

牡蛎礁生态减灾 修复手册(试行)



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

大自然保护协会（美国）北京代表处

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

自然资源部北海生态中心

自然资源部海洋减灾中心

编制组成员

孙丽，程杰，于淼，程珺，全为民，李莉，谭勇华，王德刚，吕兑安，
莫微，王威，张祎，刘青，陈新平，王沈同，李楠楠，姜伟，范瑞良

目 录

Contents

1. 适用范围 01
2. 术语和定义 02
3. 修复原则 03
4. 项目总体流程 04
5. 本底调查 06
 - 5.1 调查目的 06
 - 5.2 调查区域 06
 - 5.3 调查内容和方法 07
6. 生态问题诊断 24
7. 修复目标 27
 - 7.1 中长期目标 28
 - 7.2 短期目标 29
8. 修复方案设计 30
 - 8.1 修复区选址 30
 - 8.2 修复方式选择 33
 - 8.3 修复方案设计 35
9. 修复措施 38
 - 9.1 消除威胁因素 38
 - 9.2 构建人工礁体 42
 - 9.3 补充牡蛎 48
 - 9.4 修复区域管护 57
10. 监测、效果评估和适应性管理 58
 - 10.1 生态修复监测 59
 - 10.2 生态修复效果评估 65
 - 10.3 适应性管理 67
- 附录 牡蛎礁的知识 70
 - 附录一 我国沿海常见牡蛎物种及分布 70
 - 附录二 牡蛎礁生态系统服务功能 74
 - 附录三 牡蛎礁修复案例 78
- 参考文献 87

前言

为贯彻落实习近平总书记 2018 年 10 月 10 日在中央财经委员会第三次会议上的讲话精神，提高自然灾害防治能力，自然资源部会同有关部门全面启动了海岸带保护修复工程建设，开展海洋生态保护修复、沿海防护林修复、新建和达标加固海堤及生态化建设以及连岛海堤、围海海堤或海塘整治改造，提升抵御台风、风暴潮等海洋灾害能力。为了指导和规范工程项目建设，自然资源部海洋预警监测司组织相关技术机构，编制形成了 21 项海岸带生态减灾修复系列标准，构建了工程技术方法体系。

近年来，全国海岸带保护修复工程有序推进，取得了良好的减灾效益、生态效益、社会效益、经济效益，有效提升了沿海地区抵御台风、风暴潮等海洋灾害能力。为更好的指导沿海地方科学有序推进海岸带保护修复工程，不断深化技术方法体系应用实践，2021 年自然资源部海洋预警监测司组织启动了滨海盐沼、海草床、牡蛎礁、砂质海岸生态减灾修复系列手册（以下简称生态减灾修复系列手册）编制工作。历经两年时间，编制单位结合海岸带保护修复工程实践，充分吸收国内外相关研究工作成果，编制完成了上述系列手册。

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、减灾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，通俗简明，可为沿海地方科学有序推进海岸带保护修复工程的建设与管理提供技术支撑。

1. 适用范围

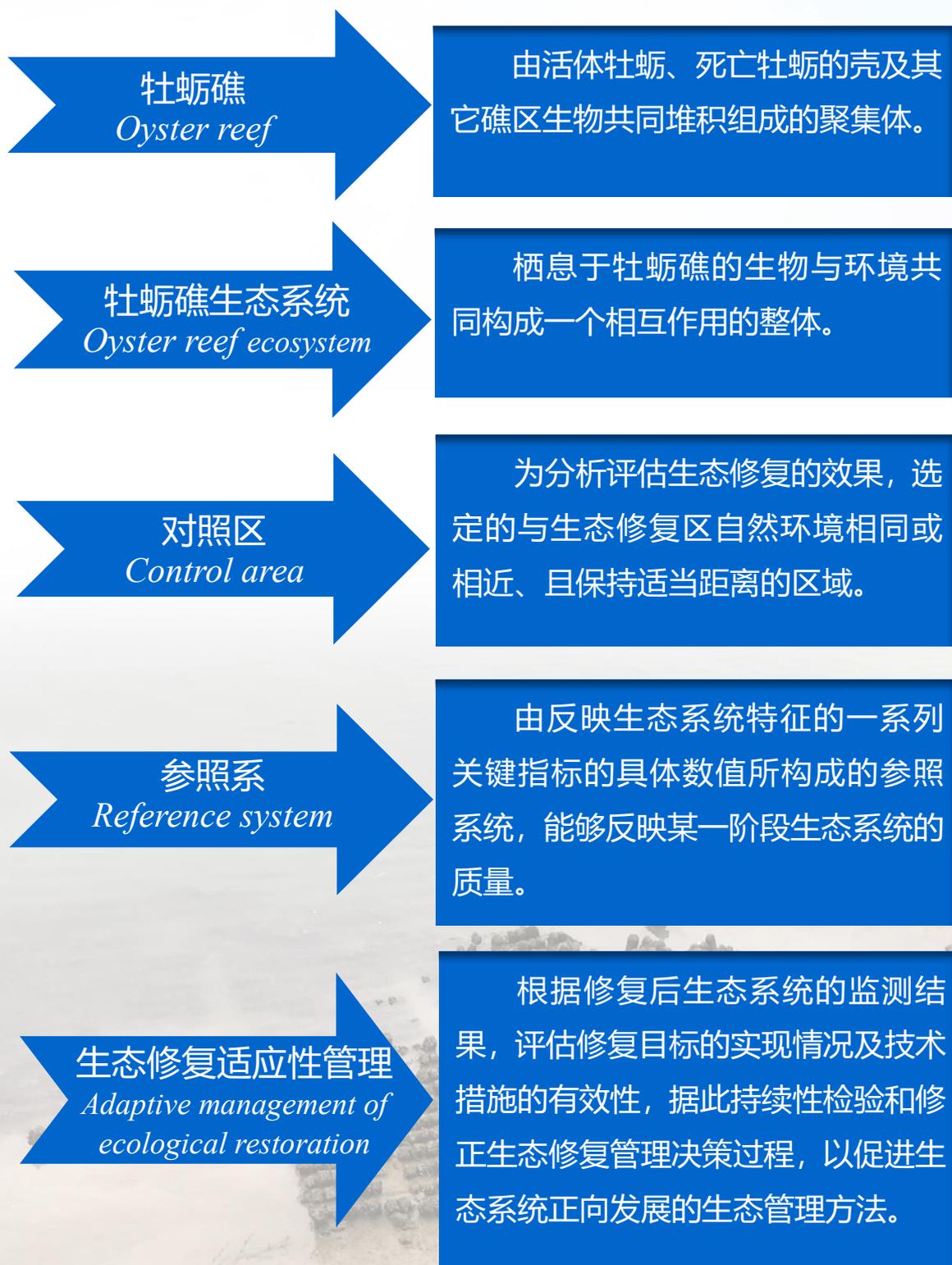
本手册给出了牡蛎礁生态修复原则、技术流程、本底调查、退化诊断、修复目标与修复方案设计、修复措施、跟踪监测、效果评估和适应性管理等内容。

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。



3. 修复原则

开展牡蛎礁生态修复应遵循以下原则：

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。

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和修复，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。

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。

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. 项目总体流程

牡蛎礁生态修复的工作内容包括本底调查、退化诊断、确定修复目标、确定修复方式、编制修复方案、实施修复工程、跟踪监测、效果评估、适应性管理等。项目实施流程如下（图 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；
- ◆ 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；
- ◆ 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；
- ◆ 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；
- ◆ 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；
- ◆ 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。

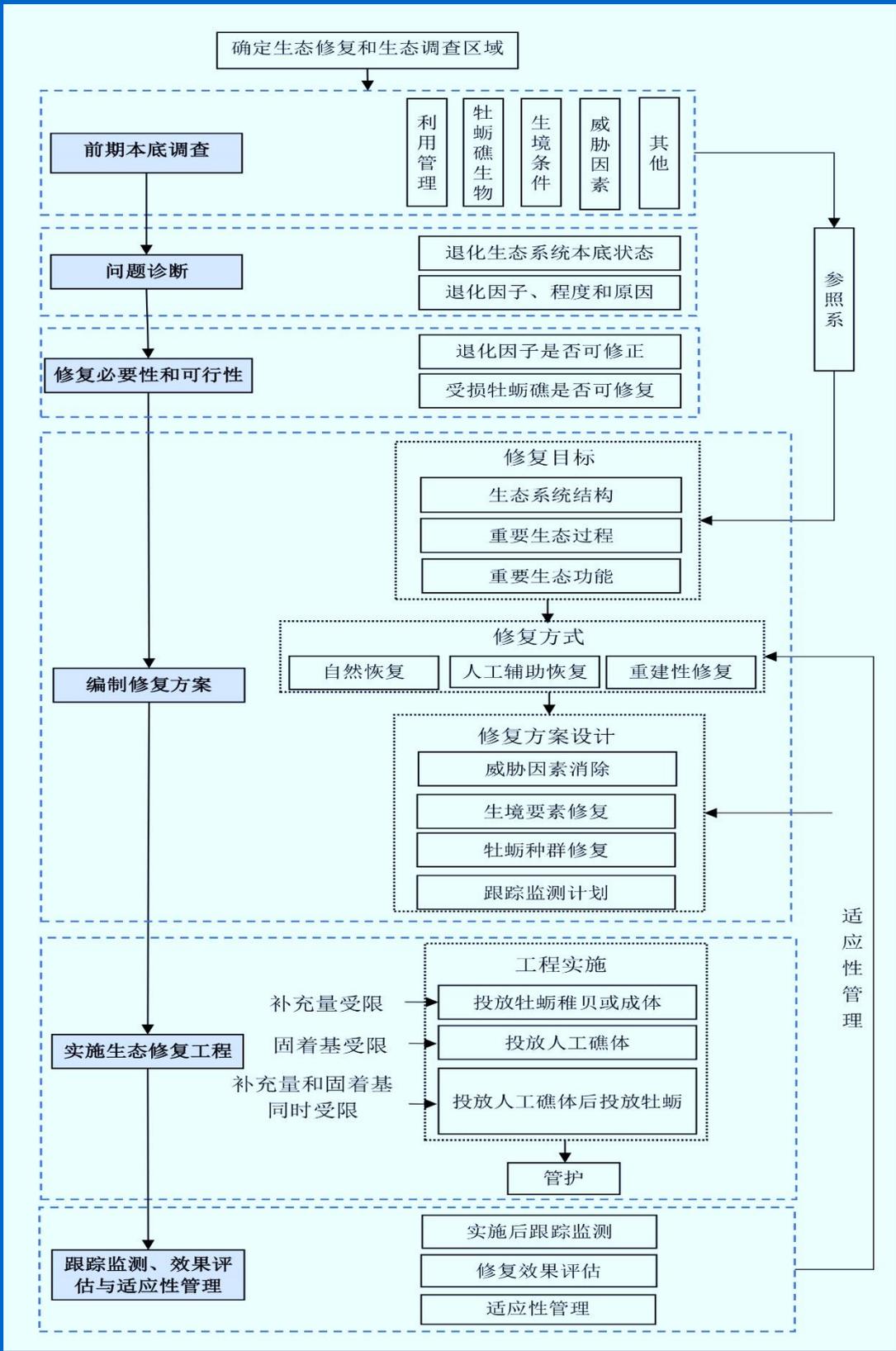


图 1 牡蛎礁生态减灾修复项目流程图

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、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 调查区域

