

自然资办函〔2025〕236号附件

海草床 生态修复手册

海草床 生态修复手册

组织机构和人员

指导机构

自然资源部国土空间生态修复司

编制组成员

陈光程	自然资源部第三海洋研究所
王静	北京市企业家环保基金会
张沛东	中国海洋大学
邱广龙	广西海洋科学院 (广西红树林研究中心)
周毅	中国科学院海洋研究所
陈石泉	海南省海洋与渔业科学院
高亚平	中国水产科学研究院黄海水产研究所
刘松林	中国科学院南海海洋研究所
于硕	自然资源部第四海洋研究所
隋海东	北京市企业家环保基金会
陈顺洋	自然资源部第三海洋研究所
俞炜炜	自然资源部第三海洋研究所
巫鸿艺	自然资源部第三海洋研究所
袁辰睿	北京市企业家环保基金会
谢斌	自然资源部第三海洋研究所
徐少春	中国科学院海洋研究所
张晶	北京市企业家环保基金会

技术指导专家

陈彬	自然资源部第三海洋研究所
黄小平	中国科学院南海海洋研究所
王道儒	海南省海洋与渔业科学院
方建光	中国水产科学研究院黄海水产研究所
范航清	广西海洋科学院 (广西红树林研究中心)
杨彪	北京市企业家环保基金会
毛伟	海南大学
窦瑞	蚂蚁森林基金会
郭栋	辽宁省海洋水产科学研究院
左丽明	河北省水文工程地质勘察院
蓝文陆	广西海洋环境监测中心站

图片提供

邱广龙, 陈石泉, 高亚平, 张沛东, 周毅, 陈光程, 刘松林, 王静, 隋海东, 张晶, 陈顺洋, 袁辰睿, 于硕, 张义涛, 王森林, 王军威, 何云昊, 王思宇, 吴江, 李文涛, 林树浩, Muhammad Husni Azkab, Gary Kendrick, Elizabeth Sinclair

目录

前言	1
一、适用范围	3
二、术语与定义	5
三、海草床生态修复原则	9
四、技术要求	11
4.1 技术流程	12
4.2 生态本底调查	14
4.3 海草床退化诊断	20
4.4 修复目标	22
4.5 修复方式	25
4.6 修复区域选址	26
4.7 修复措施	27
4.8 监测、效果评估及适应性管理	59
附录：海草床的知识	67
一、海草床的分布与影响因素	68
二、海草对海洋环境的适应	75
三、海草床的生态系统服务	80
四、海草床的生态退化	84
五、我国主要的海草植物	91

海草床是具有重要生态系统服务的海岸带生态系统，在消浪护岸、净化水体等方面发挥重要作用，同时为众多海洋生物提供栖息地、产卵场和食物来源，维持着近岸海域的生物多样性和生态系统的稳定。近年来，海草床在固碳、储碳和应对气候变化方面的作用引起了全球的广泛关注。尽管如此，在全球范围内，近岸水体富营养化、气候变化、渔业活动和海岸工程建设等人为因素以及台风、海冰等自然因素的共同作用威胁着海草床生态系统的健康，造成局部地区海草床的生态退化。因此，需积极采取行动推动海草床的保护修复工作，恢复海草床生态系统，提升海岸带固碳增汇和应对气候变化的能力。

当前，我国生态文明建设为海草床的保护修复带来了良好的机遇。《全国重要生态系统保护和修复重大工程总体规划（2021-2035年）》《海岸带生态保护和修复重大工程建设规划（2021-2035年）》《“十四五”海洋生态保护修复行动计划》等规划对我国海草床等滨海湿地的保护修复工作做出了明确的部署，要求加快生态修复技术标准体系的建设，《2030年前碳达峰行动方案》中也明确提出要“提升红树林、海草床、盐沼等固碳能力”。因此，海草床生态保护修复是我国国土空间生态保护修复和应对气候变化措施的重要内容。

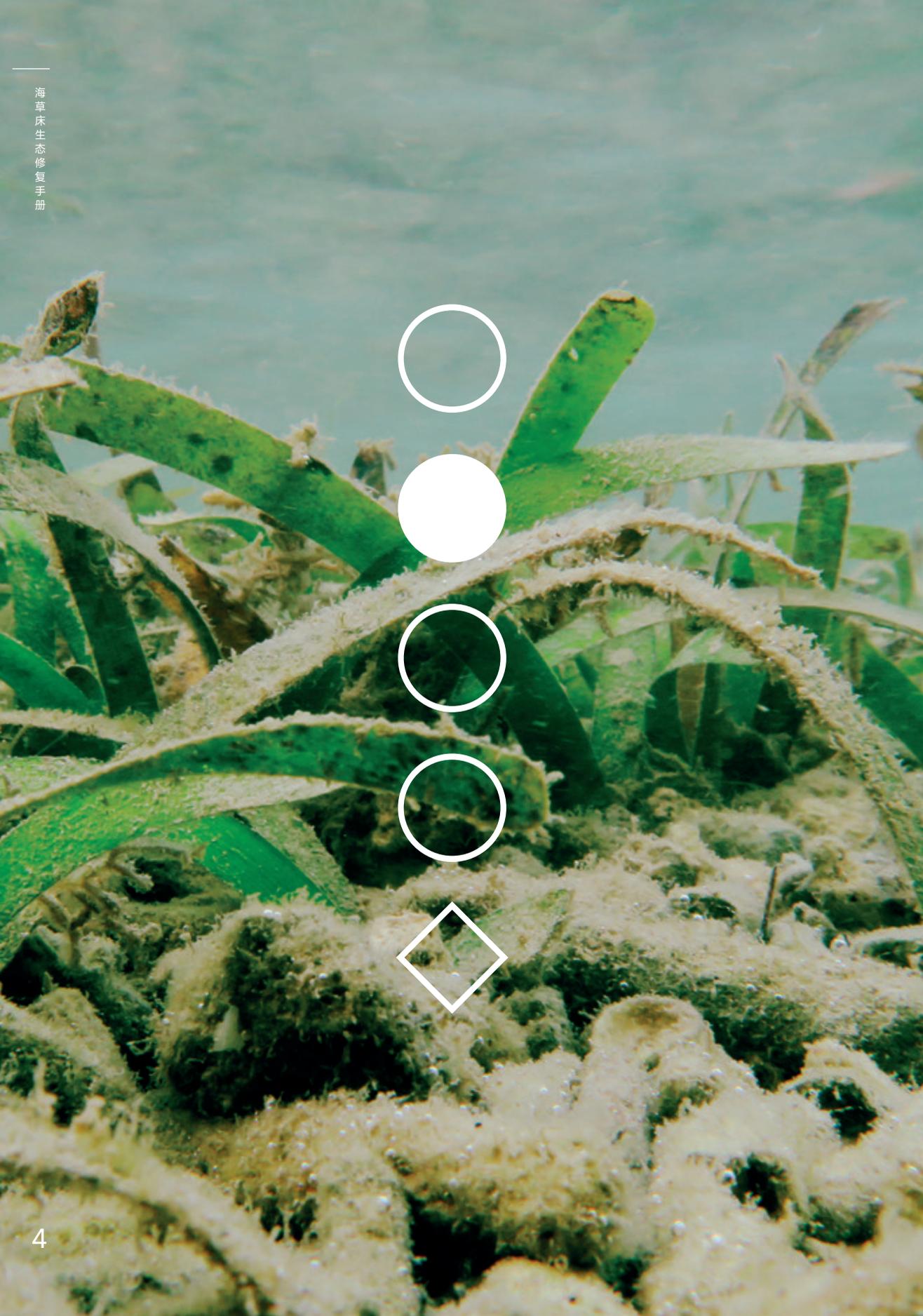
近年来，沿海各地通过实施“蓝色海湾”整治行动和海岸带保护修复工程等海洋生态保护修复重大项目，不断加大海草床的保护修复力度，同时，科研机构、社会公益组织与爱心企业也积极参与，为推动我国海草床保护修复的技术发展与实践做出了积极的贡献。为科学有序地推进海草床的保护修复工作，自然资源部组织有关单位，在梳理国内外海草床生态修复技术、研究成果及修复案例的基础上，结合我国海草床保护修复的实际情况与需求，编制本手册。



一、适用范围

本手册适用于我国海草床的生态修复，包括退化海草床的修复和海草床完全丧失区域的生态重建。

本手册给出了海草床生态修复的术语与定义，规定了海草床生态修复的原则、技术流程、生态本底调查、生态退化诊断、修复目标与修复方式、修复措施选择以及监测、效果评估、适应性管理等主要技术要求和方法。



二、术语与定义

下列术语和定义适用于本手册。

- 海草 Seagrass
- 海草床 Seagrass bed
- 海草床生态修复 Ecological restoration of seagrass bed
- 移植单元 Transplanting unit
- 草块 Seagrass plug
- 茎枝 Shoot
- 种苗 Seedling
- 生殖枝 Reproductive shoot
- 覆盖度 Canopy coverage
- 成活率 Survival rate
- 供体海草床 Donor seagrass bed
- 参照生态系统 Reference ecosystem
- 生态修复效果评估 Effectiveness evaluation of ecological restoration

海草

Seagrass

可以完全生活在海水或河口水域咸水中的单子叶被子植物。

海草床

Seagrass bed

具有一定面积的海草群落。

注：一般认为，海草群落的面积超过 100 m² 时被称为海草床。

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的过程。

移植单元

Transplanting unit

以草块或植株为移植对象的基本单元，包括草块移植单元和植株移植单元。

草块

Seagrass plug

由海草植株和底质构成的集合体。

茎枝

Shoot

海草植株的地上部分。

注：一般包括叶鞘和叶片。

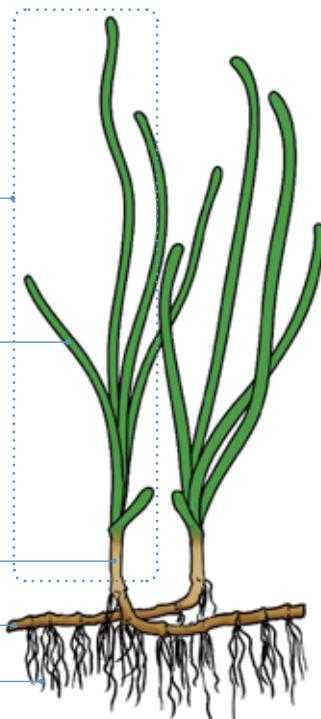
茎枝

叶片

叶鞘

地下茎

根



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，可逐步发育形成花、果实、种子等繁殖器官的茎枝。

覆盖度

Canopy coverage

海草植株地上部分垂直投影面积占地表面积的百分数。

成活率

Survival rate

一定时间内修复区域移栽海草植株成活株数占初植株数的百分比。

供体海草床

Donor seagrass bed

为海草床生态修复提供种子、植株等修复材料的健康海草床。

参照生态系统

Reference ecosystem

能够作为海草床生态修复目标或基准的特定生态系统。

生态修复效果评估

Effectiveness evaluation of ecological restoration

根据海草床生态修复实施前、实施中和实施后的监测结果，对海草床生态修复的效果进行分析，评估海草床生态修复是否达到预期目标的过程。



三、海草床生态修复原则

开展海草床生态修复应遵循下述原则：

——**坚持生态优先，自然恢复。**重视现有海草床的保护，优先开展退化海草床的修复；宜充分利用海草植物的自然更新和扩繁能力，实现植被和生态系统的自然恢复。

——**坚持科学修复，合理节约。**修复目标清晰，选址和修复技术方法合理、科学，优先使用本地物种进行修复；在植被修复的同时应充分考虑其他生物群落保护修复，实现生态系统的修复；应尽量采用经济和环保的修复手段、技术和原材料，减少工程投入。

