳞牡蛎 <i>Ostrea denselamellosa</i>	广温广布种	广东以北沿海均有分布，主要生长在潮下带至水深 30m 以内的盐度较高且较稳定的浅海区
4	熊本牡蛎 <i>Crassostrea sikamea</i>	亚热带性种	江苏南通以南沿海的海湾及河口潮间带区域
5	福建牡蛎 <i>Crassostrea angulata</i>	亚热带性种	浙江以南沿海，潮间带至 10m 水深的浅海，核心分布区为广东和福建
6	香港牡蛎 <i>Crassostrea hongkongensis</i>	亚热带性种	广东、广西及海南沿海，潮间带至 10m 水深的浅海
7	棘刺牡蛎 <i>Saccostrea. echinata</i>	亚热带性种	浙江以南沿海潮间带区域

我国尚未全面开展牡蛎礁分布情况调查，已知渤海湾、黄河三角洲、江苏小庙洪、深沪湾等海域有牡蛎礁分布。

1、曹妃甸 - 乐亭牡蛎礁

河北省唐山市曹妃甸 - 乐亭海域的牡蛎礁，生长在曹妃甸工业区与京唐港之间的半封闭海湾中。根据 2019 年调查成果^[36]，曹妃甸 - 乐亭海域的牡蛎礁是目前我国已知面积最大的天然牡蛎礁，礁区总面积约 15km²，主要分布于老龙沟潮汐通道两侧、溯河河道及溯河河口段、石臼坨和腰坨西侧的捞鱼尖海域（图 44）。主要造礁物种为长牡蛎，平均密度介于 104~3912 个 /m² 之间，三个牡蛎礁区内均分布有一定数量的成年牡蛎和稚贝，牡蛎壳高也均呈现单峰的正态分布，表明牡蛎种群目前处于可持续的生长状态。

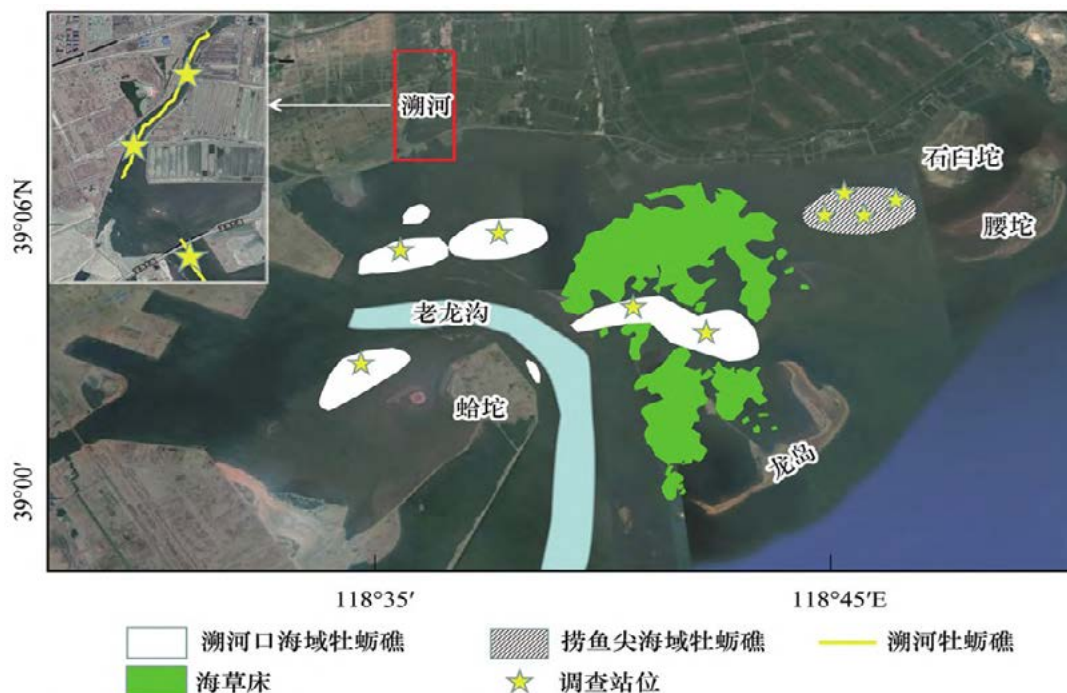


图 44 曹妃甸 - 乐亭海域牡蛎礁分布范围^[36] (图片来源: 全为民等, 2022)

