海草床生态减灾修复手册(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

自然资源部第四海洋研究所

中国科学院海洋研究所

自然资源部海洋减灾中心

中国海洋大学

中国科学院南海海洋研究所

广西壮族自治区合浦儒艮国家级自然保护区管理中心

自然资源部北海生态中心

编制组成员

于硕，周毅，朱方超，陈旭阳，陈新平，张沛东，刘松林，徐少春，

张宏科，国志兴，鲍萌萌，王惠

目录

Contents

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

本手册适用于我国海草床生态修复工作，其他相关工作可参照使用。

本手册给出了海草床生态修复原则、技术流程、修复区诊断与识别、修复目标、修复措施与技术、修复后监测与评估、公众参与等内容。

2. 术语和定义

- 海草 *Seagrass*

  可完全生活在海水或河口半咸水中的单子叶被子植物。

- 海草床 *Seagrass bed*

  具有一定面积、连片的海草群落。

  注：一般认为，海草群落的面积超过 100 m^2 时被称为海草床[1]。

- 分株 *Ramet*

  通过克隆生长产生的新植株，由茎枝、根状茎和根组成。

- 草块 *Seagrass plug*

  由海草分株和底质构成的集合体。

- 克隆生长 *Clone growth*

  通过根状茎生长出新的分株的无性繁殖方式。

- 种子库 *Seed bank*

  海草床底质中具有活力的种子的总称。

- 种苗 *Seedling*

  海草种子发芽后形成的幼小植株。

- 生殖枝 *Reproductive shoot*

  海草进入花期后，可发育形成花、果实、种子等繁殖器官的茎枝。

- 移植单元 *Transplanting unit*

  以草块或分株为移植对象的基本单元。

- 生态基线 *Ecological baseline*

  生态修复实施前的生态系统状态。

- 参照生态系统 *Reference ecosystem*

  作为生态修复目标或者基准的特定生态系统。

- 海草床生态修复 *Ecological restoration of seagrass bed*

  协助退化、受损或破坏的海草床生态系统恢复其健康、整合性和可持续性。

3. 生态修复原则

尊重自然、保护优先

坚持尊重自然、顺应自然、保护自然，生态修复遵循海草床生态系统的自然更新和演替规律。坚持保护优先，以自然恢复为主、人工修复为辅。对于轻度受损的海草床宜采取相应保护措施，减少人为干扰，使其自然恢复；对于严重受损的海草床，宜采用人工修复和自然恢复相结合的方式，通过去除威胁因素、人为补种等措施修复退化的海草群落，提高海草床的恢复力。

统筹规划、系统协调

海草床生态修复应符合国土空间规划等相关法律法规的要求。同时基于海洋生态系统的整体性和系统性，宜综合考虑陆地、海洋及海陆交错带各要素和各组分之间的相互作用；着重关注海草床与珊瑚礁、红树林、其他滨海或河口湿地等毗邻生态系统之间的互作关系，避免生境破碎化和孤岛化，提升生态连通性、多样性和稳定性。

因地制宜、分种施策

海草床生态修复宜遵循因地制宜、分“种”施策。根据修复地的气候、地形、水动力等自然条件，结合海草床的退化状况，制定适宜的海草床生态修复策略，注重自然本底，立足生态禀赋。我国海草种类丰富多样，宜根据不同海草物种的形态结构、生态习性、物候与繁殖特征等的差异性和特殊性，采取有针对性的修复措施，提高修复效率，节约成本。

公众参与、长效监管

海草床修复宜考虑社区民众等相关利益者的需求，鼓励民众、社区等积极配合和参与，提高公众参与度。针对海草床生态修复过程的不确定性，长期有效的管理宜贯穿海草床生态修复的整个过程，加强海草床生态修复项目实施过程和成效的监测与评估；根据监测评估结果对生态修复方案、修复措施进行调整和优化。

4. 技术流程

海草床生态修复的技术流程见图1-1。

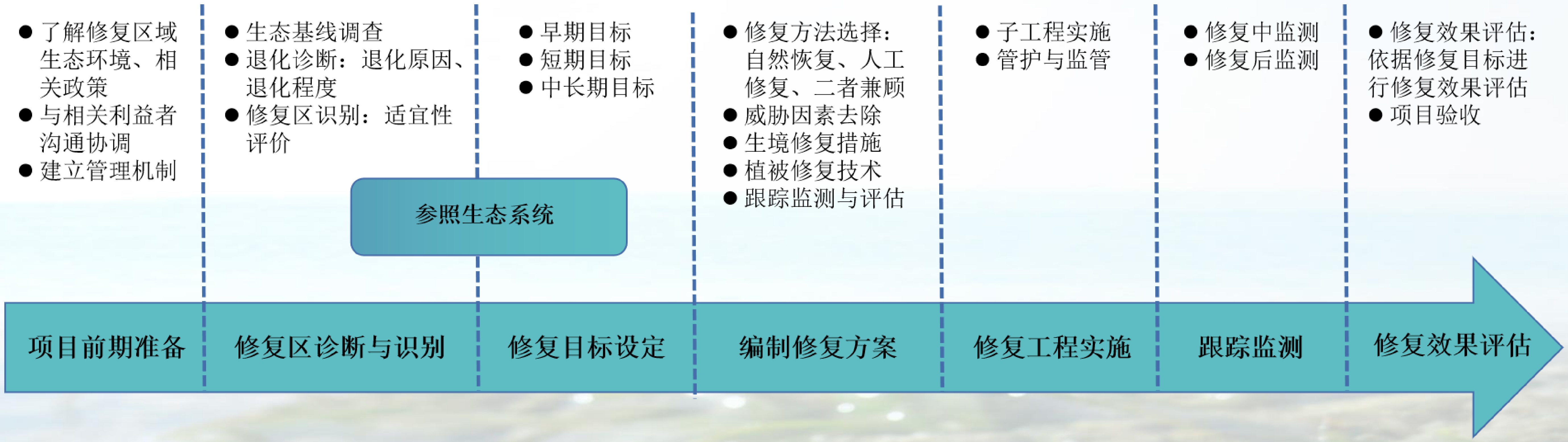


图 1-1 海草床生态修复总体流程

5. 修复区诊断与识别

5.1 生态基线调查

对拟修复区进行生态基线调查，目的在于了解海草床的生态状况及退化程度，分析导致其退化或消失的原因，为后续生态修复方案的制定提供依据。同时，修复前的基线调查数据也是生态修复效果评估的基准之一。

调查范围除了拟修复区外，还应包括参照生态系统。

5.1.1 调查内容与方法

海草床生态调查内容包括修复区概况、海草植被、生物群落、环境要素及威胁因素等。调查指标包括但不限于表格内的指标要素（见表 1.1）。

5.1.2 调查时间

生态基线调查一般选择海草生长旺季进行调查。温带海草床建议 6 月～8 月，热带和亚热带海草床建议 4 月～8 月。

5.1.3 参照生态系统确定

参照生态系统按以下方式选取：

a）收集修复区域的历史资料，包括常规监测、专项调查、文献资料等，建立参照系；

b）与修复区环境条件相似的区域，保存相对完好的海草床。

表 1.1 海草床生态基线调查内容与方法

调查内容	调查要素	调查方式	调查方法
修复区概况	自然条件：气候、地理位置等 政策法规：法律法规、规划政策	资料收集	搜集文献、年鉴、政府报告等
海草植被	海草床：面积	现场调查、航拍、高清卫星图片	按 T/CAOE 20.6 执行[2]
	海草：种类、盖度、茎枝密度、茎枝高度、生物量、有性繁殖	现场调查	按 T/CAOE 20.6 执行
	遗传信息：遗传多样性、基因流等	现场调查	随机取 10-30 个植物样本，采用基因组或微卫星标记进行分析。
生物群落	大型藻类：盖度、种类	现场调查	按 T/CAOE 20.6 执行
	附着生物：生物量、种类		按 T/CAOE 20.6 执行
	大型底栖动物：种类、密度、生物量		按 T/CAOE 20.6 执行
	游泳动物：种类、生物量		按 GB/T 12763.6 执行
	鱼卵仔鱼：种类、密度		按 GB/T 12763.6 执行
环境要素	水环境：水温、水深、盐度、透明度（或透光率）、溶解氧、悬浮物、无机氮、活性磷酸盐、石油类等	现场调查	水温、盐度按 GB/T 12763.2 执行；透明度、悬浮物、石油类按 GB 17378.4 执行；其他海洋化学要素参数按 GB/T 12763.4 执行
	沉积物：粒度、有机碳、硫化物、重金属、总磷、总氮	现场调查	粒度按 GB/T 12763.8 执行；其他参数按 GB 17378.5 执行
	地形条件：高程	现场调查	按 GB/T 17501 执行
	水动力：流速	现场调查	按 GB/T 12763.2 执行
威胁因素	自然因素：台风、风暴潮、虫害	现场调查或资料收集	定性描述
	人为因素：渔业捕捞（捕捞量、渔港分布）；底栖生物采捕（从业人数、采捕方式）；海水养殖（养殖类型、养殖种类、养殖面积）；海洋工程（类型、规模）；污染排放（排污口数量）		

5.2 退化诊断

生态退化诊断主要包括海草床退化程度及退化原因分析。

“皮之不存，毛将焉附”。诊断海草床生态系统退化最为重要的指标是海草分布面积的减少。海草床的退化程度分为三个等级：轻度退化（5 年内海草床面积下降 10%～30%）、中度退化（5 年内海草床面积下降 30%～60%）、重度退化（5 年内海草床面积下降 60%以上）。

根据环境要素和威胁因素调查数据，分析海草床退化的主要原因，作为后续进行威胁因素消除和生境修复的依据。

5.3 修复区识别

目前，海草床修复失败的最主要原因是由于修复地选址不适宜。海草床生态修复应优先选择历史上有海草床存在的区域。依据生态基线调查数据，可将拟修复区划分为适宜修复区、可改造修复区和不适宜修复区[3]。

- ❖ 适宜修复区：水质、光照、底质类型和高程等因素满足海草生物学生长。具体条件见表 1.2。
- ❖ 可改造修复区：满足地形水文、底质类型等条件，但受海水污染、渔业生产、互花米草入侵等人类活动干扰的退化海草床，可以通过控制人类活动干扰及其它人工措施使生境得到改善的区域，为可改造修复区。
- ❖ 不适宜修复区：生境改善不可行，或与当地规划相冲突的区域，为不适宜修复区。

表 1.2 拟修复区的适宜性分析

修复区类型	适宜条件	
适宜修复区	环境条件	地形水文：宜选择在风浪较小的海湾、河口、沙洲或光滩，平均流速宜小于 1.5 m/s。对于潮间带海草宜考虑高程。
		水质：符合 GB 3097 海水水质 I 类或 II 类标准，盐度相对稳定。
		透光率：无大量悬浮泥沙来源，透光率一般不低于 20%。
		沉积物质量：符合 GB 18668 海洋沉积物质量 I 类标准。
		底质类型：粘土质粉砂、粉砂质砂或细砂（虾形草属海草为岩礁底质）。
	人为干扰	修复区周围海水污染、渔业捕捞、海洋工程等人为干扰较少。

6. 修复目标

生态修复目标除了恢复海草群落及其生态系统服务功能外，应考虑到利益相关者的需求，兼顾社会效益。生态修复目标决定生态修复的内容、措施及技术方法等相关设计[4]，见表 1.3。