——**坚持统筹规划，协同增效。**修复项目应与区域发展和国土空间规划相符合，避免与泄洪通道、航道等其他用途空间冲突；充分考虑邻近社区民众的生计，鼓励修复地周边区域社区民众的积极参与。



四、技术要求

4.1	技术流程	12	—
4.2	生态本底调查	14	—
4.3	海草床退化诊断	20	—
4.4	修复目标	22	—
4.5	修复方式	25	—
4.6	修复区域选址	26	—
4.7	修复措施	27	—
4.8	监测、效果评估及适应性管理	59	—

4.1 | 技术流程

海草床生态修复的工作内容包括生态本底调查、退化诊断、修复目标确定、修复方式确定、修复措施确定、生态修复工程实施、跟踪监测、修复效果评估和适应性管理等。具体技术流程见图1。

总体上，海草床生态修复按照如下步骤进行：

1 分析诊断

- 开展生态本底调查，掌握退化海草床及其周边区域的生态环境和人类活动现状，确定海草床的退化程度，并分析其退化原因；

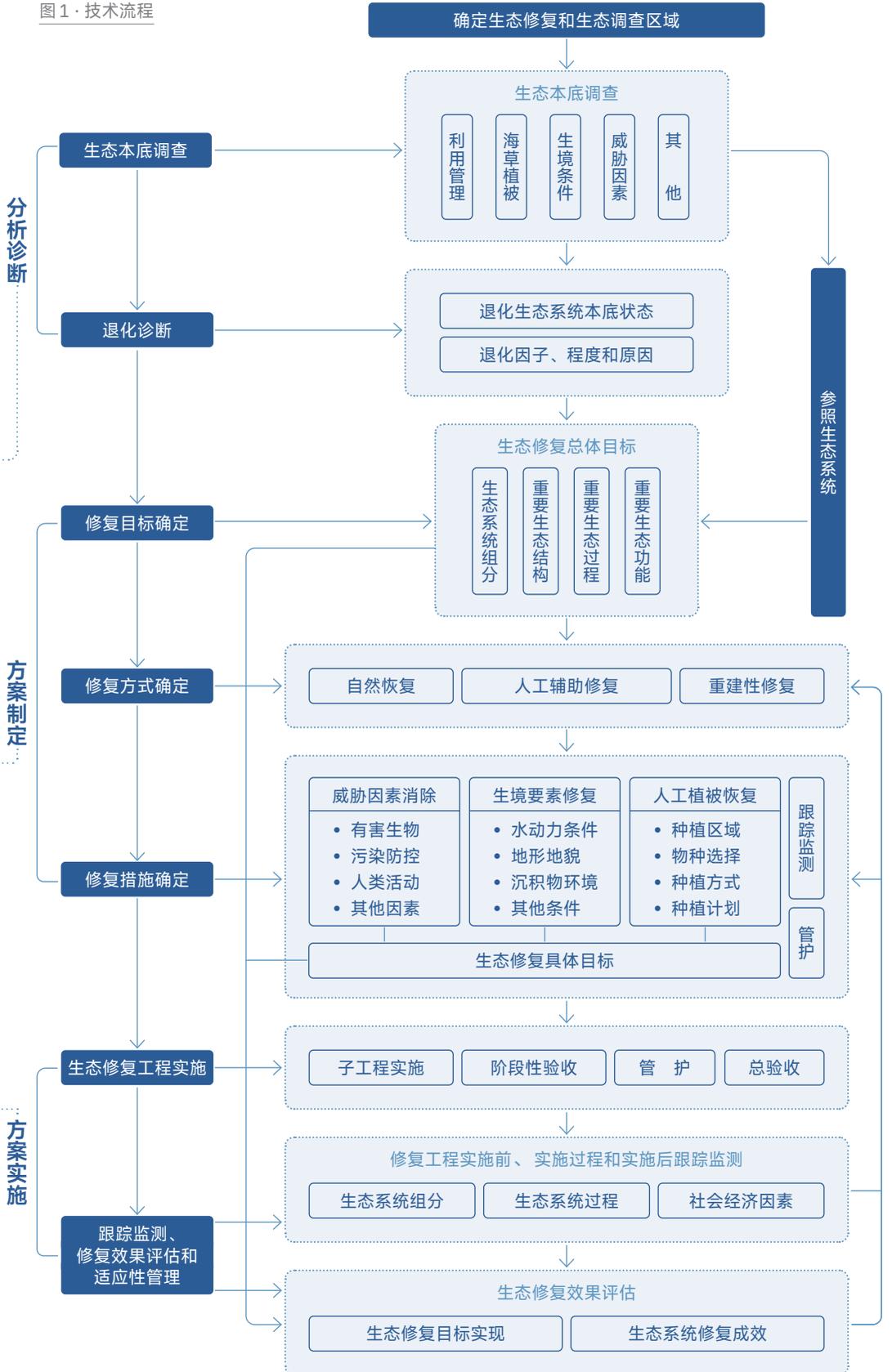
2 方案制定

- 制定生态修复的总体目标，确定生态修复方式；
- 编制生态修复方案，制定具体的修复内容和技术措施、管护措施等，明确修复的具体目标与生态修复监测计划等，并对方案进行论证；

3 方案实施

- 实施生态修复，各子工程完成后进行阶段性验收，实施修复区域的管护，在总项目完成后要进行总验收；
- 开展修复项目跟踪监测和阶段性修复效果评估，了解修复目标的实现情况，并开展适应性管理。

图1·技术流程



4.2 | 生态本底调查

生态本底调查目的在于综合采用资料收集、遥感分析、现场调查、座谈和问卷调查等方式掌握海草床生态系统现状，以及参照生态系统的生态现状。

参照生态系统是能够作为海草床生态修复目标或基准的特定海草床生态系统，可采取以下方式确定：

- ① 海草床生态修复区受干扰前未退化的海草床；
- ② 如退化前海草床生态系统的信息不满足需求，可选择邻近区域内与海草床生态修复区生态系统特征相似、但未退化或轻微退化（保存较完整）的现存海草床作为参照生态系统；
- ③ 如上述条件都不满足，可根据海草床生态修复区或邻近区域的历史、现状及预测数据，构建科学合理的海草床参照生态系统。

4.2.1 | 调查内容

生态本底调查内容包括海草植被、生境条件、威胁因素，以及区域的保护管理和利用状况等信息。

(1) 海草植被

海草植被调查是生态本底调查的关键内容，能够了解区域内海草床分布现状、退化程度，制定合理的修复目标和技术措施提供重要信息。

海草植被调查的内容包括海草床的分布情况、植物群落与自然更新情况等，主要指标有海草分布面积、物种组成、覆盖度、茎枝密度、生物量，以及海草种子（或胎生苗）的成熟期、数量、萌发期等物候特征（表1）。

(2) 生境要素

生境要素调查有利于了解海草生长对生境条件的需求，诊断引起海草床退化的生境因素，并为选划适宜的修复区域提供基础数据。

生境条件主要包括气候条件、水文环境与地形条件、水体化学环境、沉积物环境等。

气候条件主要包括最冷月平均气温、降雨量和气候事件等，其中气候事件主要包括台风、风暴潮和极端气温事件（极寒、海冰等），及这些气候事件的持续时间等。

水文环境与地形条件重点关注水深、潮滩高程（潮间带海草床）、流速、流向、盐度、透光率、水温及冲淤环境，宜了解海草床分布区的水深区间或高程范围。

水体化学环境重点关注水体悬浮物、营养盐等，其中水体营养盐包括硝酸盐、亚硝酸盐、铵盐、活性磷酸盐等。

沉积物环境重点关注沉积物粒度和硫化物等。

(3) 干扰及威胁因素

海草床的干扰与威胁因素调查可为海草床退化诊断、威胁因素消除和生态修复后管护方案制定等提供依据。

海草床生态系统的威胁因素主要包括有害生物和人为开发活动及其引起的生境变化（表1），主要包括：

民众渔业捕捞和养殖活动：民众在海草床泊船、渔业养殖、赶海等活动的作业方式、区域以及频次等。

入海污染物：海草床及周边区域存在的污染物排放情况（包括近岸海漂垃圾），包括污染源分布、主要污染物种类、排污方式、排放强度等。

海岸工程：如周边区域存在海岸工程，关注海岸工程的位置、对水文环境和地形地貌环境的影响范围，以及采取的防护措施等。

有害生物：海草床及周边区域的互花米草 (*Spartina alterniflora*) 的分布情况，浒苔 (*Ulva prolifera*)、石莼 (*U. lactuca*) 等漂浮性大型藻类、叶片附生生物和有害草食性动物的种类、暴发时间和影响范围等。



大型藻类暴发导致泰来草 (*Thalassia hemprichii*)
海草床的退化



村民在贝克喜盐草 (*Halophila beccarii*) 海草床中挖贝类

(4) 保护管理与利用现状

保护管理与利用现状调查有利于了解海草床生态修复区与区域发展规划的一致性，明确利益相关者，以及可能对海草床造成不利影响的人类活动因素。调查内容主要包括修复项目所在海区及周边海域海岸的规划、管理和开发状况、海草床生态修复情况等（表1）。

海草床相关的保护规划与管理：修复项目区域和周边区域的国土空间规划、区域经济社会发展规划、生态保护红线区域保护规定、海草床保护的相关规定、自然保护区范围和管理等。

海草床相关的利用现状：修复海域的权属和行政主管部门，海草床及其周边区域的海域利用现状，海草床生态修复潜在的社会影响（风险）和利益相关者。

海草床生态修复情况：本地区或周边区域内已有的海草床生态修复工程情况，可采用的修复技术措施及投入成本；对于修复面积较大的项目，宜了解所在区域或周边区域的海草种苗的供应能力。

(5) 其他生态本底调查

条件允许时，可对拟修复的区域开展综合的生态本底调查，以了解生态修复前生态系统的本底状况。除上述的内容外，本底调查还可包括大型底栖动物、游泳动物、鱼类浮游生物、大、中型浮游生物等生物群落（表1），以及大型海藻、环境微生物等生物群落调查，也可以开展海草床消浪缓流、固碳等重要功能的调查。