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 5~10 倍修复区长度或直径。

5.3 调查内容和方法

生态本底调查的内容包括牡蛎礁、生物群落、环境要素、威胁因素等(表1), 可同时开展参照系和对照区的生态本底调查。

表1 牡蛎礁生态本底调查的内容和指标

类别	内容	调查要素	调查目的
牡蛎礁	礁体	牡蛎礁斑块面积、礁区面积、礁体高度	了解牡蛎礁的分布现状、礁体基本情况
	牡蛎	物种、密度、壳高、补充量、固着高峰期	了解牡蛎种群的生长状态, 判断牡蛎礁是否退化。补充量和固着高峰期调查的目的是明确修复方式和建礁时间, 补充量还能反应牡蛎幼虫生存及死亡等基本情况。
生物群落	浮游生物	种类、密度	了解生态系统质量, 诊断生态系统是否退化。浮游生物密度调查的目的是了解该区域牡蛎饵料是否充足。
	大型底栖生物	种类、密度、生物量	
	游泳动物	种类、密度、生物量	
环境要素	水质	水温、盐度、溶解氧、pH、悬浮物	诊断牡蛎的生境是否退化, 判断环境条件是否适合牡蛎生长以及种群建立, 为选划适宜的修复区域提供基础数据。
	底质环境	底质类型、沉积速率	
	水动力环境	水位、波高、流速、流向	
	地形	水深、坡度	
威胁因素	自然因素	捕食者、竞争者、病害、牡蛎入侵物种	为牡蛎礁退化原因诊断、消除威胁和生态修复后管护方案制定等提供依据。
	人为因素	捕捞、滤食性贝类养殖、海洋工程、污染排放	
保护、管理和利用现状	国土空间规划和开发现状	修复区域所有权属、使用现状, 国土空间规划, 其他重要生境保护现状等	明确开展牡蛎礁生态修复的政策可行性和区域协调性。
	生态修复项目开展情况	已开展的生态保护与修复相关项目进展及效果等	

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。现场调查每年集中调查至少 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。

(1) 牡蛎礁调查

牡蛎礁调查是生态本底调查的关键内容，主要通过现场调查的形式开展，调查内容包括牡蛎礁区和牡蛎个体。

① 牡蛎礁区调查

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面积（图 2）。根据牡蛎礁分布区域，牡蛎礁斑块面积调查方法有所不同。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（图 3）；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（图 4）。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。

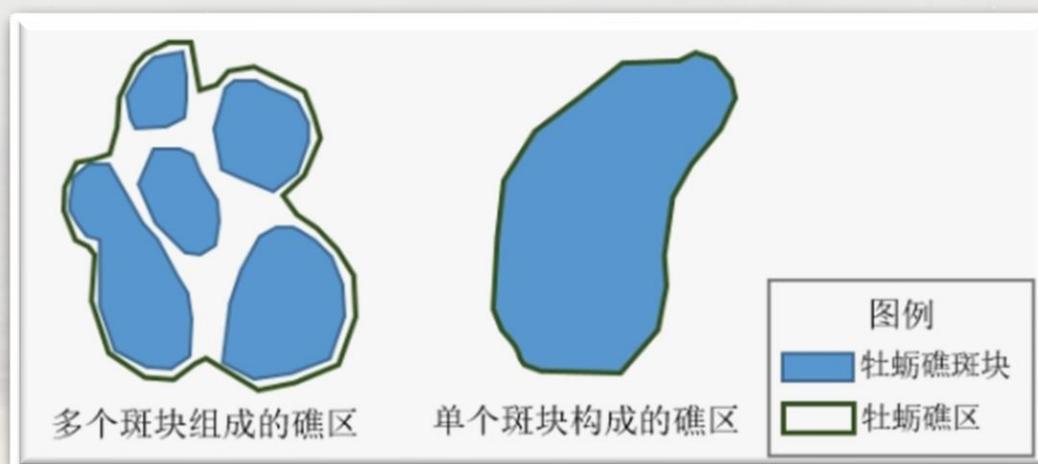


图 2 牡蛎礁斑块及牡蛎礁区示意图

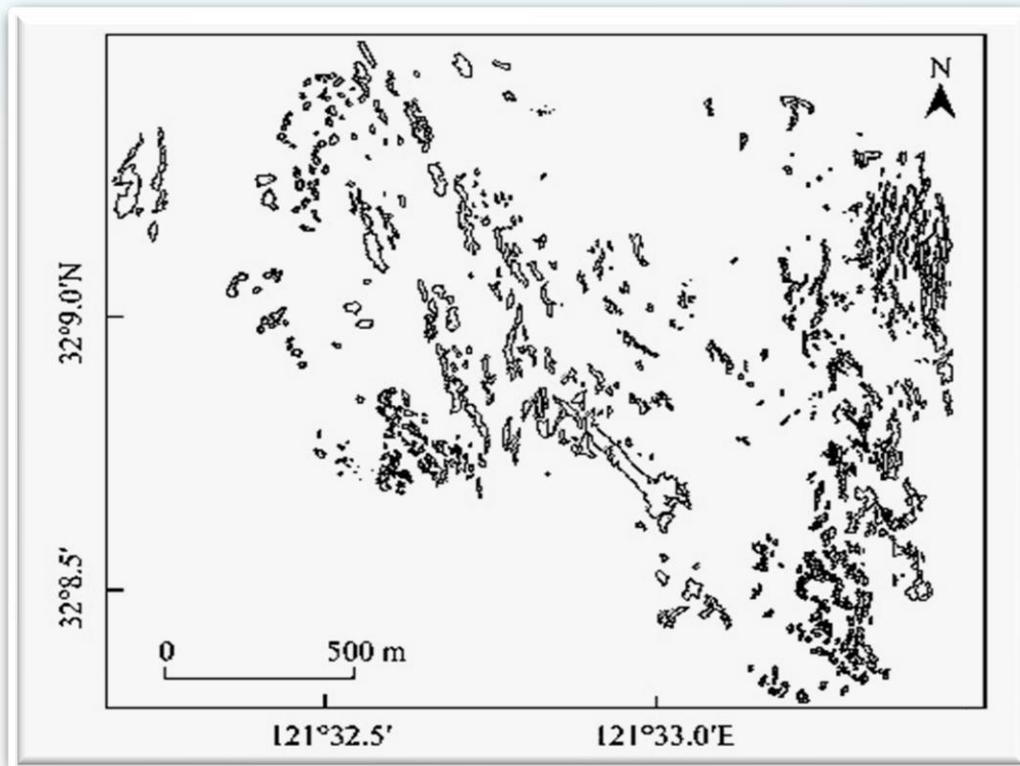


图3 无人机航拍解译的江苏海门蛎岬山潮间带牡蛎礁斑块分布图
(图源：中国水产科学研究院东海水产研究所 全为民)

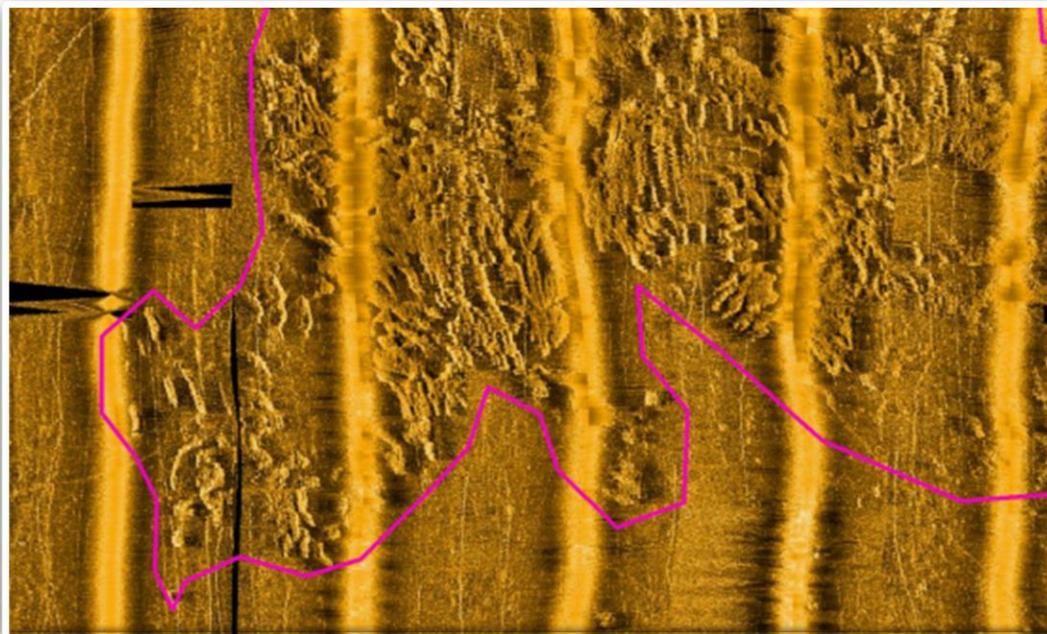


图4 采用单波束水深测量和侧扫声纳测量调查的大神堂牡蛎礁分布情况
(图源：自然资源部北海生态中心 张祎)

【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 20~50 m；礁脊或礁区长轴长度不大于 200 m 时，测点间隔 5~10 m。



潮间带牡蛎礁的礁体高度调查

(拍摄：自然资源部北海生态中心 张祎)

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、固着高峰期、补充量。主要采用现场调查的方法获取。

牡蛎礁调查断面布设原则

- 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；
- 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；
- 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；
- 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。