表 1.3 修复目标与项目规划、设计的联系

修复目标	项目规划	项目设计
海草床修复	● 修复地威胁因素清除 ● 参照生态系统设定	● 监测评估目标物种的环境条件 ● 试验方法 ● 实施修复 ● 修复效果评估
促进海草床的恢复力	● 海草床间的连通性，以确定海草繁殖体的源和汇 ● 过去和现在的海草分布 ● 人为和自然干扰	● 确定优先修复位置 ● 评估人为干预频率
增加碳库	● 碳封存量高的环境条件 ● 海草床的持续稳定性	● 修复地选择 ● 物种选择 ● 海草床保护机制建立 ● 碳封存量监测
鱼类和贝类的栖息地修复	● 栖息地位置（幼体供应、连通性等） ● 海草床与其他栖息地的距离	● 定期监测鱼类和贝类的种群 ● 促进生境间的连通性。
加强鸟类觅食栖息地	● 确定目标鸟类及其猎物 ● 猎物与海草的关系 ● 鸟类取食与潮汐的关系 ● 海草修复对其他鸟类的影响	● 监测目标鸟类的种群 ● 监测其他非目标鸟类

生态修复目标包括短期目标和中长期目标，两类目标要明确实现的期限，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。生态修复目标参数应可量化、可考核，以便后续进行生态修复效果评估。

6.1 短期目标

短期目标一般是指 2 年～3 年生态修复预期达到的具体目标或阶段性目标。

短期目标可参考以下内容：

- 海草植被修复：海草植被恢复是海草床生态修复的关键目标。包括海草床恢复面积、盖度、密度、生物量等。
- 生境条件修复：包括底质类型、水体营养状况、沉积物质量、水文动力条件等修复改善的程度。
- 威胁因素的消除：污染物排放、渔业捕捞、外来物种等。

6.2 中长期目标

生态修复的中长期目标是经过修复后生态系统结构与功能得到一定恢复，生态系统逐渐稳定并具有一定的恢复力。对应的生态系统量化参数包括生物群落、环境因子、生态系统功能等。

中长期目标可参考以下内容：

- 海草床生态系统结构的恢复：植被、大型底栖生物、游泳动物等。
- 海草床生态系统功能的提高：维持生物多样性、渔业功能、固碳增汇、生物地球化学循环、水质净化等。
- 中长期目标的实现期限：海草床生态系统结构的恢复设定为 5 年，生态系统功能的提高设定为 10 年。

7. 修复措施与技术

7.1 生境改善措施

一般来说，如果某个区域没有海草，有两种可能：（1）该区域的生境条件不适合海草生长；（2）过去有海草生长，但由于不利（人类或自然）因素影响，海草消失了。针对后一种情况，需查明海草消失的可能原因，一旦环境条件得到显著改善，尤其是改善水质和沉积物条件，海草通常会自然恢复，或者在人工修复的情况下逐渐恢复。改善受损海草生境的方法是通用的（表 1.4），具体方法和技术细节可能因当地环境条件不同而异[5]。

保护或改善海草床生境除了科技支撑外，更需要基于生态系统的政府管理。海草保护与修复应遵循陆海统筹规划原则，严格控制陆源污染输入、海洋工程以及过度的赶海活动。通过立法建立海草特别保护区是最为有效的措施之一。

7.2 海草修复技术

过去几十年，人们尝试了大量的海草修复技术与方法，积累了丰富的经验。国外同行发布了一些具有参考价值的手册、指南或文献[4-9]。总体来说，大部分资料是针对温带物种，大规模的修复区域也集中于欧美国家。尤其是鳗草的修复案例很多，技术相对比较成熟，而关于热带-亚热带物种的修复还处于初级阶段[9]，案例比较匮乏。开发高效的海草修复技术首先需要熟悉目标种的生长和繁殖特性，用于确定修复方式、修复时间以及相应的管护等环节，热带-亚热带海草的相关基础研究信息比较少，修复难度较大。

海草床生态修复主要采用移植法，也就是指将海草从一个地方转移到

另一个地方种植。随着人们对海草有性繁殖研究的深入，部分海草物种修复采用种子法。

7.2.1 物种及种源地选择

物种的选择至关重要。修复前期应调查清楚修复区所在海域的海草物种多样性，了解各个物种的分布面积及生长特性，适地适草。一般而言，物种宜选择历史上曾在修复区生长存在的本地物种。如生境条件变化比较大，已经无法满足原有物种的生存，可以选择该区域其他本地物种或者临近海域的先锋海草物种。我国不同海域海草物种的分布信息参考附录 1。

大规模修复前，应进行小规模的试种以对物种进行筛选或者驯化。需要强调的是，任何单位和个人不得擅自引入外来物种。物种选择与种源地选择相辅相成，关系紧密。一般来说，种源地的选择应遵循以下原则：

- 就近取样原则，有利于保持移植单元的活力，并节省运输时间及费用；
- 种源地的环境条件与修复区相似；或者建立育苗基地作为种源；
- 优先选取海草生长旺盛、覆盖度高、分布连续的海草床作为种源地。

表 1.4 受损海草床生境的症状、问题诊断和生境改善措施

海草床症状	可能的原因	问题诊断	生境改善措施
海草床植被、浮游植物、大型藻类、附生植物的季节性波动	温度、光照、盐度、营养盐等的季节性变化	诊断自然变化范围之外的变化及可能的胁迫参数	自然现象，不需改善生境
浮游植物、大型藻类、附生植物或底栖动物爆发	● 外来物种 ● 营养负荷过高	● 诊断是否有外来物种 ● 营养盐测定等	●清除外来物种，并控制外来物种引入 ●控制污染源，改善水体交换能力 ●清除漂浮性大型藻类
过度啃食	草食动物数量爆发，如海胆等	调查食草动物的种群大小等	调控食草动物的种群大小和结构
海草床被侵蚀或掩埋	风暴、海浪和潮汐等自然灾害	调查当地的风浪和涌浪情况及沉积物的重分配模式	自然恢复或尝试去除覆盖在海草植被上的泥沙
海草床突然消失	灾难性的营养物输入，或淡水输入	调查分析陆地径流负荷	控制陆源污染物及淡水的输入
	疏浚活动，导致海草被泥沙覆盖	调查沉积物的粒度和化学成分等	避开海草分布区或改进疏浚方法减少对海草床的负面影响，必要时补充粗砂，以增加底质孔隙度
	海岸线或海床的改造（如填海造地、养殖塘）改变水文和沉积物的物理特征	● 调查水文及沉积物特征变化 ● 退塘还草	构筑波浪缓冲结构以减少波浪反射和海床的侵蚀
海草床大面积的衰败消亡	病原生物体	监测真菌病原体、病毒等； 调查导致海草病害的因素	控制陆源污染输入，尤其是工农业化学污水和污染
直接的物理损伤	拖网捕捞或挖沙耙螺	调查估算海草生境中的拖网或挖螺活动	将敏感区域划定为禁止拖网或挖螺的封闭区域；或改造渔具以减少对生境的物理破坏
	螺旋桨或尾波冲击	调查估算海草生境附近的船只活动	封锁敏感生境，禁止船只通行；实施船舶速度限制，尽量减少螺旋桨对海草的损伤和冲击
	抛锚或拖链	调查估算海草生境中的船只抛锚活动	封锁敏感生境；在相对不敏感的生境划定抛锚区域
海草床被大量垃圾覆盖	养殖或塑料垃圾	调查分析海草床中的养殖或塑料垃圾类型及数量	清理垃圾

7.2.2 修复技术

现阶段海草床生态修复以移植法为主，种子法为辅。这两种方法各有优缺点（表 1.5）。不同的海草物种宜选择不同的修复技术。

表 1.5 海草床生态修复方法

修复方法	种植单元	定植方法	优点	缺点
移植法	无底质移植法：分株	绑石法、枚订法、网格法等	减少运输成本	移植单元需要借助石头、竹竿、钉子、金属框等材料固着在底质中，但绑定过程需要大量劳动力。
	有底质移植法：草块	移植时挖出比移植单元略大的洞穴，压实	①不需要绑定过程 ②成活率更高	有底质的移植单元重量大，运输成本高。同时，运输过程沉积物易散落，尤其是修复地距离种源地较远时。
种子法	播种种子	直接播种、泥块（丸）播种、网袋播种等	①成本低，适用于大规模修复 ②保持较高的遗传多样性	依赖于种子产量，种子萌发率相对较低。
	人工育苗	方法同无底质移植法		

7.2.2.1 移植法

目前大部分海草采用移植法进行修复。移植法的重要技术环节包括移植时间、移植单元的采集、移植单元的暂养及运输、移植单元的定植。

- **移植时间**

不同物种的生活史特征不同，移植时间也不尽相同。部分优势物种的移植时间见表 1.6。

表 1.6 不同海草物种的生态修复技术

<table>
<tr><th>生态型</th><th>中文名</th><th>修复方法</th><th>修复时间</th><th>种子采集时间</th></tr>
<tr><td rowspan="5">温带海草</td><td rowspan="2">鳗草</td><td>分株移植法</td><td>4 月～5 月或
9 月～10 月</td><td rowspan="2">6 月～8 月</td></tr>
<tr><td>种子法</td><td>9 月～10 月
或翌年 3 月</td></tr>
<tr><td rowspan="2">日本鳗草</td><td>分株移植法</td><td>5 月～6 月</td><td rowspan="2">9 月～10 月</td></tr>
<tr><td>种子法</td><td>10 月～11 月
或翌年 3 月</td></tr>
<tr><td>红纤维虾形草</td><td>分株移植法</td><td>10 月～11 月</td><td>—</td></tr>
<tr><td rowspan="12">亚热带-热带海草</td><td rowspan="2">海菖蒲</td><td>分株移植法</td><td>3 月～6 月</td><td rowspan="2">9 月～12 月</td></tr>
<tr><td>种子法</td><td>9 月～12 月</td></tr>
<tr><td>日本鳗草</td><td>草块移植法</td><td>11 月～翌年 2 月</td><td>—</td></tr>
<tr><td rowspan="2">泰来草</td><td>分株或草块移植法</td><td>3 月～6 月</td><td>—</td></tr>
<tr><td>种子法</td><td>—</td><td>—</td></tr>
<tr><td>圆叶丝粉草</td><td>分株或草块移植法</td><td>3 月～6 月</td><td>—</td></tr>
<tr><td rowspan="2">卵叶喜盐草</td><td>草块移植法</td><td>12 月～翌年 2 月</td><td rowspan="2">—</td></tr>
<tr><td>种子法</td><td>—</td></tr>
<tr><td rowspan="2">贝克喜盐草</td><td>草块移植法</td><td>12 月～翌年 2 月</td><td rowspan="2">—</td></tr>
<tr><td>种子法</td><td>—</td></tr>
<tr><td>针叶草</td><td>分株或草块移植法</td><td>4 月～6 月</td><td>—</td></tr>
<tr><td>单脉二药草</td><td>草块移植法</td><td>4 月～6 月</td><td>—</td></tr>
<tr><td colspan="5">注：日本鳗草和贝克喜盐草存在 1 年生现象，不同区域地上部分死亡时间不同，修复时间仅作参考。</td></tr>
</table>

◆ 移植单元采集

常见的移植单元包括草块、分株等。采集移植单元时，尽量从海草床的不同区域间隔一定距离采集，以加快海草床的自然恢复。

草块： 采用直径（约 20cm～30cm）的 PVC 管或铁铲等在海草床内连根带底质挖取具有一定形状（圆柱体、长方体等）的草块（图 1-2）。草块深度应大于海草根系的长度。采集草块的间距不低于 1 m。