表 1·海草床生物群落与生境条件调查的内容与指标

类别	内容	指标
海草植被	植被覆盖	面积、覆盖度等
	植物群落特征	物种、茎枝密度、茎枝高度、生物量等
	自然更新能力	种子(或胎生苗)成熟期、数量、萌发期等
其他生物群落	大型底栖动物	种类组成、密度、生物量等
	游泳动物	种类组成、资源密度等
	浮游生物	种类组成、丰度等
生境条件	气候条件	最冷/热月平均气温、极端低/高温、降雨量和气候事件等
	水体化学环境	溶解氧、 悬浮物 、 无机氮 (硝酸盐、亚硝酸盐和铵盐)、 活性磷酸盐 、叶绿素 a 等
	沉积物环境	粒度 、硫化物、有机碳、总氮、总磷、无机氮、活性磷酸盐、氧化还原电位和pH等
	水文环境与地形条件	滩面高程/水深 、 水温 、 盐度 、 透光率 、 流速 、流向、潮汐类别、 冲淤环境 和沉积速率等
干扰及威胁	人为因素	民众渔业捕捞和养殖活动、入海污染物、海岸工程等
	有害生物	外来种入侵、敌害生物爆发等
保护管理与利用现状	保护规划与管理	修复项目涉及区域的国土空间规划、区域社会经济发展规划、生态红线区域保护规定、自然保护区范围和管理等
	利用现状	海域的权属和行政主管部门、海域利用现状，生态修复潜在的社会影响(风险)和利益相关者
	生态修复情况	已实施修复工程，可采用的技术措施、投入成本、种苗供应能力等

表中蓝色加粗内容为生态本底调查的重要内容和指标

4.2.2 | 调查区域与站位

生态本底调查的范围除生态修复区和作为参照生态系统的现存海草床外，亦包括可能影响修复区域或项目实施可能影响的周边区域。针对未明确具体修复区域的项目(如需要选择适宜地块开展重建性的修复)，调查区域宜覆盖海草床分布区域所在河口、海湾或潟湖等区域，必要时可以包括周边的河口、海湾等区域。生态资料收集的空间范围宜包括拟实施海草床生态修复项目所在的相对完整的自然地理单元及其行政区。

现场调查的站位宜覆盖整个调查范围，并考虑地形地貌、底质类型、水深、盐度、海流流速、流向、植物群落特征等要素的空间差异设置，空间差异大的区域可视情况增加站位密度。站位设置可参考以下方式：(1) 根据海草床分布面积大小、生境

条件及空间变化特征设置调查断面位置与数量,断面方向应大体上与海岸垂直;(2)每个海草床断面宜均匀设置3个以上调查站位,站位宜涵盖断面上典型的海草群落类型,可根据需要在海草群落分布区外的向海侧和向陆侧增加调查站位。沉积物环境和大型底栖动物的调查站位和样方宜与植被调查一致并同步开展调查。

4.2.3 | 调查方法与时间

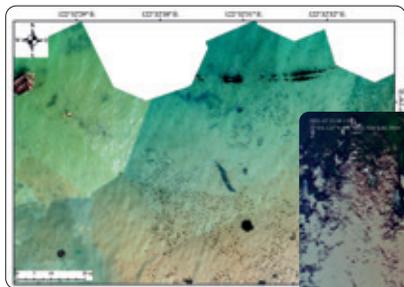
应充分收集区域的自然地理、海草资源、海洋生态环境、海洋开发利用与保护修复等方面的规划、报告和数据等历史与现状资料。如现有资料数据不能满足需要,应通过现场调查和遥感分析等方式获取数据。

可参考历史调查的时间设定本底调查的时间,保持调查数据与历史资料的连续性。开展至少一次全面本底调查,条件允许时可根据区域生态系统特征、调查指标的季节变化特点和项目实际情况,开展季节性的调查。

可参考以下调查方法:

(1) 海草植被

可采用卫星遥感、无人机航拍与现场调查获取海草床的面积和分布边界,如果受水深或透光率条件限制,遥感与无人机航拍不可行时,通过踏勘或走航的方式现场调查海草床面积和分布情况,现场调查可参考HY/T 083和T/CAOE 20.6。



卫星遥感



无人机航拍



现场调查

海草物种组成、分布面积和覆盖度的调查可在每年海草生长旺季开展一次，温带海域调查时间宜为6月~8月，热带—亚热带海域调查时间宜为4月~8月^[1]。海草群落特征的调查，如茎枝密度、茎枝高度、生物量等参数的调查宜至少在生长旺季开展1次，条件允许时开展季节性调查，调查方法可参考HY/T 083和T/CAOE 20.6。

海草花期、果期、种子（或胎生苗）萌发期与数量等信息可通过文献资料收集和调访等形式获得，必要时通过现场调查估算种子（或胎生苗）的数量。

(2) 其他生物群落

其他生物群落的监测根据修复区域水域环境条件，每年宜开展2~4次监测，并符合GB/T 12763.6和SC/T 9110的规定。

(3) 生境条件

水文环境和水体化学环境等调查宜考虑相关指标（如盐度、悬浮物）的时间变化特征，应考虑陆源排放、季节性降水和河流淡水输入等因素的影响，了解水体环境整体情况。

每个站位采集表层和底层水样，水体化学环境各项指标的测定方法按GB 17378.4的规定执行。

水体盐度的调查按GB 17378.4的规定执行，波浪和潮流特征等水文条件的观测宜符合GB/T 12763.2的规定，透光率的调查按HY/T 083的规定执行。

区域的冲淤环境可在现场水文和地形等观测的基础上通过数学模型进行判断。底质类型除根据沉积物粒度定量分析外，也可通过观察简易判断。沉积物粒度、有机碳、总磷、总氮和pH等监测宜符合GB 17378.5和GB/T 12763.8的规定。

(4) 干扰及威胁因素、保护管理与利用现状

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。如敌害生物危害明显，应调查敌害生物的类型、影响区域、面积和影响程度，调查的方法包括无人机航拍、现场调查等，其中互花米草分布现状、生长状况等调查可参考《互花米草调查技术规程》^[2]。



4.3 | 海草床退化诊断

根据本底调查结果，综合分析海草床退化程度和退化原因，识别导致退化的主要胁迫因素，评估退化海草床的可修复性，确定海草床的修复方式。

通过对比退化海草床和参照生态系统，分析出退化的生态系统因子及其退化程度，并结合水动力条件、水质条件、地形地貌条件等相关生境指标，以及海草床及其周边区域的人类活动等威胁因素，识别引起退化的主要威胁因素和影响途径，分析生境条件是否适宜海草植物生长的要求，分析退化因子是否需要通过修复措施恢复，确定生态修复的方式。

退化的海草床一般表现出海草床面积减少、覆盖度下降、分布碎片化，海草地上部分死亡、茎枝密度和生物量降低，叶片附生生物增多、腐烂，地下茎裸露等现象。常见的引起海草床退化的威胁因素主要有：

①**水体富营养化** 投饵型海水养殖、工业生产和沿岸生活中排放的营养物质造成水体富营养化，引起漂浮性大型藻类暴发覆盖海草植被、浮游植物暴发影响水体透光率、水体中病原菌生长，以及海草叶片上附生物增加，影响海草植物的健康。

②**海岸工程建设** 海岸工程建设、运营和拆除改变周边区域的海洋动力条件和冲淤环境，造成局部地区的侵蚀或者泥沙淤积，直接导致受影响区域海草床的丧失。

③**渔业和捕捞活动** 使用耙刺类、陷阱类、拖网类等设施破坏海草植被和生境，不当的养殖活动挤占海草床生存空间。

④**极端高温、严寒、台风天气** 海冰拖曳导致海草植被受损，台风和风暴潮引起植被损失、潮滩地形地貌改变等。

⑤**互花米草等敌害生物** 海胆过度啃食导致海草植被退化、互花米草侵占潮间带的日本鳗草 (*Zostera japonica*) 和贝克喜盐草等海草床。



海草床中摄食海草植物的海胆



互花米草入侵贝克喜盐草海草床

海草床的退化程度

海草床的退化及退化程度可综合参照生态系统和退化海草床的状态、海草床的威胁因素及影响程度、植被和生境条件的变化程度等进行分析。以下海草床退化分析可供参考：

轻度退化

海草床中存在一些威胁因素的影响，但地形地貌、动力和水质等生境条件未发生明显的变化，海草植被仍具有再生能力，消除威胁因素后植被可自然恢复。

中度退化

海草床部分区域的水动力条件、地形地貌条件和水质发生明显变化（如水体交换受阻、淤积或侵蚀），威胁因素消除后如不采取人工干预措施，生境条件恢复缓慢或者难以恢复。

严重退化

海草床大部分区域的生境条件发生明显变化，或者因为人类活动的直接破坏，海草床大规模消失，自然更新能力严重下降或丧失。

对比退化海草床与参照区或者退化前海草床分布面积、覆盖度、茎枝密度等指标的变化情况是判断海草床退化程度的主要方法。例如，可基于海草床植被的连续观测数据进行分析，如5年以上时间内海草床面积累计下降10~30%时海草床为轻度退化，累计下降30~60%时为中度退化，>60%时为严重退化，该方法得到的退化程度可为海草植被修复方法选择和种源地选择提供依据^[1]；也有学者提出，当海草床面积、覆盖度与茎枝密度相比参照系统减少10~30%时海草床出现受损退化，>30%时为严重退化^[3]。开展生态修复时，应综合现场调查、资料收集、遥感分析、调访等方式获取退化区域、参照区域或退化前海草床的植被情况，根据实际情况分析海草床的退化程度、是否需要开展修复以及可修复性等。

4.4 | 修复目标

4.4.1 | 设定原则

生态修复目标是生态修复内容、技术措施的设计依据。综合考虑区域管理利用、相关规划和生态功能的定位等，根据区域的生态现状、生态退化诊断结果，确定海草床生态修复的目标。

海草床生态修复的理想目标为恢复或构建一个能够自我维持或在有效管理下能健康运行的生态系统，不同的生态修复项目应依据具体情况设定不同的修复目标，简而精的定量指标会更加实用有效。

设定目标时要明确对应的生态系统参数，综合修复区域的生态状况、生态修复技术水平、生态系统恢复过程、生态修复相关规划和区域社会经济等多方面因素量化其达到的水平与阶段性的目标，目标的设定参考以下原则：

- ◎ 目标应能够量化，尽可能保证在生态修复监测中能够获得数据；针对生态过程和生态系统服务的目标，应明确对应的参数、表征和计算方法。
- ◎ 海草植被是海草床生态系统最主要的初级生产者和维系生态系统的基础，植被的恢复是海草床生态修复的关键目标。
- ◎ 生态系统的恢复是动态发育的过程，生态修复目标的设定要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。
- ◎ 需要充分考虑科学、经济和社会等多方面的因素设定修复目标，充分考虑自然条件和修复技术的可行性，以及工程的经济性。



4.4.2 | 修复目标的设定

生态修复目标包括总体目标（长期目标）和具体目标（近期目标），两类目标均要明确实现期限，并设定阶段性的目标。

(1) 总体目标

总体目标反映在一定期限内海草床生态系统预期达到的状态及水平，即生态修复的中长期目标。总体目标考虑生物群落、自然环境、重要生态过程、生态系统服务的恢复等几个方面的内容，明确对应的生态系统参数并量化其恢复的水平。