表 2 按牡蛎礁分布面积设置断面数量的要求

分布面积 hm ²	断面数量 条
≤100	2
> 100~≤500	≥3
> 500	≥4

表 3 按牡蛎礁分布长度设置断面数量的要求

分布长度 km	断面数量 条
≤1	2
> 1~≤3	≥3
> 3	≥4

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。

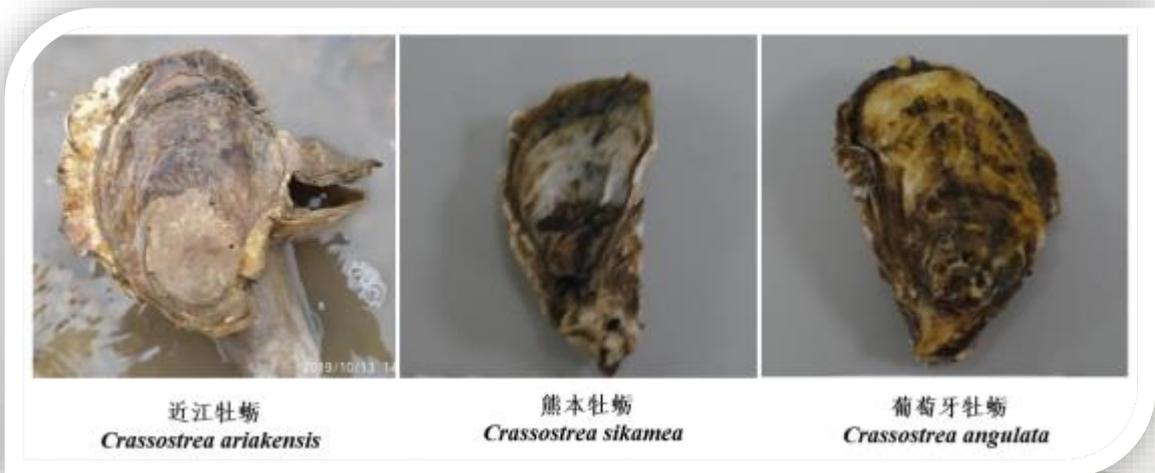


潮间带牡蛎礁采样

(拍摄: 自然资源部北海生态中心 张祎)



潮下带牡蛎礁采样 (拍摄: 中国科学院海洋研究所 王威)



近江牡蛎
Crassostrea ariakensis

熊本牡蛎
Crassostrea sikamea

葡萄牙牡蛎
Crassostrea angulata

三门县健跳港内 3 种牡蛎

(拍摄: 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。牡蛎补充量是指单位面积内牡蛎稚贝的数量。牡蛎补充量现场调查时间宜安排在牡蛎固着高峰期结束后 3~5 个月。牡蛎补充量的调查也可采用挂板调查, 在牡蛎固着高峰期前挂放, 固着高峰期结束后 3~5 个月内回收。



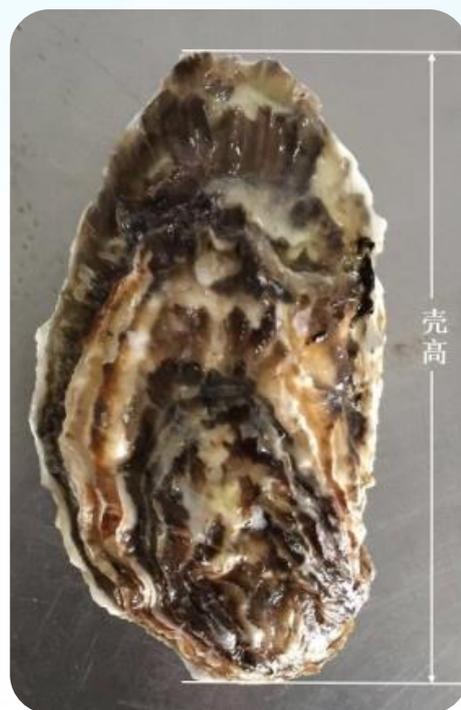
使用定量框调查牡蛎密度（拍摄：自然资源部第二海洋研究所 孙丽）



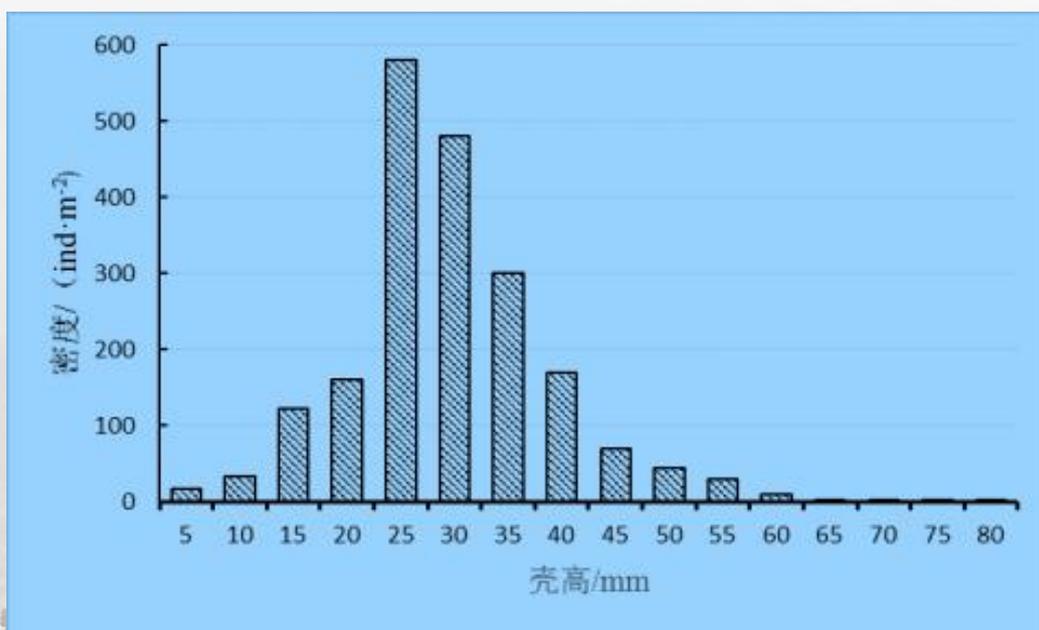
牡蛎稚贝（拍摄：自然资源部第二海洋研究所 孙丽）

【壳高调查】

大量的牡蛎壳高统计数据表现为牡蛎种群中牡蛎大小的分布情况，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。牡蛎壳高测量可以使用上述密度测量采集的牡蛎样本。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。



牡蛎壳高示意图



牡蛎壳高—频率分布图示例

【固着高峰期调查】

在牡蛎繁殖季节，进行牡蛎幼虫拖网或挂板调查。

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 μm 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 25~60 个/ m^3 时，可认为牡蛎处于固着高峰期。

牡蛎固着高峰期调查也可采用试板进行。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。



挂放试板（拍摄：中国科学院海洋研究所 许飞）



贝壳试板（拍摄：自然资源部第二海洋研究所 孙丽）

(2) 生物群落

生物群落能够反映牡蛎礁区的生物多样性及生态系统成熟程度，提供生态本底资料。调查要素应包括但不限于浮游生物、大型底栖生物、游泳动物的种类、密度、生物量等，通过现场调查获取。

(3) 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环境、底质环境、动力环境、水下地形等。

水质调查要素应包括但不限于水温、盐度、溶解氧、pH、悬浮物等。尽量收集历史资料，掌握平均数据和极值数据。同时至少每年春季开展一次现场调查，获取本底资料。

- ◆ 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的繁殖期适宜温度为 20~26℃，而分布在我国南方的香港牡蛎繁殖期适宜温度为 24~31℃。极端温度会抑制牡蛎的有氧代谢率，牡蛎可通过较低的无氧代谢维持数日。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偏高盐度海区，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。

底质环境调查要素应包括但不限于底质类型、沉积速率。底质类型通过现场调查获取，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，以及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，调查海洋沉积物在单位面积上堆积的厚度。现场调查应均匀布设测量点，测量相对周围底质的淤积厚度。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。

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评估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。通常牡蛎露空时间不超过 4 小时。
- ◆ 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。

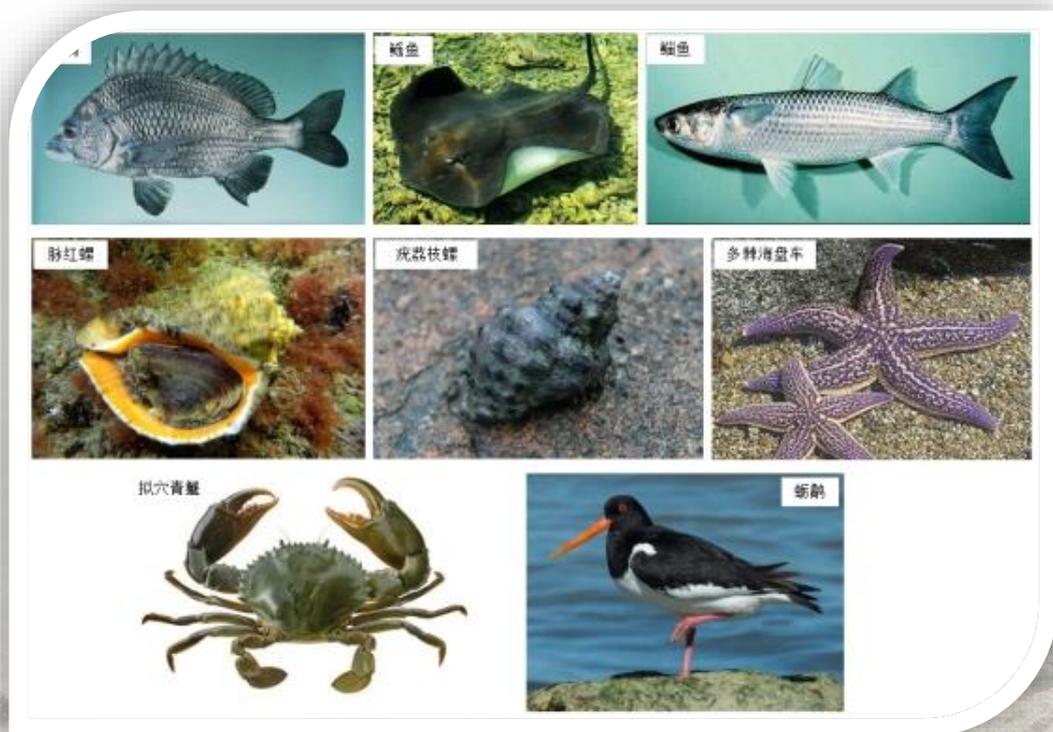
水下地形调查是为牡蛎礁生态修复前的设计阶段提供参考。

(4) 威胁因素

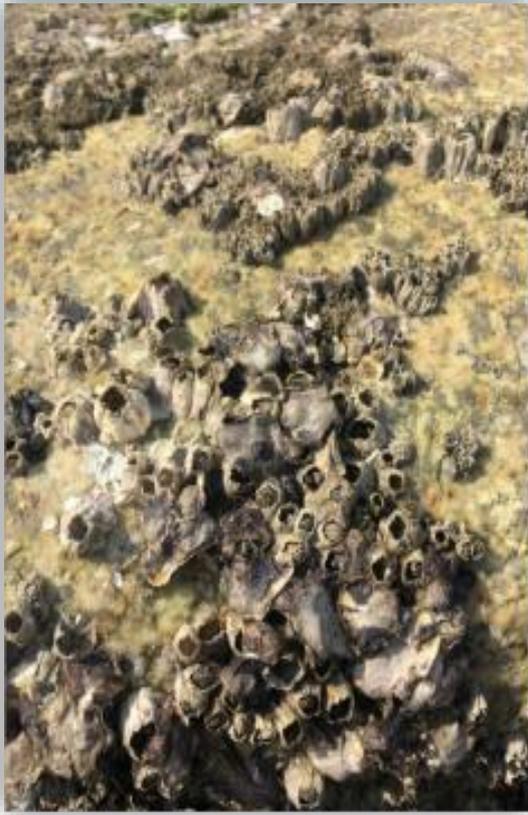
威胁要素调查能够反映自然因素和人为因素对牡蛎的影响程度，以及用于判定是否适合开展牡蛎礁生态修复。