2、大神堂牡蛎礁

天津大神堂牡蛎礁区位于渤海湾西北岸大神堂以南的大、小沙岗及其边缘水域，为潮下带礁体，水深约 0.5~4.5m，牡蛎礁面积在 20 世纪 70 年代达 35km²。

2007 年，天津地质调查中心海岸带与第四纪地质室对大神堂近海 - 潮间带下部的活牡蛎礁调查结果显示，大神堂牡蛎礁仅存 3 个分散的礁区，分别为西北部（礁体面积约 0.9km²）、南部（礁体面积约 0.9km²）和东北部（礁体面积约 1.4km²）三个相互分割的礁区，总面积比 70 年代退化 90% 以上。2011 年，再次调查结果显示，原西北部礁体已经消失，南部礁体面积减少至约 0.5km²，面积最大的东北部牡蛎礁形状和分布比较稳定^[37]。

为保护该地区牡蛎礁生态系统及其周边海洋环境，2012 年 12 月 21 日原国家海洋局批复建立天津大神堂牡蛎礁国家级海洋特别保护区，总面积约 34km²。

自 2012 年以来，为保护和恢复大神堂的牡蛎礁生态系统，天津市海洋局先后投放人工牡蛎礁约 17 万袋。2019 年勘察结果表明，面积最大的东北部牡蛎礁北侧出现了新生的连片

牡蛎礁，面积达 2km^2 以上^[38]。

2020 年，原自然资源部北海环境监测中心对天津大神堂牡蛎礁国家级海洋特别保护区及周围海域的调查显示，天津大神堂牡蛎礁南部的 2 号礁群已经消失，而东北部的 1 号礁群持续向北生长，已经超出了保护区的北方边界。1 号礁群由 3 块大礁盘、3 块小礁盘及若干零散礁盘构成，南北长约 1.9km ，东西宽约 2.5km ，礁盘净面积约为 2.076km^2 （图 45）。