总体目标的设定可参考以下内容：

生物群落的恢复：海草植被、底栖生物、浮游生物和游泳动物群落，食物网、营养级指数等；

自然环境的恢复：水文条件、沉积物环境、水体化学环境等；

重要生态过程的恢复：初级生产力、植被更新能力，以及与周边生态系统的生物和化学物质的连通等；

重要生态系统服务的恢复：消浪弱流、固碳增汇、维持生物多样性和净化环境等。

设定总体目标的实现期限时，生物和自然环境因子可设定为5~10年，生态过程和生态功能的恢复以20年为宜。

(2) 具体目标

在总体目标的基础上进一步明确修复的具体目标。具体目标反映在修复项目实施期限内或者修复后的初期，被修复的具体对象或生态系统参数拟达到的水平。

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：

海草植被的恢复：种植或自然恢复海草床的面积、物种数量、覆盖度、密度、生物量等；

海草床生境条件的恢复：包括水体营养盐、透光率和溶解氧、底质类型、潮滩高程、水文动力条件等；

胁迫因素的消减：威胁海草床的人类活动、污染物排放和海漂垃圾、漂浮性大型藻类、有害动物、外来入侵种等影响范围和程度。

修复项目短期目标的实现期限以3~5年为宜。



动物群落是海草床生态系统重要的组成部分

4.5 | 修复方式

根据退化程度，海草床生态修复的方式包括有效管理下的自然恢复、人工辅助修复和重建性修复3种方式。

- ◎ **自然恢复** 对于轻度受损、恢复力强的海草床生态系统，在去除外界压力或干扰后海草植被可通过自然再生实现自我修复时，不需要实施人工修复措施。主要采取封滩（禁海）保育、消除或减缓威胁因素等措施促进海草植被的自然更新和生态系统自然恢复。自然恢复通常需要项目区域内仍有海草植物并且有足够的种子（或胎生苗），或者邻近区域有的海草种子（或胎生苗）能够随潮水到达修复区域，同时生境条件能满足海草植物生长的要求。
- ◎ **人工辅助修复** 对于植被出现明显退化的海草床生态系统，其生境条件出现退化不再满足海草正常生长要求，只依靠保护和管理不能实现海草床的自然修复时，则通过消除胁迫因素并修复生境条件后，在原地利用生态系统再生能力，或者补植少量的海草植物，促进生态系统的正向演替发育和恢复。
- ◎ **重建性修复** 对于严重受损的海草床生态系统，在威胁因素消除和生境条件恢复到满足海草生长需要的水平后，海草植被无法通过再生或者在少量人工辅助下实现自我恢复的，采用人工种植等手段进行重建性修复。如生境难以修复或修复成本过高，也可采用异地重建的方式进行恢复，应优先选择生境条件适宜的地块开展植被修复。开展重建性修复时，需明确可作为供体的适宜海草床或种苗来源。



人工种植海草

4.6 | 修复区域选址

海草床主要分布于水流速度较小的沿海潟湖、河口和海湾，生长在潮间带和潮下带柔软底质区域。总体上，海草床的修复区应选择在水体交换良好、水质优良且具有良好的隐蔽条件的海域，优先选择海湾或有礁坪保护的水域。水体深度、盐度、透光率、温度、营养盐、水流流速以及底质类型、性质等是判断某一区域是否适宜海草床生长的主要生境因素；适宜海草床生长的区域宜满足以下生境条件^[1,4]：

- 符合 GB 3097 海水水质一类或二类标准；其中，水体氨盐含量宜 ≤ 1.0 mg/L。
- 水体盐度为 10~35（不同海草物种适盐范围有所差异）；
- 底层海水透光率连续低于 10% 的天数 < 15 d；
- 在温带地区海域水体温度连续超过 30 °C 的天数 < 15 d；
- 海底表层为粘土质粉砂、粉砂质砂或细砂，并符合 GB 18668 海洋沉积物质量一类标准；
- 海流流速 ≤ 1.0 m/s。

除了基于上述生境条件的判断外，是否与周边的现有海草床分布地具有相似生境条件也可作为修复区域选址的依据。

同时，海草床生态修复区选址应与区域发展规划以及邻近社区的民众海洋生态系统保护活动相协调，避开旅游、捕捞、航运和养殖等活动频繁、污染物排放超标或存在大型海岸工程建设的海域，获得当地政府、社区民众的支持，并且确保修复区实施修复活动不会对周边其他生态系统产生不利的影响。

在确定修复区域后，还应进一步确定种植海草的边界。



4.7 | 修复措施

4.7.1 | 威胁因素消除

海草床生态修复过程中，应消除可引起植被退化的直接或潜在的威胁因素。

在人类活动影响较大的区域，尤其是在营养负荷较高的海域进行海草床生态修复时，需重点对海水养殖生产、海洋捕捞生产、入海污染及其他人类活动等进行管控，限制沿岸居民生活、养殖和工业生产活动向海草床排放污染物，清理影响海草床的海漂垃圾，以恢复适宜海草生长的海洋环境。

潮间带区域浒苔等大型藻类暴发时，可在退潮时使用耙子打捞水面上的半漂浮状态的大型藻类；对于潮下带海草床中暴发的大型藻类，可使用打捞网潜水打捞或利用其他辅助性工具收集。采集的藻类运回陆地集中处理。

互花米草入侵潮间带海草床时，可采用人工清除、刈割、刈割+覆盖遮荫、翻耕处理等物理措施清除互花米草，但不宜使用化学除草剂和水淹的方法；互花米草的清除方法参考DB31/T 1243和《红树林生态修复手册》（自然资办函〔2021〕1809号附件）^[5]等。互花米草防除难度大，单一的物理方法难以大面积治理，需要根据互花米草的入侵和复发情况综合采用多种方式或多次清除，并加强监测和防控。



清理黄河口海草床中的互花米草

4.7.2 | 生境修复

生境恢复是退化海草床恢复的前提。当海草床生境发生改变或局部生境丧失，例如，水体交换受阻、水流方向改变冲刷岸滩、废弃设施堆砌等，不再适宜海草植物的生长，可采用工程技术手段改善水文条件恢复水体环境、改善底质类型、恢复地形地貌等。也可通过营造适宜的微生境，促进海草植株的定植和植被恢复。

开展生态修复需根据相关法律法规取得工程施工的相关许可或审批手续；涉及清淤、滩涂垫高、堤坝拆除、临时围堰等内容的项目，工程实施前应根据生态环境部发布的《建设项目环境影响评价分类管理名录（2021版）》^[6]中“158海洋生态修复工程”和“160其他海洋工程”的相关要求开展环境影响评价；涉及用海用岛手续办理的项目，工程实施前应按照《自然资源部办公厅关于加强国土空间生态修复项目规范实施和监督管理的通知》（自然资办发〔2023〕10号）^[7]的相关要求完成手续办理。

4.7.2.1 | 地形地貌和水文条件修复

尽管生境修复是海草床生态修复中广泛采用的手段，但与红树林、盐沼湿地的修复相比，较少进行高程改造，在实践中主要涉及坑穴、沟壑的回填、整地、养殖池塘的开口或是拆除、废弃养殖设施的清除等。

因海上养殖活动、海洋工程等改变水动力条件导致海草床退化或丧失的区域，在合理清退这些活动的同时，拆除影响海草生长的人工设施，包括养殖网箱、渔排，养殖池或盐田围堤，以及阻碍水体交换的堤坝等，修复区域水动力条件，促进水体环境的恢复。

养殖池塘在清退后，如果池塘底泥中富含大量饲料残渣和动物粪便，呈缺氧和酸化的状态，在开展修复前宜关闭水闸，在干塘后采用深翻和晒塘（1~2周为宜）的措施改善沉积物的物理和化学条件，然后采用拆除围堤、打开闸口等措施，加强修复区的水体交换。



海南等地潮间带低位养殖池塘恢复潮汐通道后，海草床可自然恢复

在民众赶海、滩涂养殖、船只行驶和停泊区域，人为活动造成海草床地形地貌和植被的破坏，形成坑穴、沟壑或空斑，海草植被无法生长。在实施海草床生态修复前，需平整底质表面、回填坑穴，恢复地形地貌条件。回填优先采用原土，如使用客土进行回填，应分析客土的物理和化学性质是否满足海草植物生长的要求，回填后应留有足够的时间让底质沉实稳固。



美国佛罗里达州，因船只在浅水海草床区域航行时，螺旋桨的作业破坏了海草植被并造成底质的扰动和损失，由于龟裂泰来草 (*T. testudinum*) 生长缓慢，空斑区域海草难以恢复。当地通过在空斑区域投放由生物降解材料制作、装有沉积物的编织袋，以提高受损区域的底表高程，恢复海草的生境条件，促进海草的自然恢复^[8]。

4.7.2.2 | 微生境改造

在海草的修复过程中，也会采取一些措施改善退化海草床的微生境，提高海草植物的营养供给，减缓海流的作用，为海草植物的定植、生长和扩繁提供良好的环境，促进海草植被的恢复。常用的措施包括采用优质客土置换海草床空斑处的沉积物、增殖贝类等底栖动物改善海草床的微生境^[9,10]、投放附属设施改善海草幼苗的定植环境^[11,12]等。

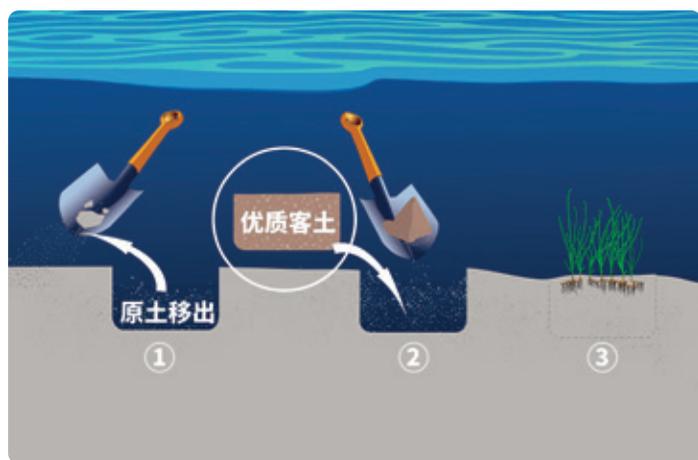


图2·海草床沉积物客土置换示意图

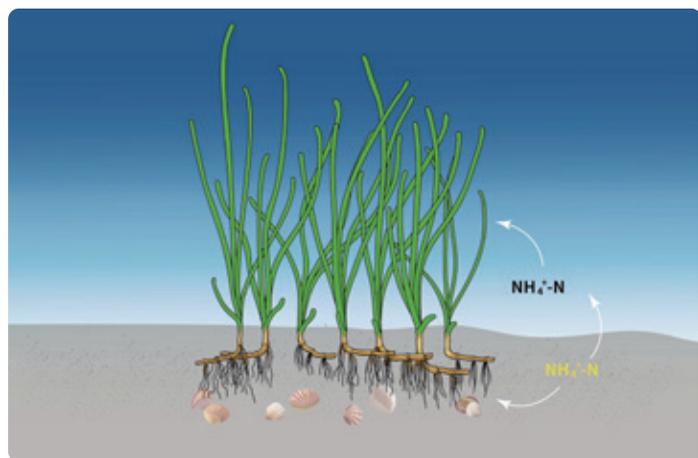


图3·低营养盐的海域适当投放贝类可促进海草植株的生长^[9]