图 1-2 卵叶喜盐草（左）和贝克喜盐草（右）草块

分株： 首先采集草块（方法如上），就地洗掉附带的底质，大部分中、小型海草尽量选择具有 2 个～5 个分株相连的片段作为 1 个移植单元。海菖蒲可选择单个分株进行种植（图 1-3）。一般而言，种植单元中存在生长点（如新芽等）成活率会高一些。

图 1-3 不同海草的分株移植单元（左为海菖蒲，右为二药草）

◆ 移植单元暂养与运输

海草植株容易腐烂，移植单元采集后应尽快移植（2 天～3 天内）。移植单元可在整理箱、玻璃缸或暂养池中暂养。暂养时有条件的可用气泵充氧。

将移植单元运输至修复区时，必须保持植株湿润新鲜，必要时可加入冰袋以保持新鲜。

◆ 移植单元定植

不同的移植单元，将其固定于底质的方法也不同。具体如下：

草块：在修复区域挖出比移植单元略大的穴，将草块放入后压实。草块移植间距 25～50 cm。

分株：为防止被海浪冲走，移植单元的固定需要借助于其他外物。分株密度应不低于种源地海草密度的 50%。具体方法有：

- 直插法：将移植单元直接插入底质中。这种方法用的比较少，易被冲走。
- 根状茎绑石法：用可降解的麻绳（种植单元成活后可将其回收）将分株的根状茎绑在石块上，然后将其掩埋或投掷于修复区。
- 枚钉法：将根状茎用麻绳或扎带固定于 U 型、V 型枚订（类似于订书针）上，再固定到海域底质中。
- 网格法：将根状茎用麻绳或扎带固定于网片或网格框架上（图 1-4），再固定于修复区。克隆片段在网格上的间距约 10 cm～20 cm；网格框架间的距离不超过 1 m。

图 1-4 海草移植方法（左为网格法；右为麻绳法）

7.2.2.2 种子法

◆ 种子采集

不同物种的种子成熟期不同，采集时间参考表 1.6。具体方法如下：

生殖枝采集

在海草种子成熟季节，采集生殖枝，装入网袋后在海水池或固定于海区中暂养。待种子成熟脱落时，去掉茎枝、叶片等，收集种子。该方法主要应用于鳗草、日本鳗草、丛生鳗草和红纤维虾形草等。

图 1-5 鳗草生殖枝（张沛东 提供）

种子采集

若当年海草结实率较低或错过生殖枝采集，可在种源地挖取表层 10 cm 左右的沉积物，过筛（孔径依据种子大小筛选）清洗，挑取种子。该方法主要应用于有种子库的物种，如鳗草（图 1-6）、日本鳗草、卵叶喜盐草、贝克喜盐草等。

图 1-6 鳗草种子（李文涛 提供）

果实采集

对于没有种子库的物种，比如海菖蒲（图 1-7）、泰来草（图 1-8）等，则需要采集果实。果实可以放入网袋后在海水池或固定于海区中暂养。当果实爆裂后，收集种子。

图 1-7 海菖蒲成熟果实及种子

图 1-8 泰来草成熟果实及种子

◆ 种子保存与运输

种子需在温盐条件与自然海水相近的海水池中保存。

- ✓ 鳗草和日本鳗草的种子可在 4℃ ~ 7℃冷藏保存（浸泡在海水中）。
- ✓ 无休眠期的海草种子，如海菖蒲、泰来草等，种子释放后尽快播种，防止种子腐烂。

◆ 播种时间与密度

不同物种的播种时间及种子密度见表 1.6。

播种方法

主要包括直接撒播法、泥块（丸）播种法、网袋播种法、机械播种法、移植幼苗法等。

直接撒播种法

低潮时将种子或生殖枝直接播撒在修复区。该方法成本低，但种子流失严重。适合于种子量充足的物种。

泥块（丸）播种法

将细沙与黏土用水混合均匀，采用直径为 7cm ~ 10cm，高 3cm ~ 5cm 的 PVC 管作为模具制成泥块，并将种子（10 粒 ~ 15 粒）置于泥块中。泥块干燥 1 天 ~ 2 天后，抛掷在海草修复区（图 1-9）。亦可将种子包裹于海泥中，制成泥丸，泥丸直径宜为 2cm ~ 3cm。泥盒或泥丸，可挖孔埋藏，埋藏深度宜为 2cm ~ 3cm，亦可直接摆放于海底（图 1-10）。

图 1-9 泥块播种法（张沛东 提供）

图 1-10 泥丸播种法（徐少春 提供）

网袋播种法

将海草种子与泥沙混合，装入棉制（或麻制等易降解材料）网袋中（网目规格应小于种子短径），将网袋平铺并固定于修复海域，平铺时厚度不超过 5cm（图 1-11）。

图 1-11 网袋播种法[4]

机械播种法

利用海草播种机械，将海草种子种植于播种海区（图 1-12）。

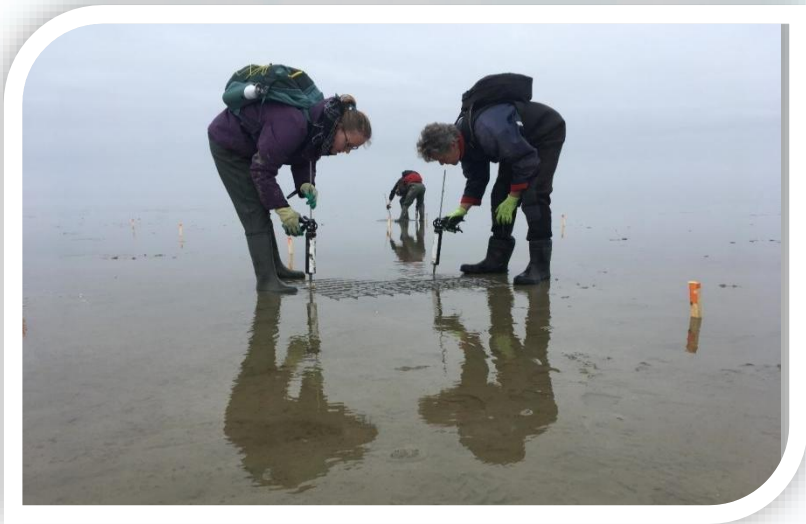


图 1-12 机械播种法[4]

种苗法

将采集的种子萌发培育成幼苗，再移植到修复海域。适用于大多数海草（图 1-13）。

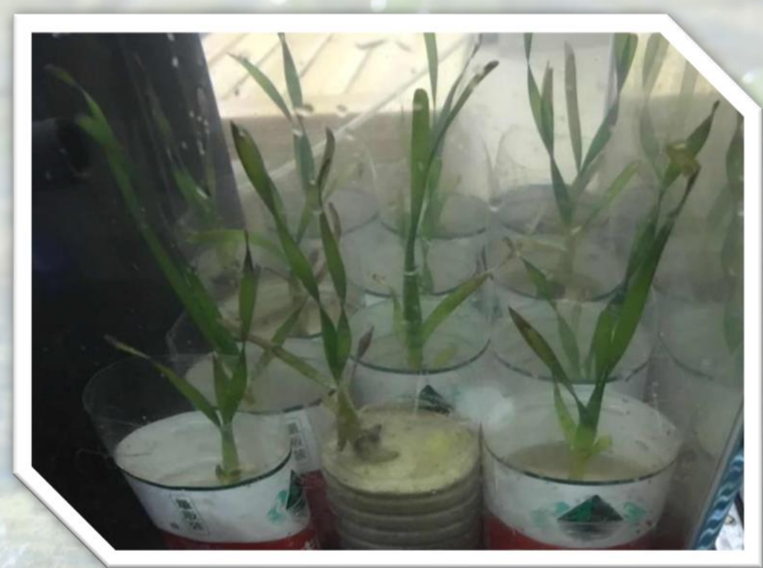


图 1-13 室内培养的海菖蒲幼苗

7.2.3 修复区管护

海草床修复后 2 年 ~ 3 年内需要定期管护，特别是在修复初期，种植单元需要适应新的生境，比较脆弱。具体措施包括：

- 清理修复区内的大型藻类和海漂垃圾等；
- 及时对死亡或者海浪冲走的种植单元进行补种；
- 清理修复区内的有害生物（海葵等）；
- 避免人类活动对海草修复的干扰，严禁在修复区内及周边海域进行拖网、采贝等破坏海草床的渔业活动；
- 在修复区近岸设立标志警示碑，注明海草床修复、保护和管理等信息；

8. 修复后监测与评估

8.1 跟踪监测

系统的跟踪监测是海草床修复项目的必要组成部分。修复后对海草床进行连续的跟踪监测，目的在于了解海草的成活率、生态系统结构与功能的变化趋势等，一方面可以及时进行“纠错”或调整方案，另一方面通过调查监测获取的数据是进行修复后生态评估的基础。

8.1.1 监测频次

海草床生态修复监测应涵盖生态修复实施前、实施过程中和修复工程实施后。海草床生态修复监测建议持续至少 5 年。不同指标的监测频率不同（见表 1.7）。

8.1.2 监测内容及方法

监测指标和参数宜根据最初设置的海草床生态修复目标进行选择。不同修复阶段监测指标有所变化。

生态监测内容包括海草植被、生物群落、环境要素及威胁因素等。具体监测指标又可以划分为结构指标和功能指标，前者包括海草植被的密度、盖度等，后者包括固碳作用、育幼和改善水质等。生态功能指标一般是修复5年及以上进行监测。

遗传变异是物种适应环境的基础。近些年，随着遗传分析成本的降低，海草床的遗传监测逐渐得到关注，以提供修复区海草的种群结构信息，例如近交衰退（近亲交配导致的适应性降低）、基因流、适应性和克隆性等。这些信息在一定程度上可以表征修复区海草床的可持续性。在《英国和爱尔兰海草床生态修复手册》中，遗传监测被纳入可选指标。

海草床生态修复后监测指标可根据项目需求在表1.7中进行选取。对于海草植被指标的测定，建议选择海草床生长旺盛的季节（4月～8月）进行监测。

表1.7 海草床生态系统修复后监测内容

调查内容	调查要素	调查方式	调查方法	调查频次
海草植被	种植单元：成活率、种子萌发率	现场调查	设置断面和样方，统计成活率。断面和样方设置参考按T/CAOE 20.6执行。	修复第1年的第1个季度每2周监测1次。
	海草床面积	现场调查或航拍或高清卫星图片	按T/CAOE 20.6执行	每年1~2次
	海草：盖度、茎枝密度、茎枝高度、生物量、有性繁殖		按T/CAOE 20.6执行	修复第1年每个季度1次。第2~5年，每年1次。
	遗传信息：遗传多样性、基因流等	现场取样	随机取10个~30个植物样本，进行全基因组重测序或采用微卫星分子标记分析。	修复第1年和第5年各1次。
生物群落	大型藻类：盖度、种类	现场调查	按T/CAOE 20.6执行	修复第1年每个季度1次。第2~5年，每年1次。
	附着生物：生物量		按T/CAOE 20.6执行	
	大型底栖动物：种类、密度、生物量		按T/CAOE 20.6执行	每年1次
	游泳动物：种类、生物量		按GB/T 12763.6执行	修复第1年和第5年各1次。
	鱼卵仔鱼：种类、密度		按GB/T 12763.6执行	