自然因素调查应包括但不限于捕食者、竞争者、牡蛎病害。

- ◆ 捕食牡蛎的生物有黑鲷、鲹鱼、鲑鱼、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、藪枝虫、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。



牡蛎捕食者



藤壶和牡蛎相互挤占生存空间（拍摄：自然资源部第二海洋研究所 孙丽）

人为因素调查应包括但不限于捕捞、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捕转向大规模底拖网捕捞，对沿海牡蛎礁造成了严重破坏。海洋工程侵占了沿海牡蛎生存空间，海洋工程引起的沿海滩涂淤积也改变了牡蛎生境，对天然牡蛎造成了毁灭性的影响，牡蛎礁生态系统严重退化。



采挖后的牡蛎壳（拍摄：自然资源部第二海洋研究所 孙丽）



沿海牡蛎捕捞（图源：新华网）

(5) 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。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人工礁体、成体牡蛎和稚贝的供应能力。譬如岩石、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。

调查内容包括但不限于以下内容：

- ◆ 修复项目涉及的区域和周边区域的相关规划，包括国土空间规划、区域发展规划、生态红线区等；
- ◆ 海洋和牡蛎礁相关的保护管理现状，包括牡蛎礁保护的相关规定、开展修复项目的情况、自然保护地范围和管理等；
- ◆ 牡蛎礁生态修复技术，尤其是本地区内可采用的工程技术和措施，以及投入成本；
- ◆ 拟修复区的权属情况和行政管理部门；分析牡蛎礁生态修复潜在的社会影响（风险）和利益相关者。

6. 生态问题诊断

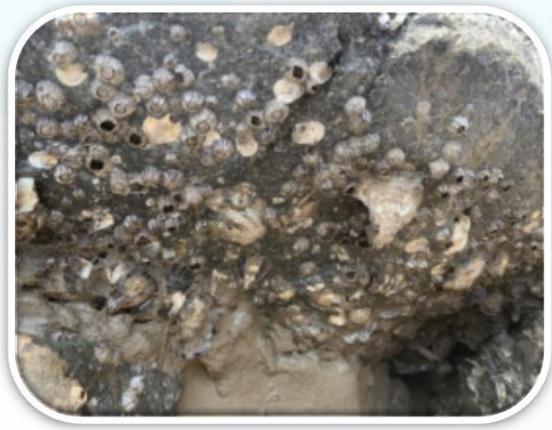
在生态本底调查的基础上，分析退化牡蛎礁和参照系牡蛎礁的状态，包括牡蛎礁健康状况、生物群落和生境条件的状态，条件允许时还可分析牡蛎礁重要生态过程和功能的状况。

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。对除牡蛎外的其他生物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 T/CAOE 20.7-2020。

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）。

常见的牡蛎礁退化表象：

- 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。



2021 年某海堤的堤脚镇压层曾有牡蛎固着
(拍摄：自然资源部第二海洋研究所 孙丽)

2022 年泥沙淤积导致牡蛎栖息地消失
(拍摄：自然资源部第二海洋研究所 孙丽)





被撬下的幼小牡蛎（拍摄：自然资源部第二海洋研究所 孙丽）

7. 修复目标

根据牡蛎礁退化诊断结果，确定生态修复的目标。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。

每个修复项目都应有明确的、具体的修复目标，可以包括生态效益目标、社会效益目标或经济效益目标。生态修复目标包括中长期目标和短期目标，两类目标均要明确实现的期限，并充分考虑生态系统及其参数的恢复轨迹，设定阶段性的目标。

因牡蛎既可以生长在潮间带，也可以生长在潮下带，牡蛎礁生态系统的不同服务功能有时不能完全同时体现，比如岸线防护功能通常需要将牡蛎礁布置于潮间带，而休闲渔业鱼类增殖功能和过滤水体功能则需要将牡蛎礁布置于潮下带。因此，在生态修复工程设计时，需要考虑该生态修复项目的主要目标和次要目标，确保项目完成后对生态修复效果进行评估的准确性和合理性。

7.1 中长期目标

中长期目标反映了经过一定时期修复后的牡蛎礁生态系统预期达到的状态及水平。总体上考虑生物群落、自然环境、重要生态过程和功能的恢复等方面内容，设定目标时明确对应的生态系统参数并量化其恢复的水平。

中长期目标的设定可参考以下内容：

- ◆ 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；
- ◆ 重要生态功能的恢复：净化水体、海岸带防护、消浪弱流、提高生物多样性、渔业增殖等。
- ◆ 设定中长期目标的实现期限时，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。

7.2 短期目标

根据中长期目标进一步明确修复项目在短期内要实现的具体目标。短期目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。修复项目短期目标的实现期限以 2~5 年为宜。

具体目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；
- 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；
- 海岸带防护：波浪衰减程度、海岸高程、岸线侵蚀速率等；
- 渔业增殖：特定生物的种类、密度、生物量等；
- 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。

设定生态修复目标时，应考虑以下几个方面：

- 开展牡蛎礁生态修复的愿景是，通过具体可操作的人为干预措施形成稳定的生物群落和生态系统，并提供与天然牡蛎礁相似的生态功能，实现生态系统层面的恢复。但现实中，人工修复的牡蛎礁通常难以与退化前或者天然牡蛎礁呈现完全相同的状态。因此，在设定修复目标时应注意目标的可实现性和科学性。
- 牡蛎礁是少有的仅靠一种或两种牡蛎物种即可支撑形成典型生物群落的一种栖息地。牡蛎的成礁特性和巨大数量是维系牡蛎礁生态系统结构和功能的基础。因此，牡蛎礁生态修复的关键目标是建礁牡蛎数量的恢复。
- 设定重要生态过程和生态功能的修复目标时，应明确对应的参数、表征和计算方法。

➤ 目标值的设定参考参照系的调查结果。

8. 修复方案设计

8.1 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，修复区宜选择在风浪（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海浪频发的区域。

修复区选址时需考虑以下因素：

➤ **牡蛎分布**

历史上或现在有牡蛎礁或牡蛎分布的海区，或对牡蛎礁生态减灾功能有需求且环境适宜的海区；

➤ **水温**

水温适宜牡蛎生存；

➤ **盐度**

盐度适宜牡蛎生存；

➤ **溶解氧**

连续 24h 中，16h 以上大于 5mg/L，其余任何时候不低于 3mg/L；

➤ **pH 值**

7.8~8.5；

➤ **地形**

地形平缓或平坦，坡度小于 5°；

➤ 水动力

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；

➤ 沉积速率

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；

➤ 底质类型

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^[1]。

➤ 牡蛎饵料

浮游植物供应充足；

➤ 捕食者

捕食者数量有限。

牡蛎的分布

牡蛎的分布范围广，除了寒带的某些海区外，在全球沿海均有分布。不同种类的牡蛎对温度和盐度的适应能力不同。

对温度的适应：牡蛎对温度的适应范围较广。近江牡蛎和长牡蛎在-3~32℃范围均能存活。

对盐度的适应：牡蛎对盐度的不同适应性是决定牡蛎水平分布和修复选址的重要因素之一。近江牡蛎、熊本牡蛎、香港牡蛎适宜在低盐度海区生存，长牡蛎和福建牡蛎适宜在相对高盐度海区生存。

表 4 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

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时候防止人工礁体造成淤积。

8.2 修复方式选择

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。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。

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新引入所有或大部分牡蛎种群。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 5 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

8.3 修复方案设计

8.3.1 生态减灾修复方案设计

(1) 修复地点水位设置

牡蛎礁能够有效阻减台风等极端天气对海岸的侵蚀，减缓岸线后退与海滩下蚀速度。牡蛎礁生态减灾的原理是，当礁体淹没于水下，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。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。