【案例】

“海草捕捉器”助力澳大利亚鲨鱼湾海草恢复^[12]

位于澳大利亚西部的鲨鱼湾 (Shark Bay) 是世界自然遗产，这里拥有约48万公顷的海草床，是全球连片面积最大的海草床之一，养育着成千上万头鲨鱼、海龟、海豚、儒艮及其他多种珍稀海洋生物等。

2010 - 2011年期间，澳大利亚西部海域夏季的热浪导致大片（约13万公顷）海草和大量海洋动物死亡，受影响最大的海草正是该海湾的优势种海草——南极根枝草 (*Amphibolis antarctica*)。在很长的时间内，鲨鱼湾海草床仍未能得到全面的恢复。

为了助力鲨鱼湾的海草恢复，科研人员与鲨鱼湾的社区及志愿者，制作并投放了数以千计的“海草捕捉器”。这些海草捕捉器实际上是装满沙子的长条形麻袋。从海草植株释放出来的胎生苗，其底部拥有倒钩状的刺，极易被麻袋制作的海草捕捉器截获，可加快海草床自然恢复的进程。相比之下，没有投放海草捕捉器的区域，绝大部分南极根枝草胎生苗容易被冲刷到海滩上晒死。



志愿者正在将“海草捕捉器”- 沙包运送到投放海域



被海草捕捉器截获的南极根枝草胎生苗

4.7.3 | 海草物种选择

对于海草床无法通过自然再生能力实现海草床自然恢复时，采用人工种植或补植的形式修复海草植被，应确定修复的海草物种与对应的种植方法等。

退化海草床进行植被修复时，宜使用退化区域的原有物种进行修复；严重退化或者丧失的海草床选择历史分布的优势种或周边海域现有的物种进行修复，轻度或中度退化的海草床可选择现有海草物种进行修复，且以现存的优势种为主进行修复；海草床退化程度的判断参考本手册第4.3部分。如项目所在地区或周边地区分布的物种信息不可获取，可参考表2选择适宜种植的物种。

如种植历史上没有分布的外来物种，应进行引种风险评估并开展跟踪监测，确保引种的生态安全。

表2·不同地区的海草物种的选择

省/自治区	市/县	主要物种
辽宁省	大连市	鳗草、日本鳗草、丛生鳗草、红纤维虾形草
	葫芦岛市	鳗草、日本鳗草
河北省	唐山市、秦皇岛市	鳗草、日本鳗草
山东省	威海市、烟台市、青岛市	鳗草、红纤维虾形草、日本鳗草、丛生鳗草
	东营市、潍坊市	日本鳗草
福建省	福州市、泉州市、漳州市、厦门市	贝克喜盐草、日本鳗草、卵叶喜盐草
广东省	潮州市、汕头市、深圳市、珠海市、江门市、阳江市、茂名市、湛江市、惠州市	贝克喜盐草、卵叶喜盐草、单脉二药草、日本鳗草
广西壮族自治区	北海市、防城港市、钦州市	卵叶喜盐草、贝克喜盐草、日本鳗草、单脉二药草、羽叶二药草、小喜盐草
海南省	文昌市、琼海市、陵水黎族自治县、三亚市	泰来草、海菖蒲、圆叶丝粉草、卵叶喜盐草、单脉二药草、针叶草、日本鳗草
	海口市、澄迈县、临高县、儋州市、东方市、乐东黎族自治县、万宁市	贝克喜盐草、卵叶喜盐草、单脉二药草
	三沙市	泰来草、卵叶喜盐草、圆叶丝粉草、单脉二药草、针叶草

备注：表中未包含港澳台地区；我国的川蔓草属植物主要分布于底质偏向泥质的沿海咸水池塘、水沟等静水环境，在自然海域中较少见，本手册中不列入川蔓草属分布的地区。



卵叶喜盐草



泰来草



贝克喜盐草



海菖蒲



鳗草



日本鳗草

在此基础上，综合考虑修复区域及周边区域的海草床资源、修复技术成熟度与海草植物的生境要求等因素确定修复的物种及搭配方式，并注意以下事项：

- ◎ 优先选择技术成熟度高的物种，其中温带海域宜选择鳗草 (*Z. marina*)、日本鳗草等海草种类，亚热带-热带海域宜选择泰来草、海菖蒲 (*Enhalus acoroides*)、日本鳗草、卵叶喜盐草 (*H. ovalis*) 等海草种类。
- ◎ 生境条件重点考虑底质类型、水深和盐度等，我国主要海草植物的适宜生境可参考表3。
- ◎ 在保证海草成活和正常生长的前提下，尽可能丰富物种多样性，加强丛生鳗草 (*Z. caespitosa*)、贝克喜盐草等濒危物种以及针叶草 (*Syringodium isoetifolium*)、齿叶丝粉草 (*Cymodocea serrulata*) 等分布稀少物种资源的恢复。

表3·我国主要海草植物的适宜生境

物种	适宜生境
鳗草	生长于泥或泥沙底质中，中潮带至潮下带，水深一般 6 m 以浅，盐度一般为 20~35
日本鳗草	喜泥沙底质，主要分布在中潮带，水深一般 3m 以浅，盐度一般为 5~35
丛生鳗草	生长于沙与砾石底质中，主要分布在潮下带，水深一般 3~6 m，盐度一般为 20~35
红纤维虾形草	生长于礁岩性底质，中潮带至潮下带，水深一般 6 m 以浅，盐度一般为 20~35
卵叶喜盐草	生长于泥质与砂质底质中，中潮带至潮下带，水深一般为 20 m 以浅的水域，盐度一般为 20~35
贝克喜盐草	生长于泥质与中砂质底质中，主要分布在高潮带、中潮带，水深 3 m 以浅，盐度一般为 2~28
泰来草	生长于砂质与珊瑚砂底质中，中潮带至潮下带，水深一般 8 m 以浅，盐度一般为 25~35
海菖蒲	生长于砂质与珊瑚砂底质中，中潮带至潮下带，水深一般 5 m 以浅，盐度一般为 25~35
针叶草	生长于砂质与珊瑚砂底质中，中潮带至潮下带，水深一般 5 m 以浅，盐度一般为 25~35
单脉二药草	生长于泥质、砂质及珊瑚砂底质中，中潮带至潮下带，水深一般为 20 m 以浅的水域，盐度一般为 20~35
圆叶丝粉草	主要分布于砂质和珊瑚砂底质，中潮带至潮下带，水深一般为 10 m 以浅的水域，盐度一般为 25~35

4.7.4 | 海草种植

4.7.4.1 | 种植方式

海草的种植方法包括移植法、播种法和种苗种植法等。通常一个物种可采用不同的种植方式，宜根据修复时间、海草植物的物候特点和工程成本等因素综合选择种植方法。

● 移植法

移植法是指从自然生长茂盛的海草床中采集长势良好的植株或草块，利用某种方式将其移植于待修复海域的一种方法；该方法利用海草无性生殖的特点，可以在较短时间内形成新的海草床，适用范围广，是迄今为止使用较多的海草床修复方法。直接从野外采集植株或草块可能会对现有的海草床造成影响，因此只有在当移植规模较小且附近有健康且充足草源的海草床时采用移植法，并且应充分评估移植的效果以及移植对供体海草床的生态影响，严禁出现边修复边破坏的现象。

● 播种法

播种法是指从自然生长良好的海草床采集成熟的海草种子（或胎生苗），然后将其直接散播到修复海域或埋藏于底质中，使其萌发生长形成稳定的植被。该方法是利用海草的有性生殖方式实现海草床的修复，可以保持海草的遗传多样性，对天然海草床影响较小、易于实施，适合大规模修复，特别在风浪较小的地区海草种子可以下沉、发芽和定植，而不被海水冲走^[13]。这种方法尽管修复成本低，但出苗率也可能较低，主要适用于鳗草、日本鳗草等种子产量高、易存储的海草物种。



收集的鳗草生殖枝（佛焰苞）



收集的鳗草种子



● 种苗种植法

种苗种植法是将种子置于适宜条件下培养，待其萌发并长成幼苗后再移栽的一种方法。该方法在避免对供体海草床产生损害、保持海草遗传多样性的前提下，可减少修复区域生境条件等对海草种子萌发和生长的限制，提高种子的发芽率和种苗成活率。此外，该方法也为种子（或胎生苗）成熟期以外的时间开展种植提供种苗保障。该方法适用于修复中等规模但具有重要性的退化海草床，或是对已修复的海草床实施的补种。种苗种植法主要适用于鳗草、日本鳗草等种子产量高、易收获的海草物种^[14,15]。开展一定规模的修复项目时（如>10万株），宜采用繁育的种苗进行种植，避免对供体海草床的潜在破坏。



表 4 我国常见海草物种的种植方式

物种	适用的种植方式	适用条件说明
鳗草	移植法、播种法、 种苗种植法	<ul style="list-style-type: none"> ① 修复规模较小，移植的植株易获得、便于运输、对供体海草床影响较小或不造成影响时，可选择成体移植。由于植株为成体，该方法相比播种法具有相对较高的成活率； ② 修复规模大、自然植株获得困难或对草床影响较大，且目标修复区水流平缓、种子（或胎生苗）被动物摄食的压力小时，适合用播种法，该方式操作相对简便，劳动强度相对较小，但幼苗生长的各个阶段存在的限制较多，成活率相对较低，需提高播种的密度； ③ 修复规模较大，移植植株难以获得，海区水动力较强，种子因流失和被摄食、被掩埋造成的损失比例高时，适宜采用种苗栽植；使用较大规格的种苗有利于成活率。
日本鳗草	移植法、播种法、 种苗种植法	除生长的水深范围不同外，日本鳗草具有与鳗草较接近的生境条件，修复方式的选择参考鳗草。
卵叶喜盐草	移植法（优先）、 播种法、种苗种植法	<ul style="list-style-type: none"> ① 通常难以采集到足够的种子，因此优先采用移植法； ② 对于具有丰富种子产量的种群，可采集种子直播或培养成种苗进行栽植，该方式能够减少对原生草源破坏。
贝克喜盐草	移植法、种苗种植法	<ul style="list-style-type: none"> ① 修复区域环境适宜且有足够量草源时，宜采用草块法移植，采用移植方式主要为海草成体，植株环境抗逆性较好； ② 修复区域环境适宜且有培育苗种时，采用种苗栽植，该方式能够减少对野生种源破坏。
泰来草	移植法、种苗种植法	<ul style="list-style-type: none"> ① 修复区域环境适宜且有足够量草源时，宜采用单株或草块法移植，采用移植方式主要为海草成体； ② 修复区域环境适宜且有培育苗种时，采用种苗栽植；该方式能够减少对野生种源破坏。
海菖蒲	移植法、种苗种植法	<ul style="list-style-type: none"> ① 修复区域环境适宜且有足够量草源时，可采用单株或草块移植，采用移植方式主要为海草成体； ② 修复区域环境适宜且有培育的苗种时，采用种苗栽植，该种植方式能够减少对野生种源破坏。
单脉二药草	移植法、种苗种植法	<ul style="list-style-type: none"> ① 修复区域环境适宜有足够量草源时，可采用单株或草块移植，采用移植方式主要为海草成体； ② 修复区域环境适宜且有培育的苗种时，采用种苗栽植，该种植方式能够减少对野生种源破坏。