调查内容	调查要素	调查方式	调查方法	调查频次
环境要素	水环境：透明度、水温、盐度、溶解氧、悬浮物、无机氮、活性磷酸盐、石油类等	现场调查	水温、盐度按 GB/T 12763.2 执行;透明度、悬浮物、石油类按 GB 17378.4 执行；其他海洋化学要素参数按 GB/T 12763.4 执行	修复第 1 年每个季度 1 次。第 2~5 年，每年 1 次。
	底质环境：粒度、有机碳、硫化物、总磷、总氮	现场调查	粒度按 GB/T 12763.8 执行；其他参数按 GB 17378.5 执行	每年 1 次
	代表断面：高程	现场调查	按 GB/T 17501 执行	修复第 1 年和第 5 年各 1 次。
威胁因素	自然因素：台风、风暴潮等	现场调查或资料收集	定量、定性描述	修复第 1 年和第 5 年各 1 次。
	人为因素：渔业捕捞（捕捞量、渔港分布）；底栖生物采捕（从业人数、采捕方式）；海水养殖（养殖类型、养殖种类、养殖面积、养殖时间）；海洋工程（类型、规模）；污染排放（排污口数量、流量）			
功能指标	固碳作用	现场调查	参考《滨海蓝碳》	修复第 1 年和第 5 年各 1 次。
	生物多样性		同大型底栖动物、游泳动物等。	

8.2 修复效果评估

修复效果评估内容

海草床修复效果评估可根据修复目标进行评估。评估内容主要包括：

①海草植被：包括海草床修复面积及盖度等；

②动物群落：包括底栖生物、游泳动物、鸟类等；

③环境条件：包括水质、沉积物等；

④生态功能：生物多样性、固碳作用等。

一般而言，修复 5 年内主要评估海草植被、生物群落和环境条件等内容。生态功能的恢复需要较长的时间，修复 5 年后再进行评估[10]。

修复效果评估参照生态系统

海草床的特征因地而异，评估参照生态系统的选择应具有可比性。建议以下 2 种选择：

①与修复区环境条件相似的区域

选定未受干扰破坏的海草床作为修复对照点。对照点应在潮汐、水深、高程和底质特征等环境条件方面尽可能与修复区相似。

②修复前的生态状况

如果在附近很难找到环境条件类似的对照点，建议将修复前的生态状况作为对照数据。通过修复前后对比分析，反映出生态修复的效果。

修复效果评估方法

理论上讲，当海草床具有了一定的恢复力(Resilience)，即生态系统应对环境变化的能力，海草床的修复可以认为是成功的。但恢复力的阈值范围设定需要长期的数据积累和数值模拟才能获取。

目前，海草床生态修复还没有统一的效果评估标准。国家标准《海草床生态修复监测与效果评估技术指南》已提交报批稿，未来将具有重要指导作用。修复 5 年内的生态修复效果评估主要以植被结构性指标为主，如修复面积、密度和盖度等。一般而言，海草床修复面积达到设计面积的 70%，茎枝密度及盖度达到修复对照点海草床参数的 50%，海草床具备一定的恢复力。

9. 公众参与

海草床主要分布于浅水区和潮间带，与人类活动具有较大范围重叠，尤其是近岸水产养殖、赶海挖螺、休闲旅游和船只停泊等。因此，海草生态修复项目的选址及实施涉及到多方利益相关者，可能与当地的规划和发展产生一定冲突。而获取利益相关者及公众的理解、支持与直接参与是生态修复项目顺利进行的保障[4]。

9.1 沟通计划

项目前期应充分了解当地历史、民情和海洋政策背景，让相关利益者清楚地了解项目的依据和目标，以最佳途径解决特定利益相关者所关注的问题，确保项目从一开始就得到利益相关者的支持。沟通过程中探讨能给当地民众和经济带来的益处，吸引更多的资金和投资，而不仅仅是生态效益，这一点至关重要。

- **建立沟通团队：** 组建专门的团队，及时沟通解决生态修复过程中面临的问题。
- **定义项目受众：** 项目受众包括资助方、项目团队、当地利益相关方、潜在受益人等。
- **明确项目目标：** 项目试图解决哪些问题，实现什么效益？
- **做好基础工作：** 了解修复地的基本情况，做好前期准备工作。
- **及时跟踪总结：** 及时总结经验，并评估沟通的影响力。

9.2 社会参与

海草床生态修复是劳动密集型的活动，尤其是移植单元的固定以及后期监测等均需要大量人力完成，成本很高。让海草床生态修复地附近的社区、学校等团体参与进来（图 1-14 ~ 图 1-17），一方面可以解决人手问题，同时也提高公众对海草床价值和保护修复困境的认识。

图1-14 小学生参与海草绑定[4]

图1-15 广西合浦儒艮国家级自然保护区管理中心组织村民种植海草（张宏科 提供）

此外，与非政府组织（NGO）联合，并吸引、培训和维系志愿者是未来海草床修复方案不可或缺的一部分（图 1-16、图 1-17）。同时社会资本的参与也至关重要。

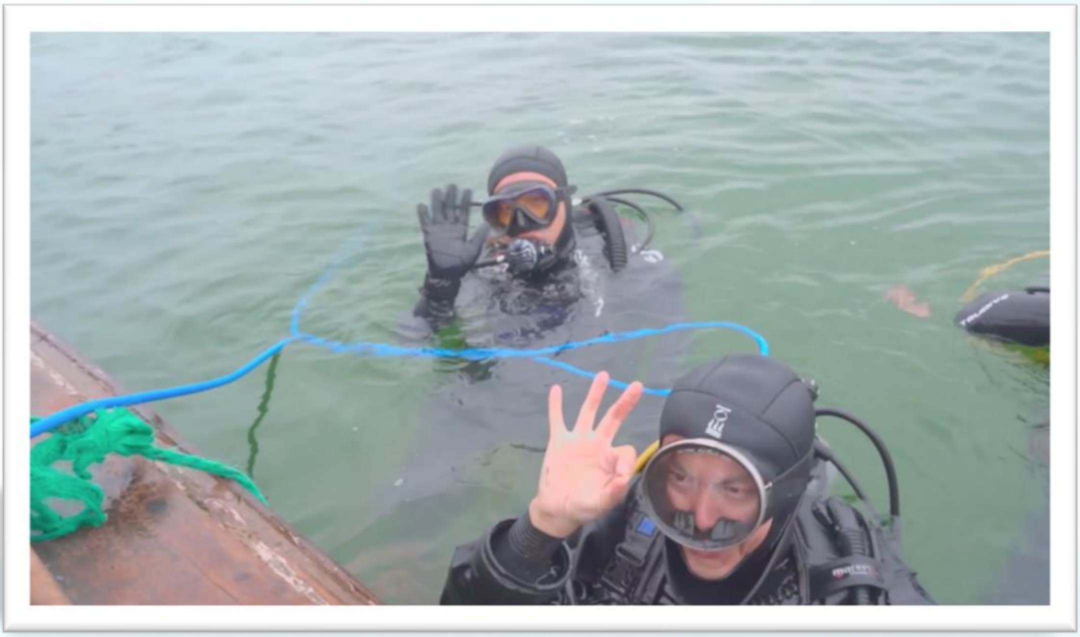


图 1-16　PADI 潜水员加入“森林探访团”下海体验海草床修复（https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_19042414）

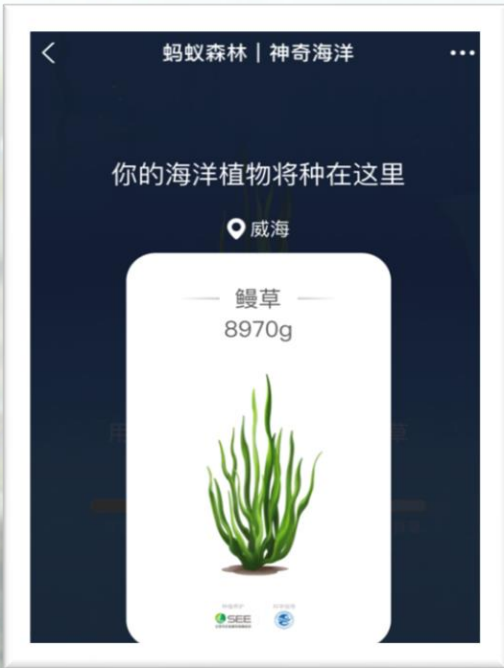


图 1-17 蚂蚁森林种植鳗草（SEE 基金会）

9.3 科普宣传

海草床生境不断遭到破坏，其中一个重要的原因是由于人们对海草的价值认识不足。因此，通过多样化的科普宣传，使人们更清楚地认识到海草的价值与每个人息息相关，并激发他们参与保护修复海草的兴趣（图 1-18、图 1-19）。科普宣传着重视觉手段和媒体互动（图 1-20），讲述好故事并激励他人。目前有效的科普互动包括：

- 传统的科普讲座
- 设置游戏、绘画艺术、户外讲解等互动方式
- 媒体互动：包括主流媒体、科学媒体、社交媒体等报道或发布相关活动、会议、报告等。

图 1-18 海草床科普讲座（关瑶 提供）

图 1-19 海洋生态保护科普讲堂活动（张宏科 提供）

图 1-20 中央电视台报道张沛东海草床修复团队

参考文献

[1] 周毅，蒲新明 等. 海洋生态修复技术指南 第 4 部分：海草床生态修复 [S]，国家标准化管理委员会, GB/T 41339.X-202X (报批稿).

[2] 于硕，陈旭阳 等. 海岸带生态系统现状调查与评估技术导则 第 6 部分：海草床 [S],中国海洋工程咨询协会, T/CAOE 20.6-2020.

[3] 于硕，陈旭阳 等. 海岸带生态减灾修复技术导则 第 5 部分：海草床 [S],中国海洋工程咨询协会, T/CAOE 21.5-2020.

[4] Gamble C, Debney A, Glover A, et al. *Seagrass Restoration Handbook*. Zoological Society of London, UK., London, UK. 2021.

[5] Short FT, Coles RG (eds). Global Seagrass Research Methods. Elsevier Science. 2001.

[6] Tan YM, Dalby O, Kendrick GA, et al. Seagrass Restoration Is Possible: Insights and Lessons From Australia and New Zealand. Frontiers in Marine Science, 2020, 7:617.

[7] UNEP-Nairobi Convention/WIOMSA. Guidelines for Seagrass Ecosystem Restoration in the Western Indian Ocean Region. UNEP, Nairobi, 2020.

[8] van Katwijk MM, Bos AR, de Jonge VN, et al. Guidelines for seagrass restoration: Importance of habitat selection and donor population, spreading of risks, and ecosystem engineering effects. Marine Pollution Bulletin, 2009,58:179-188.

[9] 于硕，张景平，崔黎军，江志坚，张凌，黄小平. 基于种子法的海菖蒲海草床恢复[J]. 热带海洋学报, 2019, 38(1):49-54.

[10] 周毅，郑新庆 等. 海草床生态修复监测与效果评估技术指南 [S]，国家标准化管理委员会, GB/T XXXX-XXXX (报批稿).