(2) 礁体材料

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。

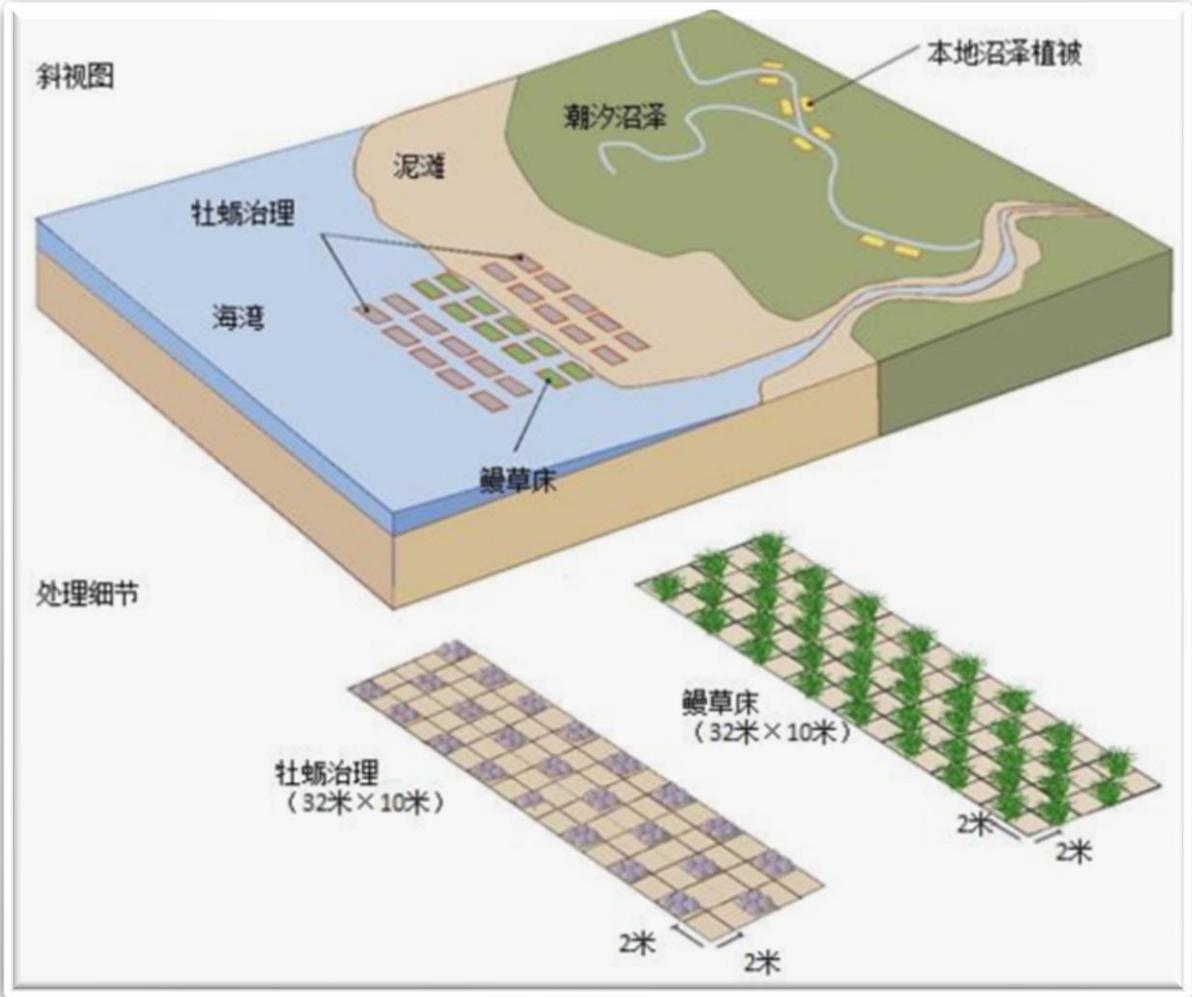
(3) 礁体高度设计

天然生长的牡蛎礁体高度有限，在以生态减灾为目的的牡蛎礁修复，应考虑礁体沉降后的实际高度。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%^[2]。

(4) 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。下图给出了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的模式。“离岸”的距离根据近岸实际水深情况来确定^[3]。

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。



牡蛎礁（近岸型+离岸型）配合海草床对海岸保护效果模式图（附图:布拉德·埃文斯/环境科学协会，引自《Natural Shoreline Infrastructure: Technical Guidance for the California Coast》）

(5) 生态减灾布局设计

以生态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）进行二维波浪模拟，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。在允许的情况下，牡蛎礁排布方向应与潮流方向垂直，使其发挥阻滞水流、消耗海浪能量的作用。

8.3.2 其他功能修复方案设计

以生物多样性或鱼类增殖功能为主的，宜将礁体构造出复杂的三维结构，为海洋生物提供栖息空间。

以提升水质功能为主的，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。



9. 修复措施

9.1 消除威胁因素

牡蛎礁的威胁因素有人为因素和自然因素。人为因素包括过度捕捞、水体污染等，自然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。

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。

龙港市设标禁止采挖牡蛎（拍摄：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

a) 非生物因素威胁的消除措施

盐度

各种牡蛎都有一定的适盐范围，超过适盐范围，体内外的渗透压会失去平衡，一般河口附近的近江牡蛎更易面临这种风险。在调查牡蛎补充量时或采苗期，如果固着基可移动，需将固着基移向深水区或远离河口的海区。

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。

风浪

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。

b) 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。

经济鱼类

牡蛎的敌害生物中，河豚、鲹类、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是经济鱼类，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^[4]。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°C 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°C 时，一般不会死亡^[5]。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 构建人工礁体

采用人工辅助方式进行牡蛎礁生态修复前，应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。

9.2.1 修复工程实施前的准备工作

(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 6 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。

9.2.2 补充牡蛎固着基

(1) 固着基的种类和制备

牡蛎的固着基质可以是天然岩礁、礁石块、牡蛎养殖区废弃的石条或水泥条、海堤镇压层、水工构筑物、牡蛎壳、扇贝壳、水泥构件等。具体材料的选择需要结合场地的底质、海况等条件，既要考虑材料环保、来源方便、经济耐用，又要考虑使用的固着基有一定的粗糙度，可固着面积大。尽管橡胶制品不能溶解于海水，但橡胶易老化产生污染，在生态系统修复工程中，不建议使用含橡胶的材料。

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。



常用固着基种类

固着基材料选取原则

- a) 尽量选择无污染、环保、坚固耐用、易获得、成本低的材料；
- b) 根据固着基材料的适用范围和优缺点选择使用；
- c) 对不同固着基材料进行试验，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。

修复地点位于潮间带的，应在低潮时将固着有牡蛎的固着基摆放或固定在礁体表面。修复地点位于潮下带的，固着基为混凝土构件、固化后的粉煤灰、石头、袋装贝壳等，在低平潮时从船上将固着基缓慢吊放至礁体表面；固着基为贝壳绳串等，应潜水投放，并采取措施将固着基固定在礁体表面。

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；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。

【案例】潮间带人工礁体构建

见“附录四 浙江三门健跳港牡蛎礁修复研究试点项目”。

【案例】潮下带人工礁体构建

河北省唐山市乐亭县海域以粉砂为主，2016年起在祥云湾附近海域开展了潮下带牡蛎礁生态修复工作。因当地牡蛎补充量充足，采用投放块石、混凝土构件等措施构建人工礁体，增加牡蛎固着基。



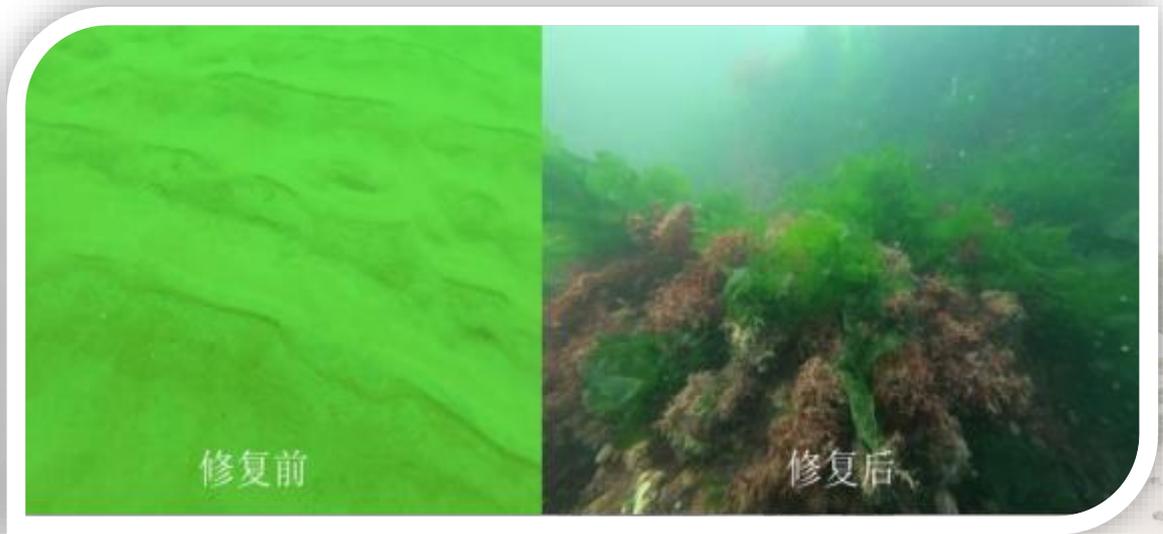
圆台形钢框岩石礁体（拍摄：唐山海洋牧场有限公司 张云岭）



中矩形混凝土构件礁体（拍摄：唐山海洋牧场有限公司 张云岭）



潮下带人工礁体投放 (拍摄: 唐山海洋牧场有限公司 张云岭)



修复前后对比图 (图源: 唐山海洋牧场有限公司 张云岭)

9.3 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牡蛎。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。

天然基岩



防浪堤堤脚



水工构筑物



水工构筑物



牡蛎固着基质示意图（拍摄：中国水产科学研究院东海水产研究所 全为民）

9.3.1 补充牡蛎成体

(1) 来源

牡蛎成体可使用筏式养殖的牡蛎或人工滩养的牡蛎。

(2) 运输

随捕随运。一般采用干运法，气温 15°C 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°C，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。

(3) 投放

牡蛎单体尽量使用网袋、网笼等固定，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礁体上；固着于条石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。

【案例】长江口牡蛎礁修复^[6]

长江口牡蛎礁修复开始于 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^[7-10]，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。



修复后的长江口牡蛎礁（拍摄：中国水产科学研究院东海水产研究所 全为民）

9.3.2 补充牡蛎稚贝

(1) 育苗场育苗

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 1~2cm 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。



附苗前的固着基制备（拍摄：中国科学院海洋研究所 李莉，王威）



育苗池附苗 (拍摄: 中国科学院海洋研究所 黎奥)



A



B

图1 附苗的固着基

(拍摄: 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风浪较平静的海湾，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，插杆采苗以软泥底为宜，投石采苗以较硬的砂泥底为宜，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 4h 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 7d 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 7 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>	4~7 月 9~11 月	24~31°C	3~20
福建牡蛎（原葡萄牙牡蛎） <i>Crassostrea angulata</i>	4~10 月	22~30°C	20~30
长牡蛎 <i>Crassostrea gigas</i>	5~8 月	20~26°C	20~30
熊本牡蛎 <i>Crassostrea sikamea</i>	6~8 月	20~28°C	18~35
近江牡蛎 <i>Crassostrea ariakensis</i>	5~8 月	24~31°C	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。



立石采苗 (拍摄: 自然资源部第二海洋研究所 孙丽)



栅式采苗 (拍摄: 自然资源部第二海洋研究所 孙丽)



水泥制件采苗

(拍摄：自然资源部第二海洋研究所 孙丽)



扇贝壳装笼采苗

(拍摄：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°C 以下，运输时间 8h 以内；气温 7°C 时，运输时间 10h，牡蛎稚贝成活率仍可达 90% 以上^[11]。

(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，应避免中午烈日暴晒时间。必要时，可使用网兜、麻绳等固定。

9.4 修复区域管护

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。

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。



10. 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 生态修复监测

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 1。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。



表 8 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确定的硅钼黄法或硅钼蓝法		★	★
	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确定的萘乙二胺分光光度法		★	★
	铵盐	按照GB 17378.4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4.2.3节	★	★	★
	礁区面积	参考本文件 4.2.3 节	★	★	★
	礁体高度	参考本文件 4.2.3 节	★		★
	牡蛎密度	参考本文件4.2.3节	★	★	★
	牡蛎补充量	参考本文件 4.2.3 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	★		★

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
		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。 $CI = \frac{FT}{FS} \times 100\% \dots\dots\dots (1)$ 式中： <i>CI</i> ——牡蛎肥满度； <i>FT</i> ——牡蛎干肉重，单位为克（g）； <i>FS</i> ——牡蛎干壳重，单位为克（g）。			
	壳高	参考本文件 4.2.3 节	★		★
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。



人工礁体固着效果监测（拍摄：自然资源部第二海洋研究所 程杰）



人工礁体固着效果监测 (拍摄: 自然资源部第二海洋研究所 程杰)