4.7.4.2 | 海草移植法

(1) 移植方法

移植法包括草块移植法和植株移植法，基于不同海草物种形态大小等差异选择移植方法。日本鳗草、卵叶喜盐草、贝克喜盐草等小型海草可采用草块移植法；鳗草、海菖蒲、泰来草等较大型海草可采用植株移植法。

● 草块移植法

直接在现有的海草床内植株密集区域挖取圆柱体、长方体或其他不规则体的草块。在采集移植单元时，草块移植单元的挖取深度大于海草地下根茎分布深度，草块移植单元的采集间隔大于1 m；鳗草、海菖蒲和泰来草草块的采集面积以不超过0.25 m²为宜，日本鳗草、泰来草和贝克喜盐草草块的采集面积以不超过0.12 m²为宜。尽量从不同海草床区域采集草块，减少对局部海草床的影响。

移植单元采集后宜尽快完成移植或者进行临时保存。移植单元在保存和运输过程中，宜保持植株湿润新鲜，必要时可使用冰袋以保持新鲜。具有密集的根系和较长叶片的物种，在移植和转移过程中需注意避免对根系和叶片造成损伤。

移植时，首先在修复区域挖出比移植单元略大的坑，将草块放入后压实（图4）；草块移植密度根据草块大小确定，草块越大，密度越低。海流流速较高时可用U型或V型等枚订固定（图5），可选用不锈钢或玄武岩纤维材料等材质制作的枚订。对小型海草，在移植后可适当使用网罩对种苗进行保护。

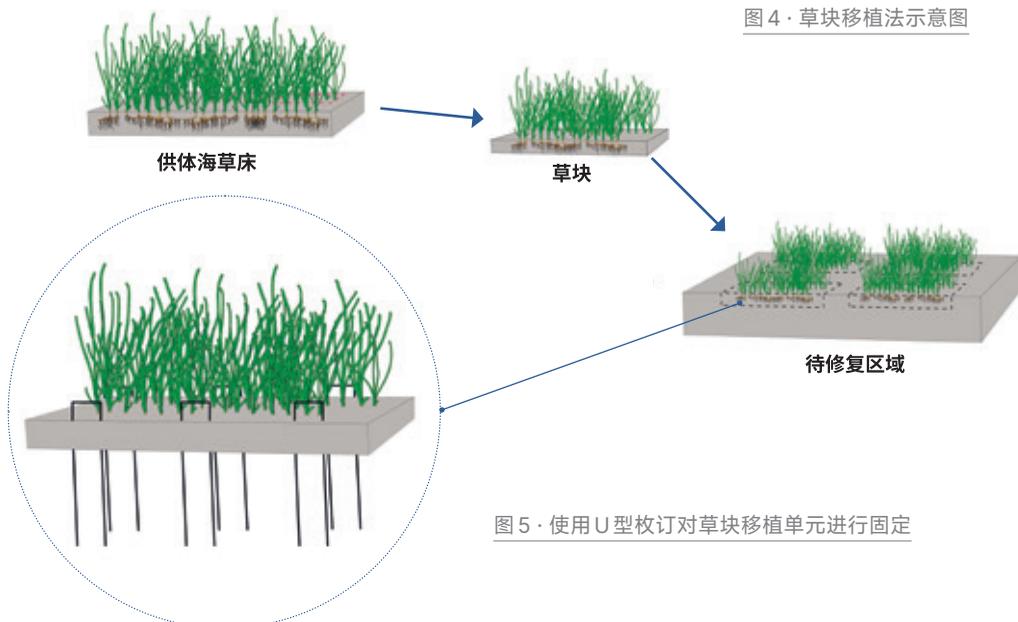


图4·草块移植法示意图

图5·使用U型枚订对草块移植单元进行固定

● 植株移植法

鳗草、海菖蒲和泰来草等物种，采集草块或者海草植株个体后，将其分截制作移植植株单元。为增强海草植株相互之间的“凝聚力”，提高移植的成活率，每个移植单元可由一定数量的茎枝数量组成，即将2株及以上植株组成1个植株束作为移植单元(图6)。例如，鳗草植株移植单元包含3~4个茎枝，泰来草植株移植单元的茎枝数不低于4个。

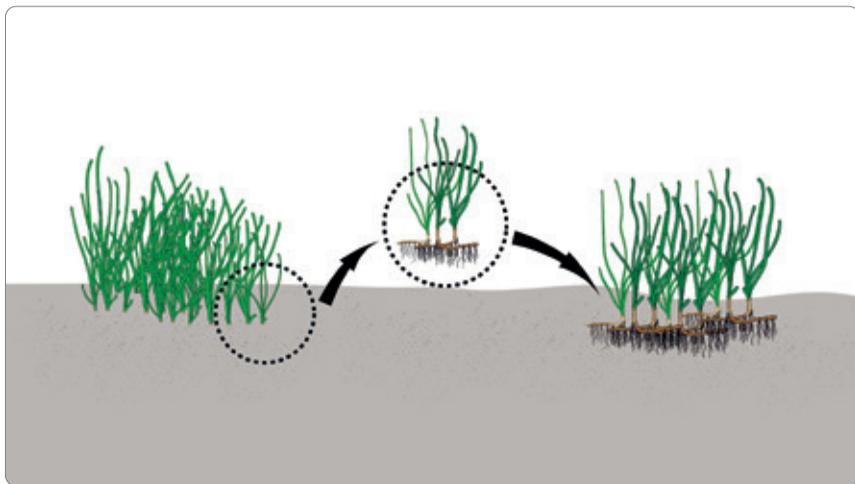


图6·海草植株的移植单元示意图

对于叶片较长的海草植物(如鳗草和海菖蒲)，可剪除部分叶片使其叶片长度控制在20~30cm，便于植物的运输和种植，并减少种植后水流对植株的冲刷作用。

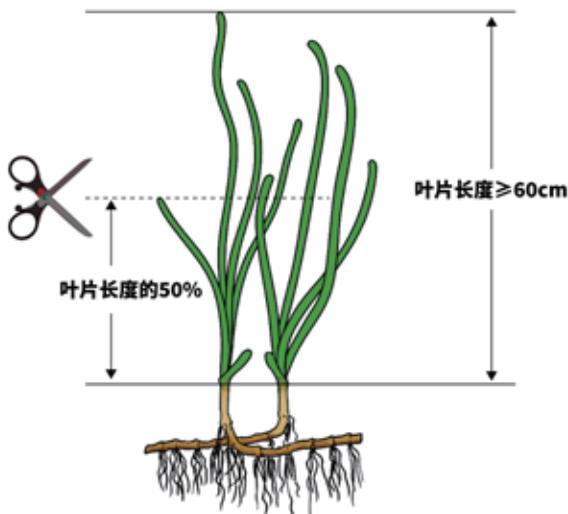


图7·修剪海草植株的叶片

在修复的区域，直接利用海草移植单元进行种植，或辅以器具将根状茎埋入底质并固定。根状茎埋藏深度的确定宜参照供体海草床中海草植物根状茎的生长深度。海草的移植方法如下：

- ◎ **直插法**：将移植单元根状茎植入底质中，移植单元间距宜为25~50 cm；该方法适用于海流流速低的海区。
- ◎ **枚订法**：使用U型、V型或T型枚订，将移植单元固定于移植海域底质中，将根状茎掩埋、压实，移植单元间距同直插法；适用于海流流速中等的海区。
- ◎ **框架法**：用麻绳或棉绳等易降解材料将移植单元根状茎绑缚于密度较大的环保材质制作的移植框架上，将其压入移植海域的底质内，将根状茎掩埋、压实；移植框架的间距宜为50~200 cm；待海草植株定植成活后，可对移植框架进行回收再利用。可用于海流流速较高的海区。

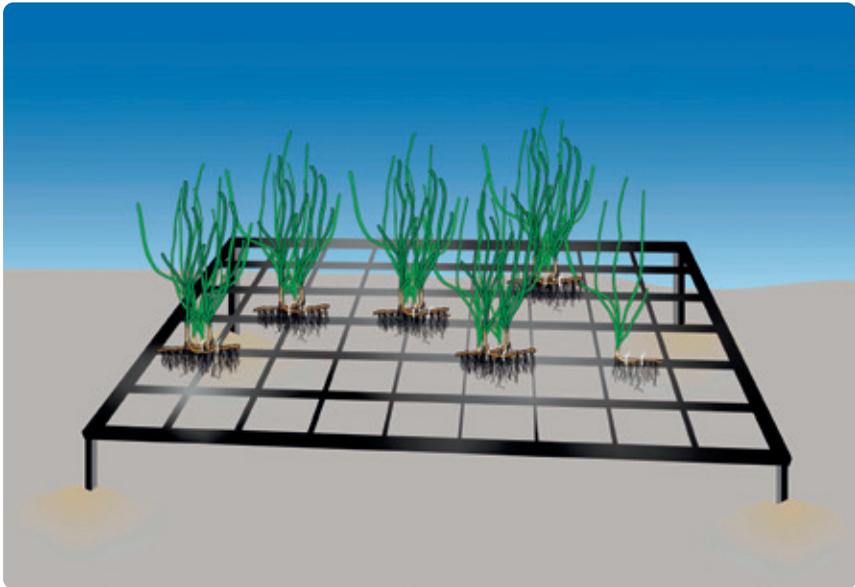


图8·框架法示意图

- ◎ **根状茎配重法**：用麻绳或棉绳等易降解材料将移植单元的根状茎绑缚或系固于长条状石块等硬质块状物上，将其掩埋于移植海区底质中^[16]。

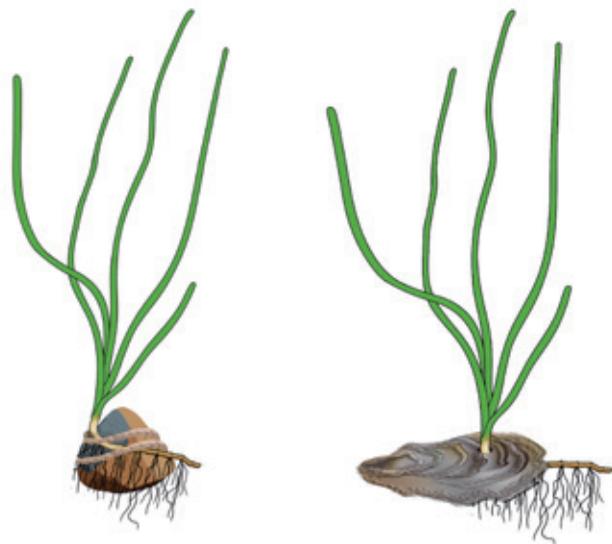


图9·根状茎配重法(左)和牡蛎壳移植法(右)示意图

- ◎ **牡蛎壳移植法**：使用重量大于10 g的牡蛎壳，在每个贝壳上钻两个直径为5~7 mm的孔，各插入一个鳗草芽，形成一个种植单元^[17]。贝壳具有重力，抛入后可沉入海底。