附录

附录 1 我国海草床分布现状及生态功能

1. 我国海草床分布现状

海草是唯一一类生长在海洋中的高等开花植物，广泛分布于潮间带和潮下带。该类群是由海洋藻类进化成陆生植物，随后又重新回到海洋中的被子植物，在植物进化中拥有重要地位和研究价值。相比于陆生植物，海草的种类较少，全球约有 6 科 72 种。尽管海草床的物种数较低，但其分布范围比较广泛，遍布各大洋的浅海区域，已知的全球海草场面积约为 30 万 ~ 60 万 km^2，分为有 4 个温带区系（包括北大西洋、地中海、北太平洋和南大洋）和 2 个热带区系（包括南大西洋和印度洋-太平洋）。其中印度洋-太平洋区域有 24 个种，是全球海草物种多样性最高的区域[1]。

我国的海草分布区属于印度洋-太平洋和北太平洋区域，既有温带海草床又有热带-亚热带海草床，主要分布于黄渤海海域、台湾海峡两侧及南海海域，包含 4 科 10 属 22 个物种（表 2.1），占世界海草物种数的 30%。其中温带海草有 9 种，主要分布于辽宁、河北和山东沿海海域；热带海草有 13 种，主要分布于福建、广东、广西、海南和台湾等沿海海域。

表 2.1 中国海草物种与分布

科	属	种	分布地点
丝粉草科 Cymodoceaceae	丝粉草属 *Cymodocea*	圆叶丝粉草 *C. rotundata*	广东、海南、台湾
		齿叶丝粉草 *C. serrulata*	海南
	二药草属 *Halodule*	羽叶二药草 *H. pinifolia*	广东、广西、海南、台湾
		单脉二药草 *H. uninervis*	广东、广西、海南、台湾
	针叶草属 *Syringodium*	针叶草 *S. isoetifolium*	广东、广西、海南、台湾
	全楔草属 *Thalassodendron*	*全楔草 *T. ciliatum*	广东、海南、台湾
水鳖科 Hydrocharitaceae	海菖蒲属 *Enhalus*	海菖蒲 *E. acoroides*	海南、台湾
	泰来草属 *Thalassia*	泰来草 *T. hemprichii*	广东、海南、台湾
	喜盐草属 *Halophila*	贝克喜盐草 *H. beccarii*	广东、香港、广西、海南、台湾
		*毛叶喜盐草 *H. decipiens*	海南、台湾
		小喜盐草 *H. minor*	广东、香港、广西、海南
		卵叶喜盐草 *H. ovalis*	福建、广东、香港、广西、海南、台湾
川蔓草科 Ruppiaceae	川蔓草属 *Ruppia*	短柄川蔓草 *R. brevipedunculata*	江苏、浙江、福建、广东、海南
		中国川蔓草 *R. sinensis*	辽宁、天津、山东、江苏、上海、浙江、福建、广东
		*大果川蔓草 *R. megacarpa*	山东、江苏
鳗草科 Zosteraceae	虾形草属 *Phyllospadix*	红纤维虾形草 *P. iwatensis*	辽宁、河北、山东
		*黑纤维虾形草 *P. japonicus*	辽宁、河北、山东
	鳗草属 *Zostera*	*宽叶鳗草 *Z. asiatica*	辽宁
		丛生鳗草 *Z. caespitosa*	辽宁、河北、山东
		*具茎鳗草 *Z. caulescens*	辽宁
		日本鳗草 *Z. japonica*	辽宁、河北、山东、广东、香港、广西、台湾
		鳗草 *Z.marina*	辽宁、河北、山东

备注：*表示 2015 ~ 2020 年最新普查未发现物种。

2.海草床生态系统功能

海草床与珊瑚礁、红树林并称为三大典型近海海洋生态系统，具有极为重要的生态系统功能。具体包括：

（1）维持生物多样性：海草通过为动物提供栖息地和食物，维持着较高的生物多样性。海草是鱼类、贝类、海鸟等动物的栖息地，被认为是全世界鱼类的“婴儿室”。此外，海草具有极高的生产力，可以为许多动物提供食物来源，比如珍稀濒危动物儒艮、绿海龟等。

（2）净化水质：海草可以附着悬浮颗粒物，吸收水体中营养盐，改善海水的透明度，进而净化水质。

（3）护堤减灾：大型海草的根系发达起着固定底质的作用，具有一定的抗波浪与潮汐的能力，可以减缓海滩侵蚀。

（4）调节气候：海草床被证明是地球上最有效的碳捕获和封存系统，是全球重要的碳库，对于降低二氧化碳排放意义重大[3]。据统计，全球海草床占海洋总面积不到0.2%，但其每年封存于海草沉积物中的碳相当于全球海洋碳封存总量的10%-15%；海草床有机碳储量可达到19.9Pg C，每年碳埋藏量达27.4Tg C。海草床的碳埋藏速率仅次于红树林（图2-1）。

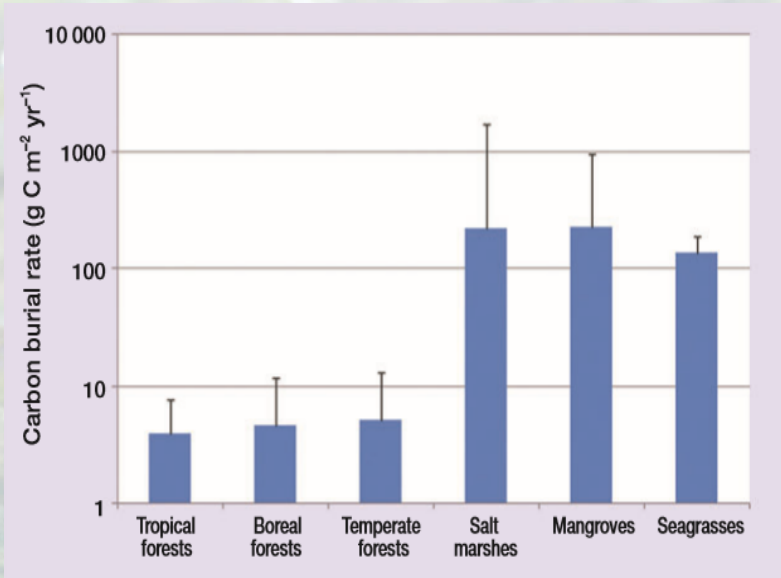


图 2-1 不同生态系统碳埋藏速率[3]

（5）科学文化价值：海草类群是由海洋藻类进化成陆生植物，随后又重新回到海洋中的被子植物，在植物进化中拥有重要地位和研究价值。海草床生态系统维持非常高的生物多样性，具有一定的观光和科普价值。

参考文献

[1] Short FT, Carruthers T, Dennison W, et al. Global seagrass distribution and diversity: a bioregional model. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology 2007, 350: 3-20.

[2] 郑凤英，邱广龙，范航清，张伟. 中国海草的多样性、分布及保护. 生物多样性, 2013, 21:517-526.

[3] McLeod E, Chmura GL, Bouillon S, et al. A blueprint for blue carbon: toward an improved understanding of the role of vegetated coastal habitats in sequestering CO_2. Frontiers in Ecology and the Environment, 2011, 9:552-560.

附录 2　我国海草物种图谱

1、鳗草科 Zosteraceae

1.1 鳗草属 *Zostera* Linn.

日本鳗草 *Zostera japonica* Asch. et Graebn.

图 2-2 日本鳗草标本照片

图 2-3 日本鳗草生境（海南博鳌）

丛生鳗草 *Zostera caespitosa* Miki

图 2-4 丛生鳗草标本照片

图 2-5 丛生鳗草生境（山东荣成）（李文涛 提供）

宽叶鳗草 *Zostera asiatica* Miki

图 2-6 宽叶鳗草标本（Lee Kun-Seop 提供）

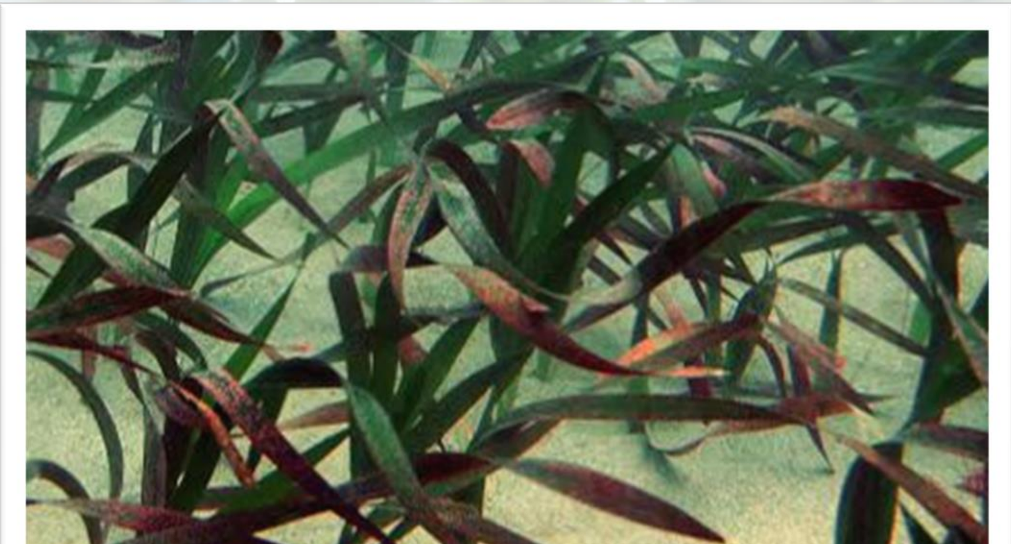


图 2-7 宽叶鳗草生境（Lee et al. 2018）

具茎鳗草 *Zostera caulescens* Miki

图 2-8 具茎鳗草标本（Lee Kun-Seop 提供）

图 2-9 具茎鳗草生境（韩国庆尚）（李文涛 提供）

鳗草 *Zostera marina* L.