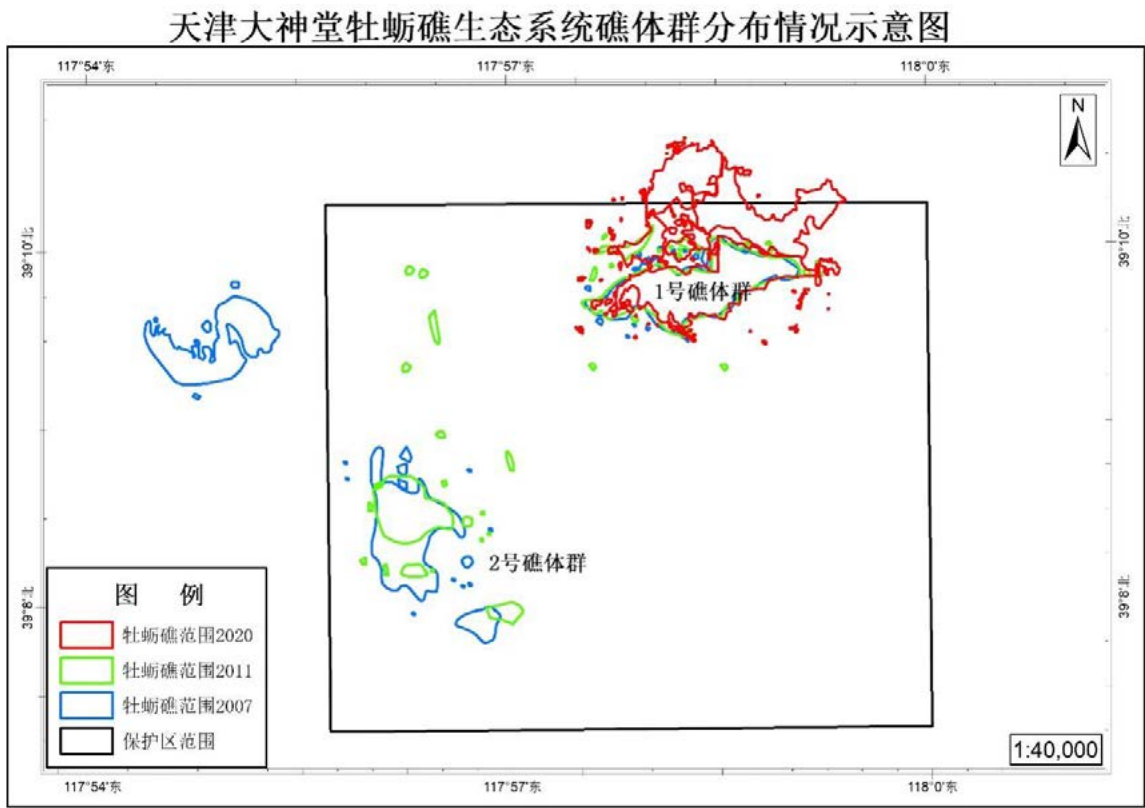


图 45 2007 年、2011 年、2020 年天津大神堂牡蛎礁分布情况示意图

（图片来源：自然资源部北海生态中心 张祎）

3、黄河三角洲牡蛎礁

黄河三角洲的牡蛎种群以长牡蛎和近江牡蛎为主。近江牡蛎主要分布在山东黄河三角洲国家级自然保护区内的主要河口区域。

2017 年，中国科学院海洋研究所在套尔河、马颊河等河口区域发现近江牡蛎野生种群呈规模分布。该牡蛎礁斑块零散地分布于潮下带，总面积约 1.5km^2 ^[39]。2018 年，在东营垦利区海域发现分布较为集中的潮下带牡蛎礁，总面积为 0.24km^2 。该片礁体以近江牡蛎成体

为主，占主要礁区的 95.8%，未发现牡蛎幼体^[40]。2020 年，山东黄河三角洲国家级自然保护区管理委员会在大汶流南部海域水深 2~3m 处发现面积约 4hm² 的牡蛎礁。

2021 年，自然资源部北海局、中国科学院海洋研究所联合山东黄河三角洲国家级自然保护区管理委员会对保护区内黄河口站、大汶流站等区域开展牡蛎资源调查，发现在采油区防浪堤存在大量的长牡蛎野生种群^[41]。

4、江苏海门蛎岬山牡蛎礁

20 世纪 60 年代，海门蛎岬山牡蛎礁的礁区总面积为 3.55km²，礁体由多种牡蛎组成且分层明显^[42]，底层主要由近江牡蛎形成，壳高达 30cm 以上；上层为熊本牡蛎，是该礁体的主要造礁物种^[43、44]。21 世纪初，礁体平均相对高度 1~1.5m^[42]。2013 年，全为民等采用无人机航空摄影测量小庙洪的礁体斑块总面积减少至 0.2km^{2[44-46]}。

5、深沪湾牡蛎礁

深沪湾牡蛎礁分布于福建深沪湾海底古森林遗迹国家级自然保护区内。该处古牡蛎礁主要分布于中、低潮区，礁体长约 500m，最宽处约 200m，高约 20~40cm，由大小不同的牡蛎壳胶结而成。据中国水产科学研究院东海水产研究所 2020 年现场考察，保护区内仍分布有约几百平方米的活体牡蛎礁，造礁牡蛎种类为福建牡蛎。

6、珠江口牡蛎礁

珠江口天然牡蛎礁主要分布在珠海和江门台山附近海域。

珠海潮下带牡蛎礁主要在靠近澳门水域，潮间带牡蛎礁则沿珠海情侣路靠近渔女雕像附近较具规模，海泉湾附近有小蛎属牡蛎礁，此外南水镇以及金湾机场附近潮间带和潮下带都有少量礁体分布。该区域牡蛎礁特点是分布广，但单个礁区面积不大。潮下带礁体上的造礁物种以香港牡蛎和近江牡蛎居多，潮间带礁体上巨蛎属牡蛎和小蛎属牡蛎并存。

江门台山天然牡蛎礁主要分布在赤溪镇附近传统采苗区域，牡蛎种类主要为香港牡蛎、熊本牡蛎以及小蛎属牡蛎物种。

参考文献



[1]Tiffany Cheng, Bob Battalio, Sarah Newkirk, Kelly Leo, Walter Heady, Maya Hayden, Sam Veloz, Jenna Judge, Tara Ursell, Mary Small. Natural Shoreline Infrastructure: Technical Guidance for the California Coast [S].Funding was provided by the California Natural Resources Agency as part of California’ s Fourth Climate Change Assessment. Also produced under this study: Case Studies of Natural Shoreline Infrastructure.