新生自然牡蛎礁区生物量评估 (拍摄: 中国科学院海洋研究所 王威)

10.2 生态修复效果评估

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，可参照表 8 的监测指标和适用范围。评价指标应与监测参数对应并明确计算方法。

生态修复效果评估指标的选取原则

- a) 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；
- b) 以提升水质为目的的生态修复，效果评估应重点选取水环境指标；
- c) 以修复牡蛎礁生境为目的的生态修复，效果评估应重点选取牡蛎礁指标；

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、水质改善情况、海岸带防灾减灾程度、威胁因素消除效果等。

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。

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 9 进行适应性管理。

表 9 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。

附录 牡蛎礁的知识

附录一 我国沿海常见牡蛎物种及分布^[6]

牡蛎是沿海常见的双壳类软体动物，目前已报道我国沿海分布有 30 多种牡蛎，中国科学院海洋研究所对其中常见牡蛎物种的分布进行了系统地厘清^[12-18]。由于牡蛎壳在生长过程中容易因受到挤压呈现不同的形状，即使同种牡蛎，其外形差异也很大。因此仅依靠外形很难准确鉴定牡蛎物种，一般需要结合形态特征和现代分子生物学技术对牡蛎进行分类。

1、巨蛎属 (*Crassostrea*)

我国自然分布的巨蛎属 (*Crassostrea*) 牡蛎物种主要有长牡蛎 (*Crassostrea gigas*)、福建牡蛎 (*Crassostrea 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 (图 1-1)，同时也是常见的牡蛎礁造礁物种^[19,20]。



图 1-1 我国沿海常见的牡蛎物种形态特征^[12,14]，(A) 长牡蛎 (潍坊)；(B) 福建牡蛎 (莆田)；(C) 香港牡蛎。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)。

长牡蛎自然分布在长江以北沿海的潮间带与潮下带，最南端分布在江苏连云港，是中国辽宁、河北、山东、江苏等省份的主要养殖贝类。长牡蛎壳型不规则，近长三角形或椭圆形等，壳表有波纹状鳞片、左壳有放射肋，呈淡青色、黄色及褐色等^[13]。

福建牡蛎在较早的文献中被称为葡萄牙牡蛎，后经研究发现欧洲的葡萄牙牡蛎很可能是于十六世纪从中国引入葡萄牙的。福建牡蛎主要分布于长江口以南、浙江至海南沿海潮间带及潮下带浅水区，与长牡蛎的亲缘关系较近，被认为是其亚种，是中国南方的主要养殖贝类之一^[14]。

近江牡蛎广泛分布于我国沿海河口区，北自中朝边境的蜆子江，南至海南岛都有分布。近江牡蛎在两广地区被称为“红蚝”，壳呈明显的杯状凹陷结构，外壳呈灰白色，夹杂有黄色、褐色、紫色等条带。目前由于种群退化，在北方仅在某些大河河口潮下带深水区仍存在近江牡蛎野生种群。2021年自然资源部北海局在黄河口开展了牡蛎礁现状调查，主要造礁牡蛎为近江牡蛎（图 1-2）。



图 1-2 在黄河口采集到的牡蛎样本（拍摄：自然资源部北海生态中心 张祎）

香港牡蛎主要分布在广东以南沿海的潮间带低潮位及潮下带区，是中

国广东、广西等地的主要养殖贝类。香港牡蛎俗称“大蚝”、“白蚝”，外形与近江牡蛎极为相似，在部分养殖海域两者经常共生。与近江牡蛎相比，香港牡蛎韧带槽较长、壳顶腔较深、壳较长^[21]。

熊本牡蛎主要分布在长江口以南沿海，是中国南方沿海潮间带除福建牡蛎外的另一重要经济物种，分为两种类型。一种为较大个体，长圆型或椭圆型，右壳面有脆弱的生长鳞片，一种为小型个体，壳型不规则，壳面为青色、白色，有的夹杂有褐色条纹^[21-22]。

2、小蛎属 (*Saccostrea*)

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^[23-25]。多刺牡蛎壳型较小，侧扁，多呈卵圆形或卵三角形，壳面通常呈黑紫色，具有管状棘刺或少数鳞片，棘刺的多少随不同个体而变化^[26]。这种牡蛎是南方沿海潮间带最常见种类，数量巨大，但不易成礁，一般为野生采捕的对象，无人工养殖^[18]。



图 1-3 福建沿海潮间带分布的刺牡蛎 (拍摄：自然资源部第二海洋研究所 孙丽)

3、牡蛎属 (*Ostrea*)

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^[27], 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, 其具体分布范围不详。主要特征为壳面密生鳞片, 壳大型、厚、扁平近圆形, 外壳面灰色, 无人工养殖^[18,24,28]。



附录二 牡蛎礁生态系统服务功能^[6]

牡蛎礁具有改善水质、提升生物多样性、增加渔业产量和防护海岸线等生态系统服务功能（图 2-1），又被称为“温带的珊瑚礁”。



图 2-1 牡蛎礁生态系统服务功能（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））

1、净化水体、移除水体中营养物

牡蛎作为滤食性的双壳类动物，主要摄食水体中的浮游植物及悬浮颗粒（包括生物碎屑及悬浮泥沙）。它的滤食活动将水体中的微藻、悬浮颗粒等吸收进体内，可消化的部分经代谢吸收转化为自身组织，代谢废物排泄至海底，而不能消化吸收的物质和颗粒则以假粪便的形式排出并沉积。这一系列过程减少了水体中的悬浮微粒和多余营养物，提高了水体清澈度（图 2-2）。研究显示，墨西哥湾河口历史上庞大的牡蛎种群能够在水体滞留时间内过滤整个河口体积的水体^[38]。



图 2-2 香港牡蛎 (*Crassostrea hongkongensis*) 在实验室环境下 40 min 的滤水效果 (拍摄: Sally Lau) 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)

此外，沉积到海底的有机物也会刺激底栖细菌群落通过反硝化作用将沉积物中的硝酸盐转化为惰性氮气，从而进一步移除水体中的含氮有机物^[39]。Humphries 采用原位监测方法对比修复的牡蛎礁生境与光滩的反硝化作用速率，结果显示在牡蛎礁沉积物上测得的反硝化速率比光滩沉积物高 20 倍以上^[40]。

2、提高生物多样性

牡蛎礁提供的三维结构也为其他生物提供了栖息环境，比如为固着生活的动物提供固着基，为小型的鱼、虾、蟹等动物提供躲避捕食者的缝隙。再加上微粒沉积带来丰富的食物供应，使牡蛎礁成为多种幼鱼、甲壳类动物和其他生物的理想家园。研究显示，在牡蛎礁上发现的物种数量和丰度通常远超过周围的软质沉积物环境^[41-43]。此外，牡蛎礁过滤水体和稳定沉积物的作用还有助于促进水下植被如海草的生长恢复^[44]。

一项对比美国北卡罗莱纳州不同海岸带栖息地生态系统服务功能的研究发现，牡蛎礁上的次级生产力最高，依次高于同区域的盐沼湿地、海草床、潮间带和潮下带滩涂^[45]。而类似的研究结果也在北美西海岸得到证实。经对比，牡蛎礁对大型底栖无脊椎动物的多样性、密度和生物量带来的栖息地效益高于盐沼湿地^[46]。

3、渔业增殖

牡蛎礁因其栖息地效益，能够带来渔业资源增长。全为民等对江苏省海门蛎岬山的牡蛎礁恢复工程进行评估，礁体构建后 1 年后修复的牡蛎礁中大型底栖动物的平均总密度和生物量接近于自然牡蛎礁，大型底栖动物的平均总密度是未恢复区的 6.1 倍，平均总生物量比未恢复区高出 3.1 倍（图 2-3）^[47]。根据 zu Ermgassen 研究估算，在美国墨西哥湾地区，对比没有礁体的滩涂，每平方米的牡蛎礁每年能增加约 397g 的鱼类、甲壳类动物产量，其中褐美对虾（Brown Shrimp, *Farfantepenaeus aztecus*）、白滨对虾（White Shrimp, *Litopenaeus setiferus*）、石蟹（Stone Crab, *Menippe mercenaria*）、羊头鲷（Sheepshead, *Archosargus probatocephalus*）等都是该区域重要的渔业经济物种^[42]。

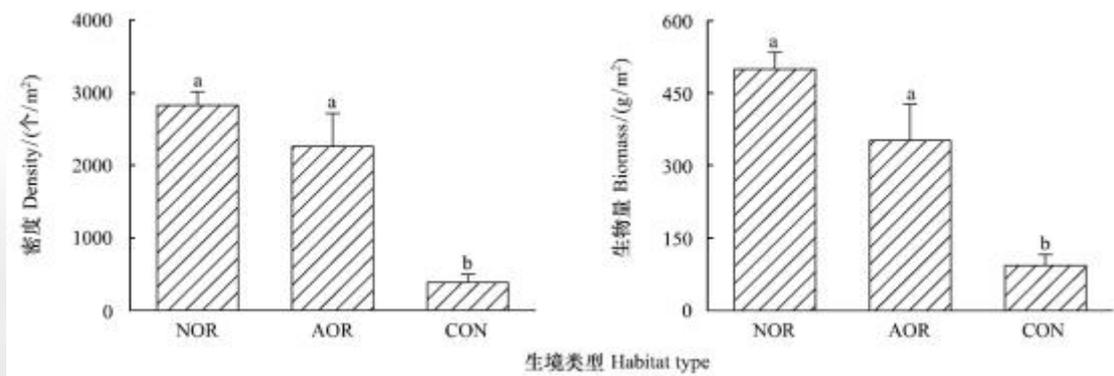


图 2-3 2014 年 5 月（牡蛎礁修复一年后）不同类型生境中大型底栖动物平均总密度和生物量的比较

NOR:自然牡蛎礁，AOR:恢复牡蛎礁，CON:对照区（未恢复区）。误差棒表示 $\pm 1SE$ ，不同小写字母表示在生境类型间具有显著性差异（ $P < 0.05$ ）

4、海岸带防护

牡蛎礁还具有海岸带防护的作用，它消减海浪能、减少岸线侵蚀，并在一定程度上抵御风暴带来的洪水灾害。其护滩促淤的效果也为盐沼湿地的生长提供了合适条件。另外，牡蛎礁会随着海平面上升而向上方生长，增强了海岸线应对气候变化的弹性^[48]。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。旧金山湾生态岸线试点项目在潮间带近潮下带区域修复的牡蛎礁和海草床，不仅提高了生物多样性，而且减少了 30% 的波浪能^[49]。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（图 2-4）^[50]。