图 2-10 鳗草全株（威海马山里）

图 2-11 鳗草生境（河北曹妃甸）（徐少春 提供）

1.2 虾形草属 *Phyllospadix* Hook

黑纤维虾形草 *Phyllospadix japonica* Makino

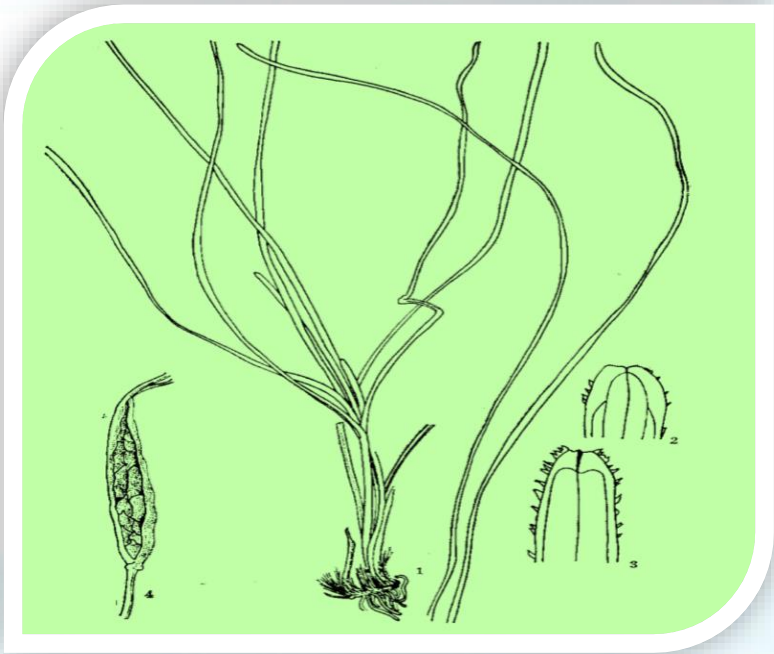


图 2-12 黑纤维虾形草手绘图（陈宝联 绘制；引自《中国植物志》）
1.植株, 2-3.幼叶和老叶叶尖, 4.幼花枝

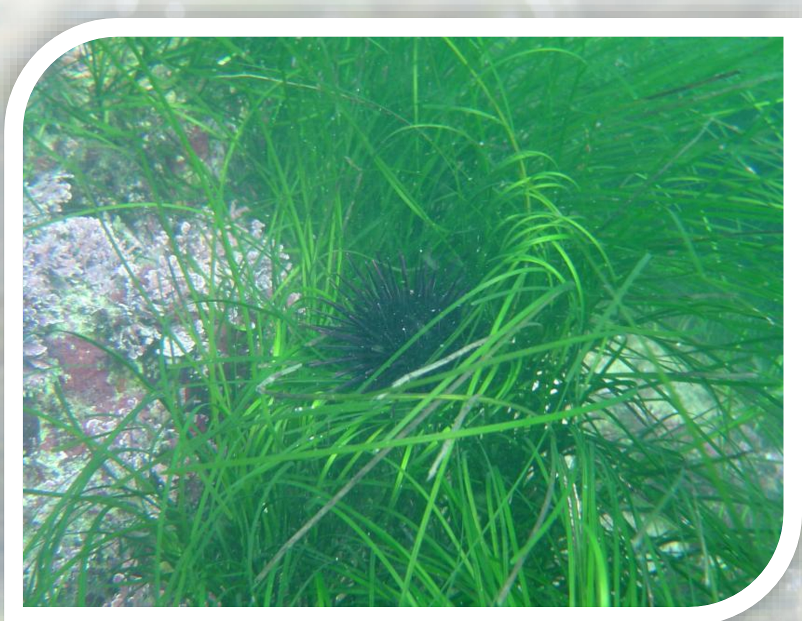


图 2-13 黑纤维虾形草生境（Lee Kun-Seop 提供）

红纤维虾形草 *Phyllospadix iwatensis* Makino

图 2-14 红纤维虾形草全株

图 2-15 红纤维虾形草生境（山东荣成）（李文涛 提供）

2、丝粉草科 Cymodoceaceae

2.1 丝粉草属 *Cymodocea* K. D. Koenig

圆叶丝粉草 *Cymodocea rotundata* Asch. & Schweinf.

图 2-16 圆叶丝粉草全株

图 2-17 圆叶丝粉草生境（海南陵水新村）

齿叶丝粉草 *Cymodocea serrulata* (R. Br.) Asch. & Magnus

图 2-18 齿叶丝粉草全株

图 2-19 齿叶丝粉草生境（海南文昌）

2.2 二药草属 *Halodule* Endl.

单脉二药草 *Halodule uninervis* (Forssk.) Asch.

图 2-20 单脉二药草全株

图 2-21 单脉二药草生境（海南文昌）

羽叶二药草 *Halodule pinifolia* (Miki) Hartog

图 2-22 羽叶二药草全株（海南西沙）

2.3 针叶草属 *Syringodium* Kütz.

针叶草 *Syringodium isoetifolium* (Arch.) Dandy

图 2-23 针叶草全株

图 2-24 针叶草生境（海南文昌）（陈石泉 提供）

2.4 全楔草属 *Thalassodendron* Hartog

全楔草 *Thalassodendron ciliatum* (Forssk.) Hartog

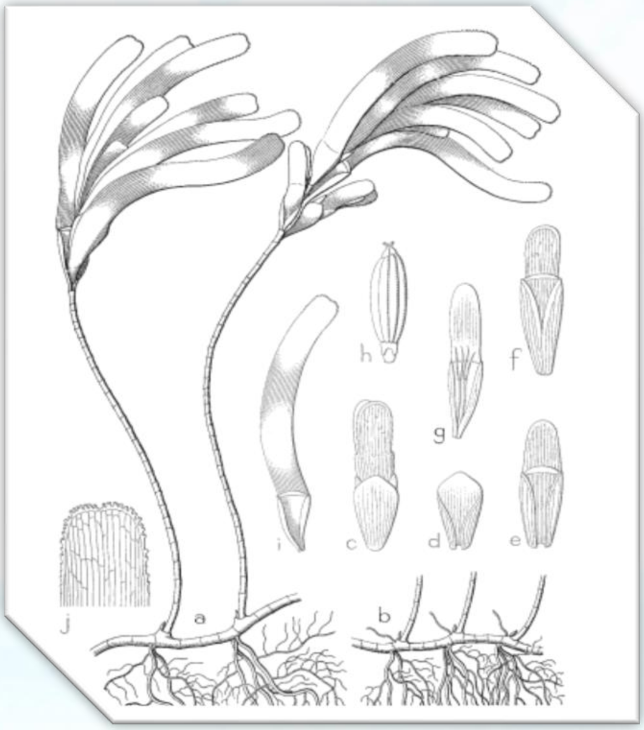


图 2-25 全楔草手绘图（den Hartog 1970）

a.开花植株, b.横向茎, c.苞片, d.苞片 I, e.苞片 II, f.苞片 III, g.苞片 IV, h.雄花（包含 2 枚）

图 2-26 全楔草（https://seagrassresearch.org/）

3、水鳖科 Hydrocharitaceae

3.1 海菖蒲属 *Enhalus* Rich

海菖蒲 *Enhalus acoroides* (L. f.) Steud.

图 2-27 海菖蒲全株

图 2-28 海菖蒲生境（海南陵水）

3.2 泰来草属 *Thalassia* Banks ex K. D. Koenig

泰来草 *Thalassia hemprichii* (Ehrenb.) Asch.

图 2-29 泰来草带果雌株

图 2-30 泰来草生境（海南陵水）

3.3 喜盐草属 *Halophila* Thouars

卵叶喜盐草 *Halophila ovalis* (R. Br.) Hook. f.

图 2-31 卵叶喜盐草全株

图 2-32 喜盐草生境（广西沙田）

小喜盐草 *Halophila minor* (Zoll.) Hartog

图 2-33 小喜盐草全株

图 2-34 小喜盐草生境（海南港东）

贝克喜盐草 *Halophila beccarii* Asch.

图 2-35 贝克喜盐草全株

图 2-36 贝克喜盐草生境（广西沙田）

毛叶喜盐草 *Halophila decipiens* Ostenf.

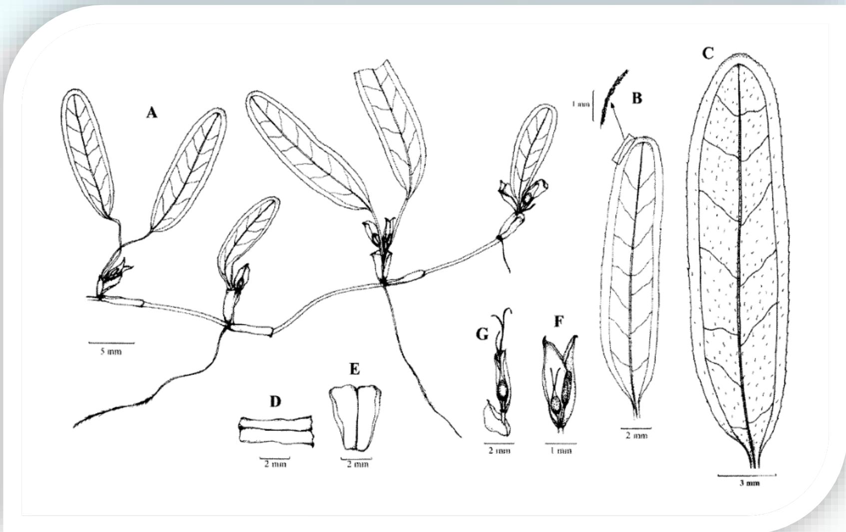


图 2-37 毛叶喜盐草手绘图（Kuo et al. 2006）

图 2-38 毛叶喜盐草生境

（https://calphotos.berkeley.edu/cgi/img_query?seq_num=367104&one=T）

4、川蔓草科 Ruppiaceae

4.1 川蔓草属 *Ruppia* L.

中国川蔓草 *Ruppia sinensis* Shuo Yu & den Hartog

图 2-39 中国川蔓草整株

图 2-40 中国川蔓草生境（山东东营潟湖）

短柄川蔓草 *Ruppia brevipedunculata* Shuo Yu & den Hartog

图 2-41 短柄川蔓草整株

图 2-42 短柄川蔓草生境（江苏射阳废弃盐池）

大果川蔓草 *Ruppia megacarpa* R. Mason

图 2-43 大果川蔓草整株

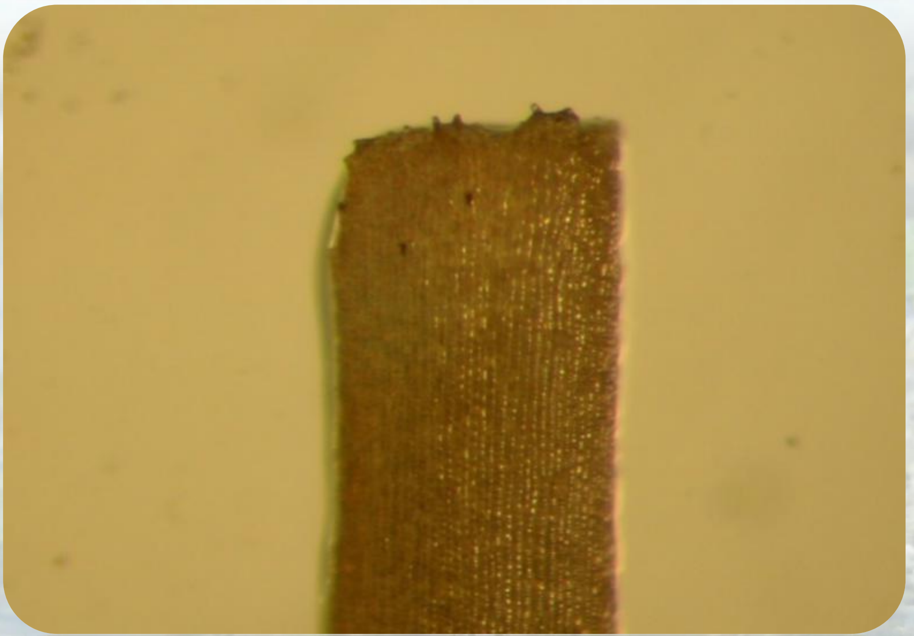


图 2-44 大果川蔓草的幼叶叶尖

附录 3　海草床修复案例

案例 1：基于种子法的海菖蒲修复试验

海菖蒲是热带海草优势种，在我国主要分布于海南岛东岸。在过去十几年中，受近岸海域人类高强度的活动干扰，尤其是养殖污水和挖螺赶海活动，造成陵水新村港与黎安港海草特别保护区内的海草分布面积急剧下降。

2017年首次在海南陵水县黎安发现了海菖蒲的果实，并于2018年1月尝试采用种子法进行生态修复。采用一次性可降解纸杯作为播种容器，每个纸杯放置1 粒种子和 1 枚数字标签作为种植单元，种子埋藏深度为2cm。埋藏种植单元分为两种处理：

(1) 直接埋藏法：将纸杯直接埋藏于底质中；

(2) 网袋法：将纸杯装入40目网袋后再埋藏。结果表明网袋法海菖蒲种子萌发率高达96.10%，远远高于直接埋藏法萌发率5.88%。这是由于网袋法可以减少生物扰动或动物捕食，进而减少种子的损失。由于水流冲击及动物捕食，直接埋藏法种子的丢失率较高。

图 3-1 海菖蒲播种地点（五星）、果实、种子

图 3-2 海菖蒲种植单元

由于待修复区域海水水质较差，藻类较多，海菖蒲的结实率及幼苗的成活率较低。海菖蒲的种子没有休眠期，因此，建议先将海菖蒲的种子进行萌发，培养成幼苗，再移植到修复区，效果更佳。

图 3-3 海菖蒲室内种子萌发幼苗

参考文献

于硕，张景平，崔黎军，江志坚，张凌，黄小平．基于种子法的海菖蒲海草床恢复．热带海洋学报, 2019, 38(1):49-54.