(2) 移植时间与移植密度

海草的生长具有季节性，移植海草的存活与生长很大程度上受移植时间和移植密度的影响，通常在生长季移植的效果更好；移植时间宜根据移植物种的物候特征和修复区的气候特征，并充分考虑移植工作的安全性和舒适性。

我国常见海草物种的移植时间可参考以下要求^[2]：

温带海域：鳗草移植时间为4月~6月或9月~10月；日本鳗草移植时间为5月~6月；

热带—亚热带海域：日本鳗草移植时间为11月~翌年2月；海菖蒲、泰来草、卵叶喜盐草移植时间为3月~6月。

移植密度宜充分考虑不同海草物种植株形态大小等差异，在生境条件较差时可适当采用密植的方式提高海草的定植效果。其中，鳗草、海菖蒲和泰来草的种植密度以 ≥ 4 株/ m^2 为宜，日本鳗草和卵叶喜盐草以 ≥ 8 株/ m^2 为宜。

【案例】

根状茎绑石法在唐山海草床修复中的应用

唐山曹妃甸鳎草海草床是我国面积最大的海草床，面积达3200公顷，受渔业生产作业等高强度人类活动破坏，海草床边缘区域退化严重，部分区域已完全消失，亟需开展海草床生态修复。

2018年唐山市开始鳎草的生态修复，修复中采用根状茎绑石配重的方法进行植株移栽。采用铁铲或其他工具人工挖取粗壮的鳎草茎枝，在海水中洗掉海草根状茎附带的底质及其他杂物，随后对采集到的鳎草植株进行标准化，叶片保留20 cm，地下茎保留3~5个茎节。取3~4株具根茎的新鲜鳎草植株，以地下茎和叶鞘的节点将其对齐，用可降解的绳子（棉绳、麻绳等）将鳎草植株结实地系绑在一个50~150 g 的石头（选择适合绑扎的石块）上，如此形成一个移植单元。

在移植时，在移植地点用小铲挖5 cm 深的坑，将绑好石头的移植单元埋入沉积物中并压实，地下茎应尽量摆放至水平状态。每组移植单元之间间隔20~30 cm，10行10列构成一个3 m × 3 m 的移植斑块。移植半年后，海草的茎枝密度增加了4倍，在移植1年后种植的海草斑块外沿开始扩展，5年后种植区域形成连片分布的海草。



根状茎绑石法制作的移植单元



海草床修复半年后



海草床修复1年后



海草床修复5年后

4.7.4.3 | 播种法

(1) 繁殖材料的采集与处理

在海草种子成熟季节，采集生殖枝等生殖材料，用于收集种子（或胎生苗）或直接播种。为了最大限度地发挥种子存活和生长的潜力，宜在修复区域就地采集海草种子。如海草床严重退化或者采用重建性修复时，宜在与修复区域环境条件相似的区域采集种子，需重点考虑水深、退潮后的暴露时间和底质环境等生境条件的相似性。选择修复区域临近的海草床采集海草种子（或胎生苗），有助于保障生物安全和遗传多样性^[18]。选择供体海草床时不仅要考虑对供体海草床的影响，还应该考虑种子在恢复区域的环境条件下存活和生长的潜力，因此需要对供体海草床的状况进行初步评估，以判断其是否适合收获种子（或胎生苗）。

我国主要海草物种的种子采收期如表5所示。

种子（或胎生苗）的采集宜充分考虑海草植物花果期。在海草种子（或胎生苗）成熟季节进行采集，以种子散落开始至种子散落高峰期之间为宜，即10%的生殖枝种子成熟并散落至25%的生殖枝种子成熟并散落的时间范围内进行采集。种子采集时，单位面积种子采集强度不宜高于单位面积种子产量的10%。

表5·不同海草植物的适宜采种时间

种类	地区	适宜时间
鳗草	山东、河北、辽宁	5月中旬至7月
日本鳗草	山东、辽宁	8月至11月
	广西	4月至6月
	广东、海南	6月至9月
海菖蒲	海南	7月至12月
泰来草	海南	10月至12月

海草种子（或胎生苗）收集宜充分考虑不同海草物种种子（或胎生苗）的形态特征，考虑不同海草物种休眠期等特点选取种子的运输和保存方式：

- ◎ 温带海域的鳗草和日本鳗草：采集的生殖枝置于海水池中通氧暂养，或装入网袋（孔径<种子短径）并固定在船只、木桩、筏架等设施上进行海区暂养。待种子脱落后，人工搓洗生殖枝去掉茎枝、叶片等杂质，收集种

子。种子短时间运输 (≤ 24 h), 可将种子放入网袋 (孔径 $<$ 种子短径), 直接置于泡沫箱或恒温箱, 用海水浸湿的毛巾覆盖。长时间运输, 需将种子放入盛有自然海水的可密封容器, 置于泡沫箱或恒温箱, 温度应控制在 $4\sim 20^{\circ}\text{C}$ (可视需要加入冰袋或启动控温装置等)。种子宜置于温度为 $4\sim 7^{\circ}\text{C}$ 的海水中冷藏保存, 或装入网袋在海水池中保存; 如需长期保存 (3个月~1年) 时, 种子宜置于温度为 $4\sim 7^{\circ}\text{C}$ 、盐度为 $40\sim 50$ 的人工海水中冷藏保存, 可添加抗菌剂 (如纳米银溶液、硫酸铜溶液) 防止种子发霉腐烂。种子在运输过程中宜浸水低温保存。

- ◎ 热带海域的海菖蒲和泰来草: 在海草果实成熟时采集果实, 放入网袋后固定于海区中进行现场暂养, 或置于海水池中暂养, 当果实爆裂后, 收集种子; 种子采集后宜尽快完成种植或进行临时常温保存。



潜水员采集鳗草生殖枝



在天然海域挂袋保存海草种子



室内保存的鳗草种子

(2) 播种方法

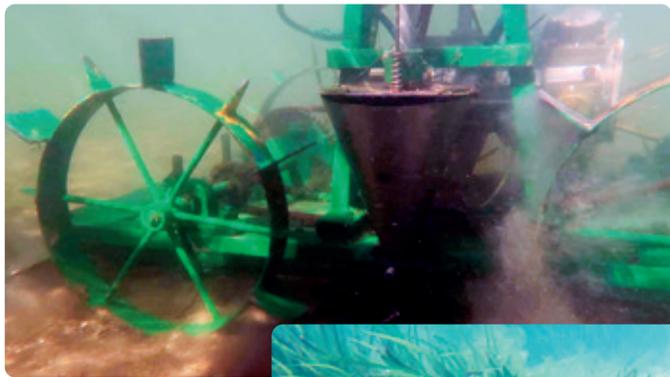
种子修复法包括直接播种法、人工埋种法、泥块(丸)播种法、网袋播种法和生殖枝播种法等；其中，直接播种法和生殖枝播种法适用于鳎草、日本鳎草等种子产量高、易收集和存储的海草物种。

● 直接播种法

对于底质较软的泥沙底质，低潮时将海草种子直接播撒在拟修复海域(图10)。播种后，宜增加网罩进行保护。该方法适用于海流流速较低的海域。



图10·直接播种法示意图



机器播种鳎草种子



播种海域长出的鳎草

● 人工埋种法

在拟修复的海草床海底表层挖取播种空穴，将种子放入空穴后，用底泥将种子掩埋、压实（图11），掩埋深度以2~3 cm为宜。该方法适用于海流流速较低的海域。

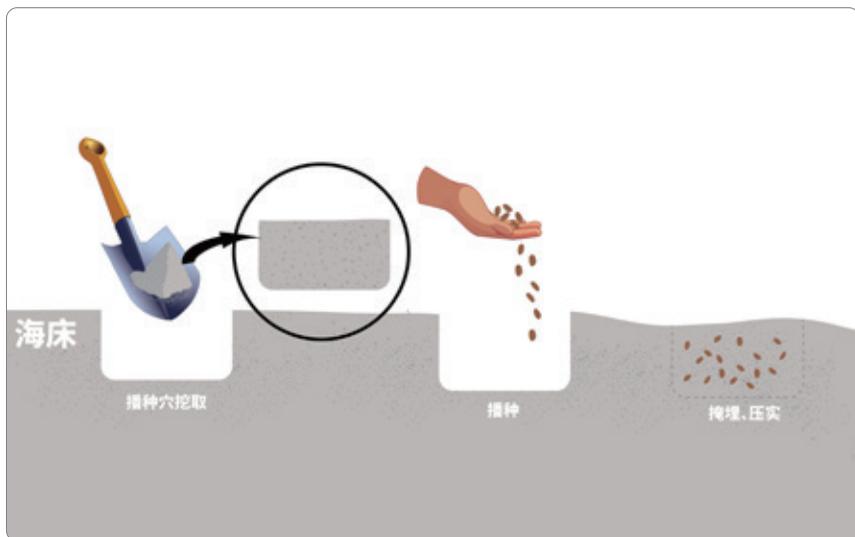


图11·人工埋种法示意图

● 泥块(丸)播种法

使用黏土和细沙加水制成泥块，将种子置于泥块(丸)内形成播种单元（图12），低潮时将泥块(丸)投掷于修复海域底质表层并掩埋，避免泥块(丸)被水流冲散或流失。该方法适用于海流流速中或较低的海域。



图12·泥丸制作示意图

【案例】

泥丸播种法在东营海草床修复中的应用

黄河口历史上分布有我国面积最大的日本鳗草海草床，2015年其面积达到1030公顷。但受台风、互花米草入侵和人类活动等因素影响，海草床资源严重衰退，近年来分布面积仅几公顷，零星分布。

2022年启动，当地开始实施日本鳗草的植被恢复工作，并采用泥丸播种法进行海草种子的种植^[19]。该方法使用购买的商品化海泥，与海水按5:1的比例混合形成软泥，将鳗草种子包在湿泥丸中作为一个种植单元，每个泥丸约10粒种子；种子包于泥丸内部，离泥丸表面至少3 mm，泥丸直径为2~3 cm。

泥丸制作好后在24小时之内播种，播种前每隔3小时喷水一次，保持泥丸表面湿润。于低潮期间使用栽苗器在泥滩挖孔埋藏泥丸，每间隔25 cm种一粒泥丸，泥丸种植深度为2~3 cm。