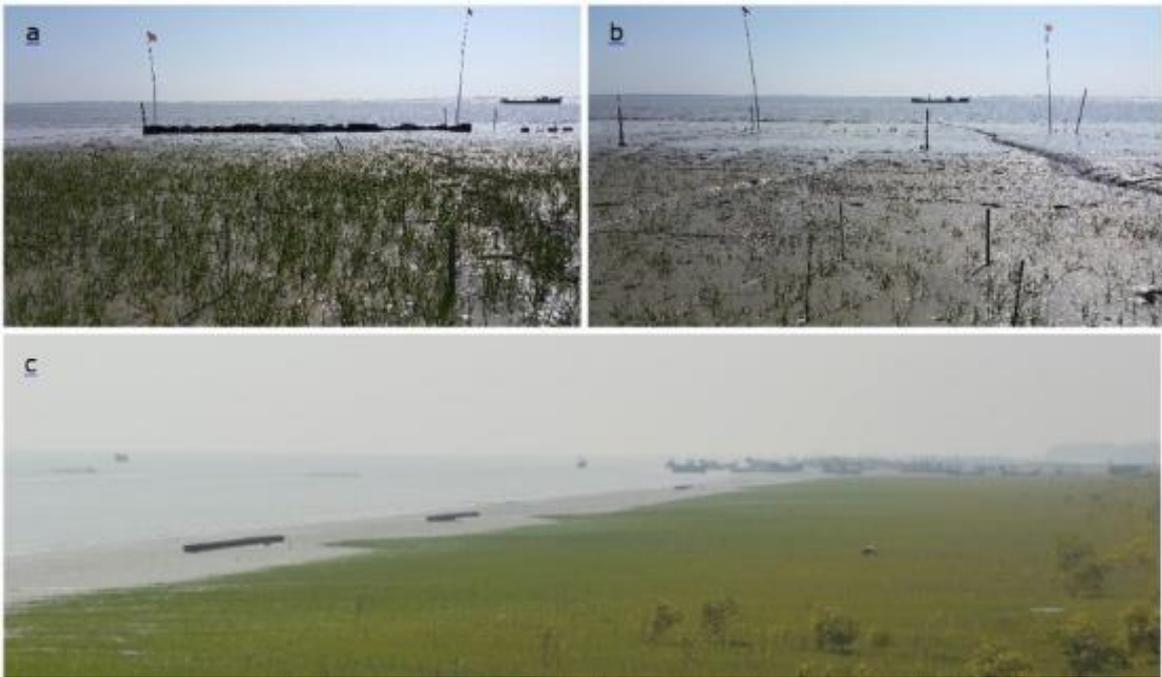


图 2-4 2017 年 12 月拍摄的牡蛎礁 (a) 和对照区 (b) 的盐沼植物生长差异，以及 2019 年 2 月拍摄的盐沼向海扩张情况

附录三 牡蛎礁修复案例

【浙江三门健跳港牡蛎礁修复研究试点项目】^[51]

1、环境情况

三门湾是浙江东部的半封闭海湾，从湾口至湾顶纵深 42km。为强潮海湾，港内港汊纵横，潮滩发育。海域和潮滩物质以细粒物质为主，主要为粘土质粉砂，是长江入海悬浮物质沿岸南下或附近海域再悬浮物质由潮流带入湾内淤积的结果。健跳港是三门湾内的一条狭长而弯曲的内湾，强潮由口门至湾顶、港汊时流速减弱，悬沙含量变少，颗粒变细。由于健跳港湾顶腹地大，有较大的纳潮量，落潮流大于涨潮流，使得健跳港湾顶处于缓慢淤涨状态^[52]，滩涂硬实。

健跳港湾顶的铁强村海域野生牡蛎资源丰富，滩涂上的砾石为牡蛎生长提供了固着条件(图 3-1)，附近的滩涂因此被称为“蛎江滩”。上个世纪 80 年代，当地村民在滩涂上堆插石条，利用湾内野生牡蛎苗种，开展牡蛎养殖(图 3-2)。



图 3-1 铁强村附近海域的天然牡蛎 (拍摄：自然资源部第二海洋研究所 孙丽)



图 3-2 浙江省三门县健跳港上游湾区滩涂上传统的牡蛎石条养殖（拍摄：大自然保护协会（TNC）程珺）引自《浙江省三门县牡蛎礁修复研究试点项目报告》/大自然保护协会（TNC）、中国水产科学研究院东海水产研究所。

2、修复实施情况

2019 年，在中国水产学会和三门县农业农村局的支持下，大自然保护协会（TNC）与中国水产科学院东海水产研究所在健跳港湾顶的滩涂区启动了牡蛎礁修复研究试点项目，研究区面积 1hm^2 ($100\text{m}\times 100\text{m}$)（图 3-3）。



图 3-3 牡蛎礁修复研究试点项目位置图（引自《浙江省三门县牡蛎礁修复研究试点项目报告》/大自然保护协会（TNC）、中国水产科学研究院东海水产研究所。）

(1) 本底调查

项目区底质是由泥沙、碎石子、碎沙和贝壳碎屑构成的硬质滩涂，地势缓慢倾斜，落差约 1m。受蛎江滩上游溪流注入影响，海水平均盐度约 13.9，平均水温 26.1℃，平均总悬浮物为 74.2mg/L，平均叶绿素 a 浓度为 1.9mg/m³。

(2) 修复方案设计

基于当地牡蛎补充量充足、滩涂底质较硬、水体流速快的特点，采用补充固着基的方式实施牡蛎礁修复研究。固着基材料使用成本低且易获得的石块（直径 10~30cm）。因当地牡蛎种类以熊本牡蛎为主，将修复地点设置于潮间带。为减少泥沙淤积，各礁体的长边方向与潮流方向一致。

(3) 礁体构建

2019 年和 2020 年共构建了 19 个不采收的牡蛎礁体(约 1m 高、2m 宽) (图 3-4)。

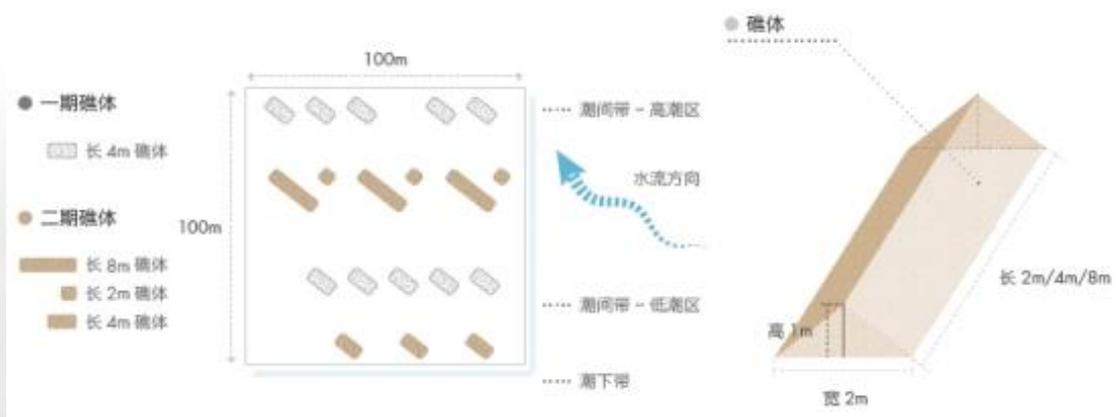


图 3-4 19 个礁体投放位置及礁体形状示意图。引自《浙江省三门县牡蛎礁修复研究试点项目报告》/大自然保护协会 (TNC)、中国水产科学研究院东海水产研究所。

(4) 修复效果监测

牡蛎礁修复试验实施后连续三年开展了跟踪监测。监测数据显示，一期礁体自 2019 年构建后，礁体上的定居性大型底栖动物密度显著高于未修复

区。一期礁体生长的第三年，5月和10月的定居性大型底栖动物平均密度分别约为270个/m²和240个/m²，约为未修复区的20倍和120倍。

经过2-3年的生长，修复的牡蛎礁逐年获得可持续的野生牡蛎幼苗补充，且礁体上的牡蛎呈现多龄级结构，已趋向形成较为稳定的牡蛎群落。



图 3-5 2020 年构建的人工礁体和 2021 年牡蛎固着情况（拍摄：中国水产科学研究院东海水产研究所 全为民）

【黄河三角洲牡蛎礁修复】^[6]

1、环境情况

黄河三角洲指位于渤海南部的黄河入海口沿岸地区，即以垦利宁海为顶点，北起套尔河口，南至支脉沟口的扇形地带，涵盖了东营市及其管辖的海域范围。近年来调查发现，黄河三角洲及两翼地区（包括莱州、潍坊、东营、滨州等地）分布着由长牡蛎及在中国北方海域濒临灭绝的近江牡蛎形成的天然牡蛎礁（见附录二）。由于气候变迁及过度采捕，由近江牡蛎组成的牡蛎礁资源退化较为严重，现存可观测的活体牡蛎礁多为零散块状分布的长牡蛎礁体。

2、修复实施情况

2019年起，在中国科学院战略性先导科技专项（A类）“美丽中国生态文明建设科技工程”的资助下，中国科学院海洋研究所在东营市河口区开展了牡蛎资源修复及牡蛎礁生态系统重构技术研发与示范。

(1) 本底调查

pH 值变化范围为 8.12~8.27，均值为 8.17；盐度变化范围为 26.094~29.552，均值为 27.7104；溶解氧浓度变化范围为 (7.2~8.99) mg/L，均值为 7.905mg/L；水深为 1.0~3.0m，平均水深为 2.49m。沉积物类型以砂为主，主要类型为砂质粉砂 ST 和粉砂 T 为主。

(2) 修复方案设计

黄河三角洲区域底质松软，投放硬相基质存在下陷风险；悬浮泥沙含量高，沉积速率快，导致苗种固着、牡蛎生长、存活和繁殖效率低。中国科学院海洋研究所贝类研发团队考虑到上述不利因素，采用生态构礁、苗种定量采集、礁体浮式和桩式快速生长技术，创新设计了一种生态型牡蛎礁快速构建方法。将多个已固定扇贝或牡蛎壳的棕绳捆扎在一起，组成一个牡蛎固着基。在牡蛎繁殖期，将该固着基放置于有浮筏的海域进行采苗。完成采苗后，将该固着基转移至饵料丰富的海区进行适应性暂养。第二年春季，当待牡蛎个体达到壳高 6~10cm，在牡蛎繁殖季节前将该牡蛎礁核转移至修复海域。牡蛎礁核的固定方式有浮式和锚桩固定两种方式。该生态型牡蛎固着基材料（图 3-6）自重较轻，降低了混凝土等礁体的沉降的风险，且礁体附苗效率高，生物量可控。



图 3-6 项目团队制备的生态型牡蛎礁核 (拍摄：中国科学院海洋研究所 丛日浩)