[2] 黄宗国, 蔡如星 . 海洋污损生物及其防除 [M]. 北京: 海洋出版社 , 1984, 292-296.

[3] 王如才, 王昭萍 . 海水贝类养殖学 [M]. 青岛: 中国海洋大学出版社 , 2008, 141-146.

[4]Zabin, C. J., Wasson, K., & Fork, et al.. Restoration of native oysters in a highly invaded estuary. Biological Conservation, 2016, 202, 78-87.

[5]Morris R L, Bilkovic D M, Boswell M K, et al. The application of oyster reefs in shoreline protection: Are we over - engineering for an ecosystem engineer?[J]. Journal of Applied Ecology, 2019, 56(7): 1703-1711.

[6]Dunlop T, Glamore W, Felder S. Restoring estuarine ecosystems using nature-based solutions: Towards an integrated eco-engineering design guideline[J]. Science of The Total Environment, 2023, 873: 162362.

[7]Morris R L, La Peyre M K, Webb B M, et al. Large - scale variation in wave attenuation of oyster reef living shorelines and the influence of inundation duration[J]. Ecological Applications, 2021, 31(6): e02382.

[8]Spiering D, Kibler K M, Kitsikoudis V. Hydrodynamic change following living shoreline restoration based on a before-after-control-impact experiment[C]. World environmental and water resources congress, 2018. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2018, 54-64.

[9]Allen R J, Webb B M. Determination of wave transmission coefficients for oyster shell bag breakwaters[M]. Coastal Engineering Practice, 2011, 684-697.

[10]Wiberg P L , Taube S R , Ferguson A E , et al. Wave Attenuation by Oyster Reefs in Shallow Coastal Bays[J]. Estuaries and Coasts, 2018, 42(2):331-347.

- [11]Project Team for Identification of Natural Infrastructure Options for Adapting to Sea Level Rise. Natural Shoreline Infrastructure: Technical Guidance for the California Coast [R].
- [12]Chowdhury M S N, La Peyre M, Coen L D, et al. Ecological engineering with oysters enhances coastal resilience efforts[J]. Ecological Engineering, 2021, 169: 106-320.
- [13] 李碧全 . 海水贝类增养殖技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2009, 99-99.
- [14] 大自然保护协会 (TNC), 中国水产科学研究院东海水产研究所. 浙江省三门县牡蛎礁修复研究试点项目报告 [R], 北京: 2022.
- [15]Judge J, Newkirk S, Leo K, et al.. Case Studies of Natural Shoreline Infrastructure in Coastal California: A Component of Identification of Natural Infrastructure Options for Adapting to Sea Level Rise (California' s Fourth Climate Change Assessment) [R]. The Nature Conservancy, Arlington, VA. 2017.
- [16]Mohammed Shah Nawaz Chowdhury, Brenda Walles, SM Sharifuzzaman, et al.. Oyster breakwater reefs promote adjacent mudflat stability and salt marsh growth in a monsoon dominated subtropical coast[J]. Scientific Reports, 2019, (9): 2045-2322.
- [17]Scyphers S B, Powers S P, Heck K L Jr, et al., 2011. Oyster Reefs as Natural Breakwaters Mitigate Shoreline Loss and Facilitate Fisheries [J]. PLOS ONE 6(8):e22396.
- [18]Beck M W, Brumbaugh R D, Airoidi L, et al., 2009. Shellfish Reefs at Risk: A Global Analysis of Problems and Solutions [R]. The Nature Conservancy, Arlington VA. 52 pp.
- [19]Deepwater Horizon Natural Resource Damage Assessment Trustees, 2017. Deepwater Horizon Oil Spill Natural Resource Damage Assessment: Strategic Framework for Oyster Restoration Activities [R].
- [20]Jones S C, Tidwell D K, 2012. Comprehensive Shoreline Mapping, Baldwin and Mobile Counties, Alabama: Phase III [R]. Geological Survey of Alabama, Tuscaloosa, Alabama.
- [21]Ysebaert T, Brenda W, Haner J, et al., 2019. Habitat Modification and Coastal Protection by Ecosystem Engineering Reef-Building Bivalves [M]. In: Smaal A, Ferreira J, Grant J, et al. (eds) Goods and Services of Marine Bivalves. Springer, Cham. pp. 253-273.
- [22]Heck K, Cebrian J, Powers S, et al., 2012. Final Monitoring Report to the Nature

Conservancy: Coastal Alabama Economic Recovery and Ecological Restoration Project: Creating jobs to protect shorelines, restore oyster reefs and enhance fisheries productions [R]. Dauphin Island Sea Lab and University of South Alabama, Alabama.