Li H, Liu JG, Che XK. Establishing healthy seedlings of *Enhalus acoroides* for the tropical seagrass restoration. Journal of Environmental Management, 2021, 286:112200.

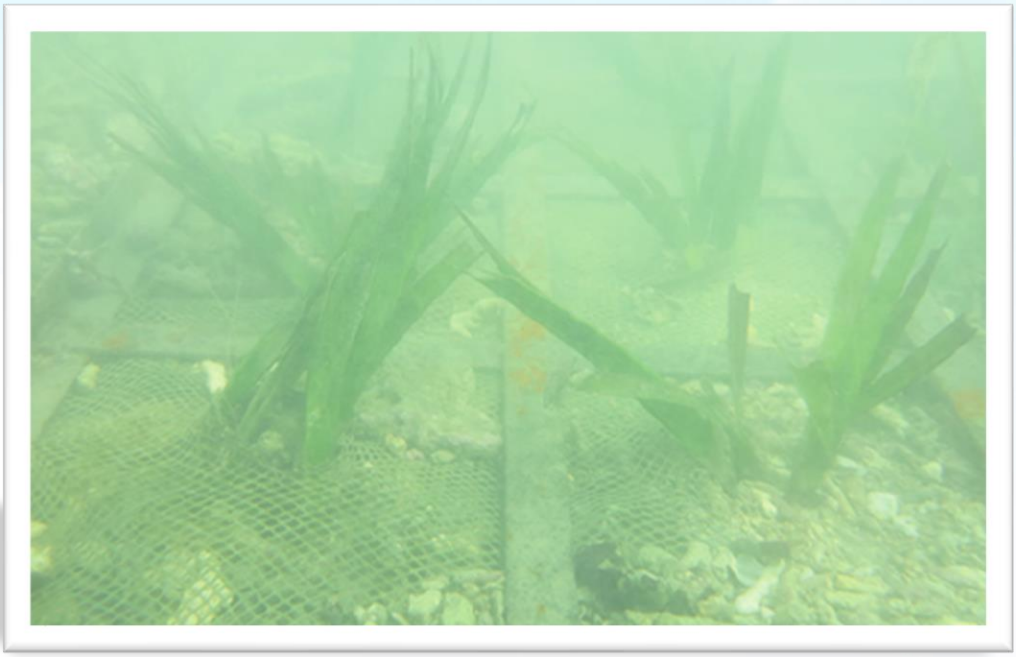
案例 2：海菖蒲和泰来草移植法

分株移植法是最常用的海草床修复方法，该方法最核心的关键步骤是如何将海草的根系固着在底质中。海南省海洋与渔业科学院针对珊瑚礁坪及潮汐动能较大的开放水域，在网格法的基础上加渔网固定，应用于海菖蒲和泰来草的修复中，取得了较好的效果。

修复区位于高隆湾(19°29'24.91″N，110°48'53.66″E)，水深为0～2 m，底质为珊瑚碎屑和少量泥沙。具体修复方法如下：

图 3-4 海南高隆湾海草床修复区

- 种植单元采集：在生长相对茂盛的海草床中，采用“疏苗”的方式采集海草种植单元，以减少对原生海草的破坏。海菖蒲种植单元为 1 个分株，泰来草种植单元 2 个～3 个分株。
- 种植密度：海草种植单元间隔为 20cm，形成 1m×1m 的种植斑块，斑块间隔为 50cm。
- 固定方式：在种植斑块上铺一层渔网，渔网空隙为 2cm × 2 cm，再用铁架压实嵌入海底，铁架用三角铁固定，待 3 个月海草稳定后，再回收铁架及渔网。



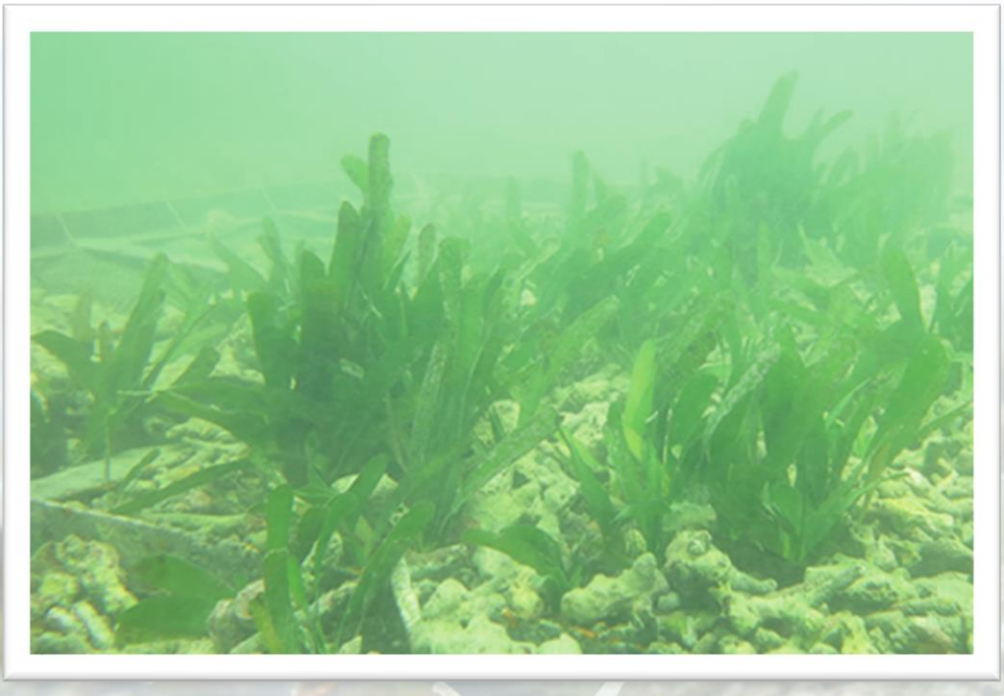


图 3-5 海菖蒲（上）及泰来草（下）修复效果

参考文献

陈石泉，蔡泽富，沈捷，吴钟解，陈益忠，王道儒. 海南高隆湾海草床修复成效及影响因素.应用海洋学学报, 2021, 40(1):65-73.

案例 3：鳗草分株移植法和种子法修复

鳗草（*Zostera marina*）是北温带分布最广的海草，也是目前生物学特征研究最为透彻的物种之一，鳗草的生态修复技术已相对成熟。鳗草修复包括分株移植法和种子法，中国科学院海洋所周毅团队和中国海洋大学张沛东团队研发了多种修复方法，并取得了很好的效果。

分株移植法最为重要的是分株的固着方式。根据固着方式可以分为根茎棉线绑石移植法、枚钉法、框架法（网格法）、麻绳夹系法等。目前应用较为广泛的是根茎棉线绑石移植法和枚钉法，使用两种方法移植时，每个种植单元 3 株为宜。

图 3-6 根茎棉线绑石法

鳗草结实率很高，每平方米产量达 1 万多粒。直接撒播法种子的丢失率较高，萌发率一般不超过 10%。为加强对种子的保护，刘燕山（2015）尝试了四种播种方式（表 2-1），大幅提高了种子萌发率。四种方法各有千秋，宜根据实际修复地的生境条件选择最佳修复方式。

表2-1 四种播种增殖技术与成本

方法	规格（cm）	播种间距（cm）	种子量/亩	幼苗建成率	成本（元/亩）
大麻袋法	120×90	100	64,000	25.8%	10,120
小麻袋法	7.5×15	25-75	36,000	26.5%	6460
泥块法	3×7	25-75	36,000	32.6%	7988
育苗床	85×70×60	25-75	1080	14.8%	6068

图 3-7 育苗床的制作

参考文献

刘鹏，周毅，刘炳舰等. 大叶藻海草床的生态恢复：根茎棉线绑石移植法及其效果. 海洋科学, 2013, 37(10): 1-8.

刘燕山.大叶藻四种播种增殖技术的效果评估与适宜性分析.中国海洋大学. 硕士毕业论文. 2015.

案例 4：基于生境改造的日本鳗草修复

在黄河三角洲南岸海草床内，2015 年 8 月互花米草面积仅为约 30 m^2，但其在 5 年后严重侵占了海草床生境。Yue et al（2021）研究发现，2015 年至 2019 年日本鳗草的植被带发生严重缩减，由原来的 550 m，缩减至 165 m。这意味着，互花米草的快速入侵，严重侵占了日本鳗草的生境，导致日本鳗草海草床无法向海继续生长延伸。

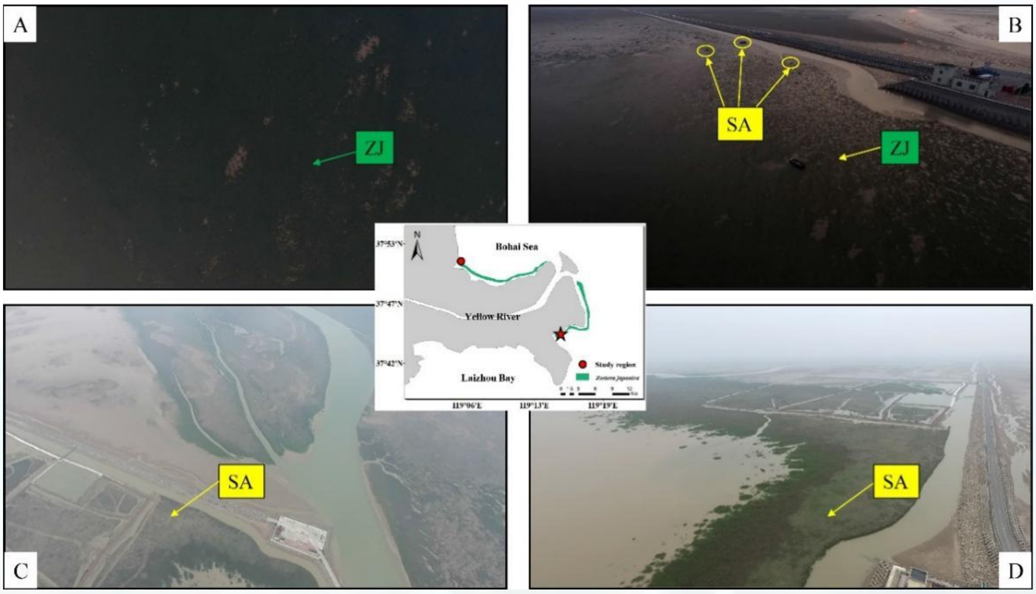


图 3-8 黄河三角洲南岸日本鳗草草床内互花米草入侵现象（A、B: 2015 年 8 月; C、D: 2020 年 6 月; 红色五角星指该区域具体位置; ZJ: 日本鳗草; SA: 互花米草）

2020 年以来，黄河三角洲国家级自然保护区开展互花米草治理项目，通过“围淹+刈割”“刈割+翻耕”等治理技术，截至 2021 年年底已完成互花米草治理面积 3.84 万亩。互花米草治理后，中国科学院海洋研究所周毅团队于 2021 年 4 月 ~ 6 月，在黄河三角洲南岸互花米草清理区域开展海草床修复工作，通过海草泥丸播种法播种 100 万粒日本鳗草种子，利用根状茎绑石法移植 135 万株日本鳗草，共修复海草床面积 20 公顷。移植播种后，种子建苗率高达 30%以上，植株存活率高达 95%以上，修复效果显著。这表明，海草生境被互花米草侵占后，通过米草治理技术进行生境改造，条件适宜下仍可进行海草床生态修复工作。