(3) 实施修复

2020 年，中国科学院海洋研究所与当地水产公司合作，在东营市河口区新户北部海区不同潮位构建了两个牡蛎礁区，礁区总面积 7.5hm^2 。利用人工辅助增殖的牡蛎制备成牡蛎生态礁，在两个牡蛎礁区中共投放了 271 块礁核，构建了 6 个方形礁群、13 个环形礁群和 6 个长方形礁群 (图 3-7、图 3-8)。该生态型活体生物礁附苗效率高，生物量可控，显著提升繁殖期的苗种丰度和礁体的构建速度。



图 3-7 2020 年 8 月，原位构建的生态型牡蛎礁群
(拍摄：中国科学院海洋研究所 王威)



图 3-8 牡蛎礁块锚桩固定
(拍摄：中国科学院海洋研究所 王威)

(4) 修复效果监测评估

通过对牡蛎礁生长、密度、生物量、健康状况和渔业增值方面进行评估，潮汐周期内完全浸没的牡蛎在生长和密度方面比部分暴露的牡蛎表现更好，完全浸没的牡蛎平均生物量比部分暴露的牡蛎高 2.88 倍，单位面积净水效果提高 3.6 倍。通过生化标志物和全基因组基因表达分析表明，部分暴露在空气中的牡蛎呈现出增强的氧化和脂质代谢，表现出较差的健康状况，完全浸没的牡蛎健康状况较好。通过对比牡蛎礁区和非礁区发现，牡蛎礁区鉴定到 10 个物种，对照区鉴定到 7 个物种；牡蛎礁区 Margalef 丰富度指数和种类数显著高于非礁区。



图 3-9 (A)实验场地中的人工牡蛎礁的放置示意图和(B)人工牡蛎礁照片 (图源：中国科学院海洋研究所 李莉，王威)

3、经验总结

(1) 项目团队在修复工程中使用的牡蛎是基于系统集成牡蛎潮间带群体的适应性提升技术，创制的高适应性品种牡蛎，试验结果表明，牡蛎高适应种质的存活率远高于原始未经适应性提高的种质；

(2) 在高纬度地区开展牡蛎礁修复，在修复选址和礁型设计时需要重点关注冬季海冰对牡蛎礁体的破坏；

(3) 在泥沙沉积速率快的地区开展牡蛎礁修复，在修复选址和礁型设计时需要重点关注泥沙淤积对修复效果的影响；

(4) 适宜的牡蛎养殖规模对牡蛎礁修复具有推动作用，可有效增加苗种补充量。需要注意的是尽量开发本地原种的养殖，引进外来养殖物种需加强生态监测与种质影响评估。

参考文献

- [1] Zabin, C. J., Wasson, K., & Fork, et al.. Restoration of native oysters in a highly invaded estuary. *Biological Conservation*, 2016, 202, 78-87.
- [2] Wiberg P L , Taube S R , Ferguson A E , et al. Wave Attenuation by Oyster Reefs in Shallow Coastal Bays. *Estuaries and Coasts*, 2018, 42(2):331-347.
- [3] 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. 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 (available at: http://coastalresilience.org/wp-content/uploads/2017/11/tnc_Natural-Shoreline-Case-Study_hi.pdf). All materials developed for the Fourth Assessment are available at: <http://www.ClimateAssessment.ca.gov>.
- [4] 黄宗国, 蔡如星. 海洋污损生物及其防除. 海洋出版社, 1984, 292-296.
- [5] 王如才, 王昭萍. 海水贝类养殖学. 中国海洋大学出版社, 2008, 141-146.
- [6] 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. 2022.
- [7] Quan W M, Zhu J X, Ni Y, et al.. Faunal utilization of constructed intertidal oyster (*Crassostrea rivularis*) reef in the Yangtze River estuary, China. *Ecological Engineering*, 2009, 35(10): 1466-1475.
- [8] Quan W M, Humphries A T, Shen X Q, et al., Oyster and associated benthic macrofaunal development on a created intertidal oyster (*Crassostrea*

- ariakensis) reef in the Yangtze river estuary, China. *Journal of Shellfish Research*, 2012a, 31(3): 599-610.
- [9] Quan W M, Humphries A T, Shi L Y, et al., Determination of trophic transfer at a created intertidal oyster (*Crassostrea ariakensis*) reef in the Yangtze River estuary using stable isotope analyses. *Estuaries and Coasts*, 2012b, 35:109-120.
- [10] Quan W M, Zheng L, Li B J, et al., Habitat values for artificial oyster (*Crassostrea ariakensis*) reefs compared with natural shallow-water habitats in Changjiang River estuary. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2013, 31:957-969.
- [11] 李碧全. 海水贝类增养殖技术. 化学工业出版社, 2009, 99-99.
- [12] 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. *Aquaculture*, 2004, 242(1-4): 137-155.
- [13] Wang H Y, Zhang G F, Liu X, et al., Classification of common oysters from north China. *Journal of Shellfish Research*, 2008, 27: 495–503.
- [14] Wang H Y, Qian L M, Liu X, et al., Classification of a common cupped oyster from southern China. *Journal of Shellfish Research*, 2010, 29(4): 857-866.
- [15] Wang H Y, Qian L M, Wang A M, et al., Occurrence and Distribution of *Crassostrea sikamea* (Amemiya 1928) in China. *Journal of Shellfish Research*, 2013, 32(2): 439-446.
- [16] 王海艳, 郭希明, 刘晓等. 中国近海“近江牡蛎”的分类和订名. *海洋科学*, 2007, 31(9): 85-86.
- [17] 王海艳, 郭希明, 刘晓等. 中国北方沿海“褶牡蛎”的分类和订名. *海*

- 洋科学, 2009, 33(10): 104-106.
- [18] 王海艳, 张涛, 马培振等. 中国北部湾潮间带现生贝类图鉴. 科学出版社. 2016.
- [19] 许飞. 小庙洪牡蛎礁巨蛎属牡蛎间生殖隔离研究. 中国科学院研究生院 (海洋研究所) . 2009.
- [20] 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. 海洋与湖沼, 2012, 43(5):992-1000.
- [21] 王海艳. 中国近海常见牡蛎分子系统演化和分类的研究. 中国科学院研究生院 (海洋研究所) . 2004.
- [22] 杜玄, 郭希明, 钱鲁. 福建沿海巨蛎属牡蛎的主要种类及其分布. 台湾海峡, 2009, 28(03): 399-404.
- [23] 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. 福建省海洋学会, 2016 年学术年会论文摘要集. 2016, 17-18.
- [24] 唐以杰, 林炜, 崔雪文等. 广东上川岛潮间带软体动物的分布. 动物学杂志, 2004, 03: 60-67.
- [25] 黄小芬. 上川岛牡蛎的初步调查. 动物学杂志, 1994, 04: 51-52.
- [26] 张素萍. 中国海洋贝类图鉴. 海洋出版社. 2008, 305-305.
- [27] 徐凤山, 张素萍, 2008. 中国海产双壳类图志. 北京科学出版社.
- [28] 张红雨, 王笃圣, 王正伦. 渤海湾密鳞牡蛎营养成分分析. 中国海洋药物, 1994, 04: 17-19.
- [29] 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. 生态学报, 2022, 42(3): 1142-1152.
- [30] 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.

- 地质调查与研究, 2020, 43(4): 317-333.
- [31] 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. 中国地质调查局天津地质调查中心, 2021, 1-676.
- [32] 王威, 李莉, 黎奥等. 近江牡蛎(*Crassostrea ariakensis*)规模化人工育苗及养成. 海洋科学, 2020, 44(02):108-112.
- [33] 刘鲁雷. 东营垦利近江牡蛎礁现状调查与资源修复研究. 大连海洋大学. 2019.
- [34] 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. 河海大学学报(自然科学版), 2004a, 32(增刊): 21-26.
- [35] 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. 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.
- [36] 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. 海洋与湖沼, 2012, 43(5):992-1000.
- [37] 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. 生态学报, 2016, 36(23): 7749-7757.
- [38] zu Ermgassen P S E, Spalding M D, Grizzle R E, et al.. Quantifying the Loss of a Marine Ecosystem Service: Filtration by the Eastern Oyster in US Estuaries. *Estuaries and Coasts*, 2013, 36: 36–43.
- [39] Cornwell J, Rose J, Kellogg L M, et al.. Panel recommendations on the oyster BMP nutrient and suspended sediment reduction effectiveness determination decision framework and nitrogen and phosphorous assimilation in oyster tissue reduction effectiveness for oyster aquaculture practices. Oyster BMP expert panel first report. Chesapeake Bay Program (CBP) Partnership. 2016.

- [40] Humphries A T, Ayvazian S G, Carey J C, et al.. Directly Measured Denitrification Reveals Oyster Aquaculture and Restored Oyster Reefs Remove Nitrogen at Comparable High Rates. *Frontiers in Marine Science*, 2016, 3:74.
- [41] Grabowski J H, Peterson C H. Restoring oyster reefs to recover ecosystem services. Pages 281-298 in K. Cuddington, J. Byers, W. Wilson, and A. Hastings, editors. *Ecosystem engineers: plants to protists*. Academic Press, Boston. 2007.
- [42] zu Ermgassen P S E, Grabowski J H, Gair J R, et al.. Quantifying fish and mobile invertebrate production from a threatened nursery habitat. *Journal of Applied Ecology*, 2016, 53 (2): 596-606.
- [43] McLeod I M, zu Ermgassen P S E, Gillies C L, et al., 2019. Chapter 25. Can bivalve habitat restoration improve degraded estuaries?. In: E. Wolanski, J. W. Day, M. Elliott, and R. Ramachandran (eds.). *Coasts and Estuaries: the Future*, pp. 427–442. Elsevier.
- [44] Newell R I E, Koch E W. Modeling seagrass density and distribution in response to changes in turbidity stemming from bivalve filtration and seagrass sediment stabilization. *Estuaries*, 2004, 27: 793–806.
- [45] Wong M C, Peterson C H, Piehler M F. Evaluating estuarine habitats using secondary production as a proxy for food web support. *Marine Ecology Progress Series*, 2011, 440: 11–25.
- [46] Ferraro S P, Cole F A. Benthic macrofauna–habitat associations in Willapa Bay, Washington, USA. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2007, 71(3–4): 491–507.
- [47] 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.生态学报, 2017, 37(5): 1709-1718.

- [48] Piazza B P, Banks P D, La Peyre M K. The potential for created oyster shell reefs as a sustainable shoreline protection strategy in Louisiana. *Restoration Ecology*, 2005, 13: 499-506.
- [49] 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)*. The Nature Conservancy, Arlington, VA. 2017.
- [50] 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. *Scientific Reports*, 2019, (9): 2045-2322.
- [51] 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, 北京: 2022.
- [52] 中国海湾志编纂委员会. 中国海湾志 第五分册. 北京: 海洋出版社, 1992.