[23] 大自然保护协会 (TNC), 中国牡蛎礁栖息地保护与修复研究报告 [R]. 北京: 2022.

[24] Wang H Y, Guo X M, Zhang G F, et al., Classification of jinjiang oysters *Crassostrea rivularis* (gould, 1861) from china, based on morphology and phylogenetic analysis [J]. *Aquaculture*, 2004, 242(1-4): 137-155.

[25] Wang H Y, Zhang G F, Liu X, et al., Classification of common oysters from north China [J]. *Journal of Shellfish Research*, 2008, 27: 495-503.

[26] Wang H Y, Qian L M, Liu X, et al., Classification of a common cupped oyster from southern China [J]. *Journal of Shellfish Research*, 2010, 29(4): 857-866.

[27] Wang H Y, Qian L M, Wang A M, et al., Occurrence and Distribution of *Crassostrea sikamea* (Amemiya 1928) in China [J]. *Journal of Shellfish Research*, 2013, 32(2): 439-446.

[28] 王海艳, 郭希明, 刘晓等. 中国近海“近江牡蛎”的分类和订名 [J]. *海洋科学*, 2007, 31(9): 85-86.

[29] 王海艳, 郭希明, 刘晓等. 中国北方沿海“褶牡蛎”的分类和订名 [J]. *海洋科学*, 2009, 33(10): 104-106.

[30] 王海艳, 张涛, 马培振等. 中国北部湾潮间带现生贝类图鉴 [M]. 科学出版社. 2016.

[31] 许飞. 小庙洪牡蛎礁巨蛎属牡蛎间生殖隔离研究 [D]. 中国科学院研究生院 (海洋研究所). 2009.

[32] 全为民, 安传光, 马春艳等. 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*, 2012, 43(5): 992-1000.

[33] 席英玉, 林娇, 林永青等. 福建闽南沿海养殖僧帽牡蛎中汞和砷的时空分布特征及风险评价 [C]. 福建省海洋学会, 2016 年学术年会论文摘要集. 2016, 17-18.

[34] 唐以杰, 林伟, 崔雪文等. 广东上川岛潮间带软体动物的分布 [J]. *动物学杂志*, 2004, 03: 60-67.

[35] 黄小芬. 上川岛牡蛎的初步调查 [J]. *动物学杂志*, 1994, 04: 51-52.

- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] 王福, 田立柱, 胡云壮等. 津冀沿海资源环境承载能力调查报告 [R]. 中国地质调查局天津地质调查中心, 2021, 1-676.
- [39] 王威, 李莉, 黎奥等. 近江牡蛎 (*Crassostrea ariakensis*) 规模化人工育苗及养成 [J]. 海洋科学, 2020, 44(02): 108-112.
- [40] 刘鲁雷. 东营垦利近江牡蛎礁现状调查与资源修复研究 [D]. 大连海洋大学. 2019.
- [41] 自然资源部北海局. 黄河口牡蛎礁生态系统现状调查报告 [R]. 2022.
- [42] 张忍顺, 齐德利, 葛云健等. 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), 2004a, 32(增刊): 21-26.
- [43] 张忍顺, 张正龙, 葛云健等. 江苏小庙洪牡蛎礁海洋地理环境及自然保护价值 [C]. 2004 年全国地貌与第四纪学术会议暨丹霞地貌研讨会、海峡两岸地貌与环境研讨会. 2004b.
- [44] 全为民, 周为峰, 马春艳等. 江苏海门蛎岬山牡蛎礁生态现状评价 [J]. 生态学报, 2016, 36(23): 7749-7757.
- [45] 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.
- [46] 全为民, 冯美, 周振兴等. 江苏海门蛎岬山牡蛎礁恢复工程的生态评估 [J]. 生态学报, 2017, 37(5): 1709-1718..



联系我们

邮箱：sunli@sio.org.cn

扫码下载手册全文