图 3-9 黄河三角洲南岸日本鳗草修复过程（左侧：泥丸播种法，右侧：根状茎绑石法植株移栽）

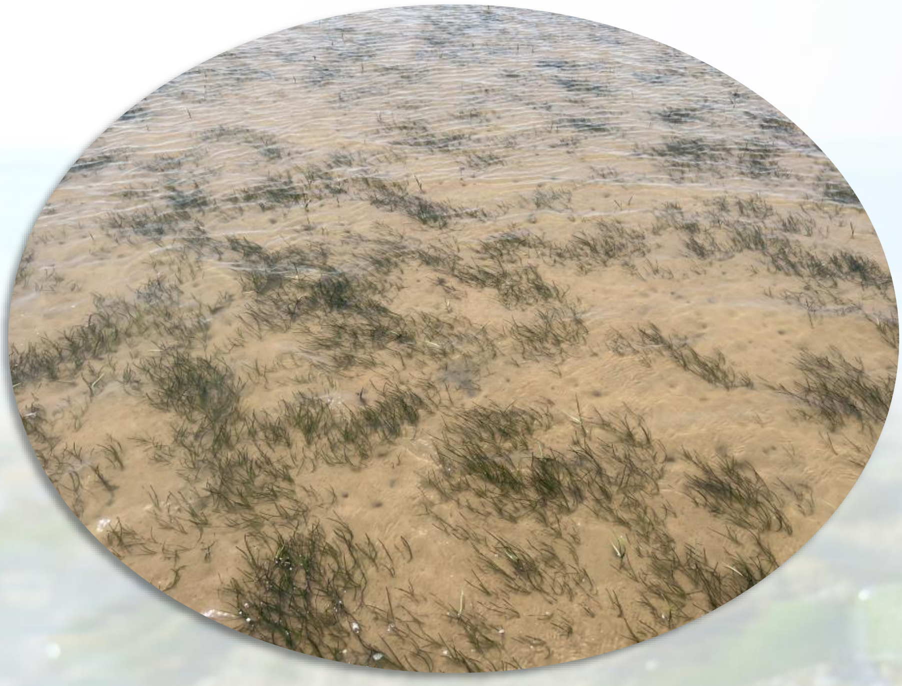


图 3-10 黄河三角洲南岸日本鳗草草床修复效果图

参考文献

Yue S, Zhou Y, Xu S, et al. Can the non-native salt marsh halophyte *Spartina alterniflora* threaten native seagrass (*Zostera japonica*) habitats? a case study in the Yellow River Delta, China. Frontiers in Plant Science, 2021, 12:643425.

案例 5：鲷鱼计划—澳洲波喜荡草修复

自 1960 年以来，西澳大利亚的 Cockburn Sound 海草床（优势种为）面积从最初的 4000 公顷减少到 900 公顷，影响了当地粉红鲷鱼、鳕鱼、鲱鱼以及其他海洋生物的种群数量。为此，OzFish Unlimited 组织联合科学家发起波喜荡草（*Posidonia australis*）修复。该计划引起海钓爱好者、潜水员的兴趣，修复区周边社区成员也成为该项目的志愿者。

波喜荡草可以产生大量种子，且种子没有休眠。该计划通过召集志愿者采集种子，经脱皮处理后，再把种子运输到待修复区域，撒播进行修复。2021 年共计有 300 多名志愿者参与修复项目，采集到 100 多万颗果实，修复成本大大节约。

图 3-11 鲷鱼计划 (a)成熟波喜荡草种子; (b)种子预处理; (c)用于播种的种子; (d)修复地种子撒播；(e)2 年龄幼苗；(f)2.5 年后的稀疏海草床.
（https://ozfish.org.au/projects/seeds-for-snapper/）

经研究发现，直接撒播种子的幼苗建成率约 1%～10%，但这种方法的一个好处是种子可以随水流散播到潜水员无法达到的地方。在部分监测区域，海草幼苗已形成连续成片的海草床。

参考文献

Statton J, Montoya LR, Orth RJ, et al.Identifying critical recruitment bottlenecks limiting seedling establishment in a degraded seagrass ecosystem. Scientific Reports, 2017, 7:14786.

Sinclair EA, Sherman CDH, Statton J, et al. . Advances in approaches to seagrass restoration in Australia. Ecological Management & Restoration, 2021, 22 (1):10-21.

案例 6：美国弗吉尼亚潟湖鳗草修复

美国弗吉尼亚近海潟湖曾经分布有成片的鳗草，提供重要的生态系统服务功能。1933 年东海岸蔓延的黏菌病和一场飓风，导致鳗草全部消失。失去栖息地的黑雁（*Branta bernicla*）和海湾扇贝（*Argopecten irradians*）也随之消失。上世纪九十年代研究发现，潟湖内的水质和光照均满足鳗草的生长条件，并且也发现了零星的鳗草，基于此推测制约鳗草恢复的主要原因是幼苗补充受限，也就是说缺少繁殖体补充。

2001 年建立了以种子法为主的方案对鳗草进行生态修复，共计投放 7400 多万颗鳗草种子到潟湖中，修复面积为 213 公顷。到 2018 年，海草床的面积增加到 3612 公顷，潟湖内的水质浊度降低，碳氮库增加，无脊椎动物和鱼类的生物量也随之增加，同时也促进了海湾扇贝的恢复，海草床的生态系统服务功能逐渐接近历史时期。

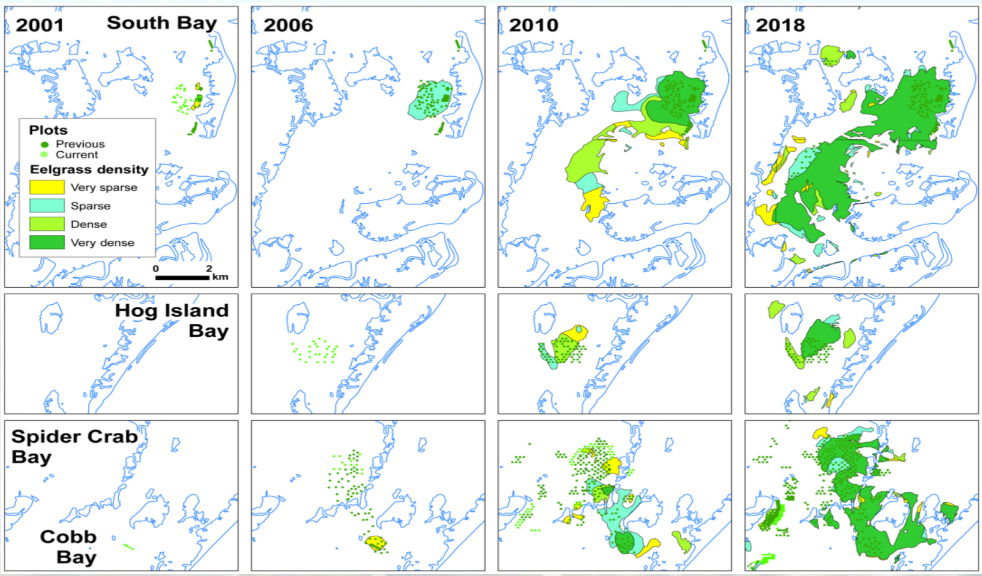


图 3-12 潟湖内鳗草面积变化

参考文献

Orth RJ, Lefcheck JS, McGlathery KS, et al. Restoration of seagrass habitat leads to rapid recovery of coastal ecosystem services. Science Advances, 2020, 6:eabc6434.

案例 7：海草移植机械装置

目前海草床生态修复仍然存在修复成本高、效率低的问题。随着科技发展，国内外研发了诸多海草床修复机械，修复效率逐步得到提高。

中国海洋大学张沛东团队研制了气动式鳗草植株直插机（图 3-13）。机械的外观尺寸、机械净重和播种深度分别为 80cm×50cm×50 cm、35 kg 和 1cm～3cm。。经 100 次监测，机械的种子排量稳定率为 62.3%。该机械尺寸较小，操作较为简单，播种效率可达 1200 m^2/人/天，约为人工播种的 6 倍。

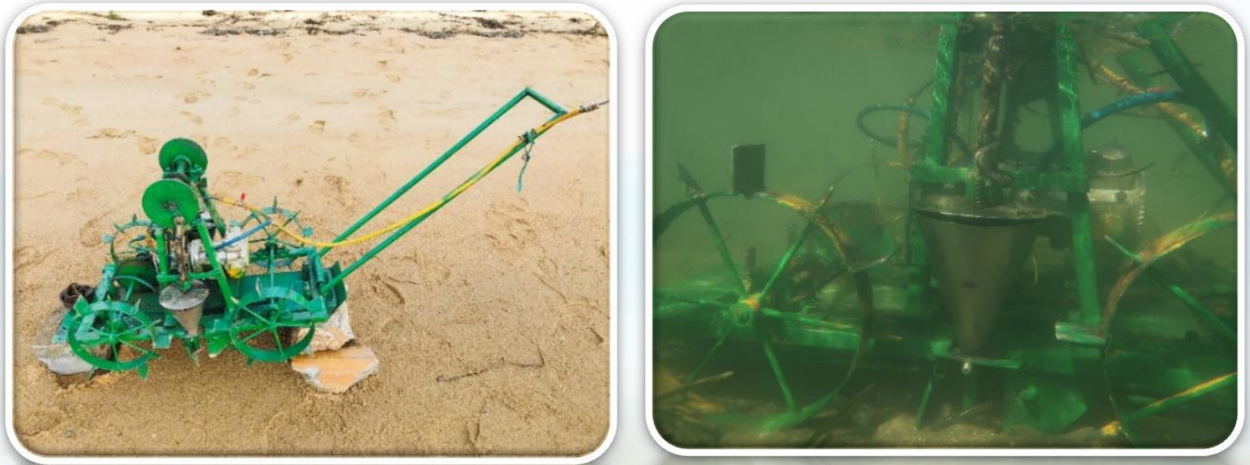


图 3-13 气动式鳗草种子直播机

海区验证显示，播种后 7 个月，播种机播种种子的实生苗建成率为 15%。播种后 1 年，其植株密度达到 72 株/m^2，生物量超过 50 DW g/m^2。除去种子成本外，播种机的播种成本约为 800 元/亩，同比人工播种方法下降 88%。

国外也研发了一些有效的修复机器。Govers (2022)采用注射分配器对鳗草的种子进行播种，但种子流失率比较高。

图 3-14 注射分配器播种

目前也有应用于海草移植的装置，主要应用于草块和草皮移植法。比如海草移植船、改造的挖掘机反铲等等，大幅提高了海草床的移植效率。

图 3-15 海草移植船及草皮反铲

参考文献

Govers LL, Heusinkveld JHT, Gräfnings MLE, et al. Adaptive intertidal seed-based seagrass restoration in the Dutch Wadden Sea. PLoS ONE, 2022, 17(2): e0262845.

Suykerbuyk W, Govers LL, Bouma TJ, et al. Unpredictability in seagrass restoration: analysing the role of positive feedback and environmental stress on *Zostera noltii* transplants. Journal of Applied Ecology, 2016, 53: 774–784.