制作的泥丸



将泥丸播种于潮滩



播种后长出的海草

● 网袋播种法

将种子与泥沙混合，装入棉制或麻制等易降解材料制成的网袋，网袋孔径宜小于种子短径，网袋规格可根据种子大小及海流流速进行调整。在网袋中可加入一些底质，如底泥^[20]和海草碎屑^[21]，提高海草的萌发效果。低潮时将网袋投掷于修复海域或将网袋平铺在底质的表面，并用U型、V型或I型等枚订将网袋固定于底质表面。待种苗茎枝达到适宜高度后，可剪碎并回收网袋避免造成污染。该方法可用于海流流速较高的海域。



图 13 · 网袋播种示意图

【案例】

网袋播种法在山东威海天鹅湖海草床修复中的应用

山东荣成天鹅湖是典型的潮汐潟湖，是现今我国北方为数不多且保存较为完好的沙坝潟湖体系之一。湖内大部分区域水深小于1.5 m，大潮潮差1.15 m，小潮潮差0.64 m，潮流性质属于不规则半日潮性质。

1979年，由于水产养殖而人工关闭了潟湖入口导致水体交换不良造成海草床的退化，到1982年底当地的鳗草几乎完全消失。人工堤坝于1986年被拆除，水文环境得到有效改善。

2010年以来，鳗草的植被恢复陆续开展。在海草床的植被恢复中，当地采用了网袋播种法进行种子种植^[20]。防护网袋使用孔径为1 mm（孔径应小于种子短径）的粗麻布缝制成，网袋尺寸为120 cm × 90 cm（长×宽）。将鳗草种子与25~30 kg的沉积物混合并装入网袋中并将网袋缝合（400粒种子/袋），填充沉积物由细砂和粉砂/淤泥按照1:3比例混合而成。

在修复区域，将网袋平整为2~3 cm厚铺于海底表面，并用U形钉固定。



装填完成的播种网袋



用U形钉固定在海底的播种网袋



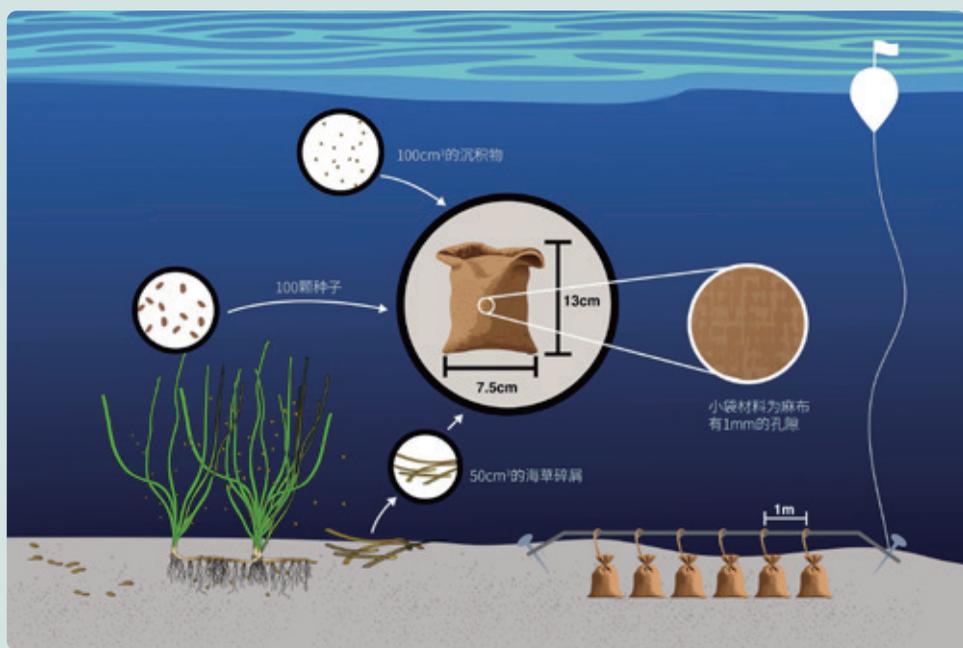
网袋播种法长出的鳗草

【案例】

小袋法在英国威尔士海草床修复中的应用

为减少潮汐海流运动对播种海草种子的影响，英国科学家在威尔士海域做了用小袋法进行海草床修复的实验^[21]。该方法将大约100粒种子连同100 cm³的沉积物和50 cm³海草碎屑一起装入小麻袋。麻袋无涂层，尺寸为13 cm × 7.5 cm，孔径在1 mm左右；填装的沉积物采集于现有海草床内，海草碎屑是来自采集种子的茎枝的降解残骸。将种子袋捆绑固定在麻绳上，每隔1 m捆绑1个种植袋，每条绳子上有六个种子袋。

将带有种子带的绳子使用钢钉固定在修复区域。这种方法取得了较好的效果，监测结果显示，在适宜的环境中，94%的袋子都长出了海草幼苗，每个袋子在种植10个月后平均长出了约4个成熟的茎枝。



小袋法种植的示意图^[18]

● 生殖枝播种法

将生殖枝采集后直接固定在拟修复海域，待种子成熟后不断散落于海底并埋入底质中，经种子萌发、幼苗定植后形成稳定的植被。可用麻绳或棉绳等易降解材料将生殖枝下端绑缚或系固于长条状石块（或者人工加工的硬质块状物）上，将其投掷在海底表面；也可将生殖枝夹在绳子上，绳子的一端固定在海底，另一端通过浮球漂浮在水面^[22]。



图 14 · 生殖枝播种法被用于海草植被修复

(3) 播种时间与密度

海草种子（或胎生苗）的萌发与幼苗定植很大程度上受播种时间和播种密度的影响，播种时间为自然海域种子萌发前1~2个月，播种密度通常根据设定的修复目标和种子（或胎生苗）的成苗率设计；成苗率可按照1~10%预估，在环境适宜度高、水流流速较低的区域可按照10%预估，反之则应适当降低预估的成苗率并提高播种密度^[2,23,24]。

我国常见的海草物种的播种时间和播种密度可参考表6。



表 6 · 部分地区海草植物的适宜播种时间和播种密度

地区	种类	适宜播种时间	播种密度 (粒/m ²)
辽宁, 河北, 山东	鳗草	9月至11月中旬, 及翌年3月	≥ 15
	日本鳗草	10月至11月, 及翌年3月	≥ 30
福建、广东、广西、海南	日本鳗草	4月至6月	≥ 30
	卵叶喜盐草	3月至6月	≥ 15
海南	海菖蒲	3月至6月	≥ 4
	泰来草	3月至6月	≥ 4

4.7.4.4 | 种苗种植法

通过育苗再进行移植已经成为全球普遍使用的一种修复方法。该方法将海草种子置于载有人工流水系统的培养池或海水池塘中, 萌发培育成种苗, 至种苗达到适宜高度后, 将种苗移植到拟修复海域。

(1) 海草植物育苗

可于近岸建立陆基温室内或海湾/近岸的围堰池塘进行海草育苗。陆基温室应具有海水给排水系统、适宜盐度、良好的透光能力和一定的控温能力的培养池, 围堰池塘应具有良好的换水能力, 以可连通海水并实现潮汐涨落的池塘为宜。

选取富含有机质的粉砂、粉砂质砂作为育苗基, 筛除大块砾石/贝壳备用。播种前用高锰酸钾等对基质进行消毒。在培养池或池塘内先铺一定厚度的育苗基质, 将种子均匀撒播于基质表面, 密度应适中, 避免过多种子堆积在一起, 播种后覆盖 1 cm 厚的基质并轻轻压实。也可在塑料育苗钵中进行育苗, 对于体型较小、叶片较薄的海草物种, 适合放置于营养钵中培育, 以减少后续移植对植株的破坏。

播种后, 要维持培养池或池塘内水体的流动和水温; 对温度、光照、换水频率等进行适时调整可以提高苗的生长速度和出苗规格, 也利于增强植株抗性和对环境的适应性, 提高移植成活率。在夏季和秋季可加快水体交换速率, 并且避免水温过高, 冬季和春季期间可减缓换水频率, 并维持一定的适宜温度。

(2) 种苗移植

当播种苗茎枝高度至10~20 cm高时，可分装于营养钵中进行移植，也可直接使用海草植株进行移植（参考4.7.4.2部分）。

使用营养钵进行移植时，宜采用生物降解的材料制作营养钵。营养钵可选择方形或圆形，高度以6~8 cm为宜，面积可在100~300 cm²。植入海草后，钵内适当填充基质，以增加纸浆营养钵的重力，提高稳固性，同时也为海草幼苗提供初期生长所需的养分。将带有海草幼苗的营养钵运输至待修复区，移植过程中宜尽可能减少幼苗根部的损伤。在移植区，挖取空穴，放入营养钵后用底泥进行掩埋固定。



用营养钵作海草移植单元



潜水员水下载植种苗

【案例】

山东荣成东楮岛鳗草植被修复

荣成东楮岛海区位于山东半岛东部，桑沟湾的南岸，属暖温带季风性气候，周边海域的底质以基岩、砂砾和中砂质为主。历史上海草繁盛，曾遍布岸线的潮间带和浅潮下带，生长有鳗草、红纤维虾形草 (*Phyllospadix iwatensis*)、日本鳗草和丛生鳗草等海草植物。但由于人类活动的影响及自然环境的改变，当地的海草床自70年代末以来逐渐退化，至今约80%的植被已经丧失。



海草床丧失后的海域

为恢复东楮岛的海草床资源，当地实施了一项1033亩的海草床生态修复。该项目选择历史上有海草床分布且生境条件适宜的地块开展海草植被修复，选用当地的优势海草物种鳗草作为修复物种。

于6月~8月期间，在鳗草种子成熟期采集鳗草繁殖枝，分选出成熟健康的种子。将分选后的种子在4℃条件下保存，于11月至翌年1月在温室育苗场内进行播种育苗。选择海草自然分布区域底质相似的海沙（粒径0.125~0.5 mm）与海泥，添加纤维（椰糠或纤维泥炭土）形成育苗基质，该基质有利于形成草块。将种子播种后覆盖1~2 cm的基质，放置于温室的培养池内培育约4周，种子陆续萌发。

幼苗在10~18℃的温度下生长，经3~5个月后茎枝高度达到15 cm以上。于4~6月（此时海区水温约12~18℃）将育成的苗种转移至可降解的、预先装有配制的基质纸浆容器（盘或杯等）进行分装，并运输至海区种植进行。根据容器类型与种苗规格合理设置分装的密度，其中，纸浆盘（35 cm × 35 cm × 8 cm）内可装50~100株幼苗，纸浆盒（20 cm × 15 cm × 8 cm）内移植幼苗25~50株、纸浆杯（内径12 cm，高度8 cm）内装10~20株。每1个容器为1个移植单元。

在修复海区，先进行挖穴，再将移植单元放置进移植穴内，并掩埋，深度约6~8 cm。在2 m × 2 m的种植网格区内种植2个移植盘，在1 m × 1 m的网格区内种植1~4个移植盒或8个移植杯。

海草移植一年后，修复区域海草茎枝密度平均达367株/m²，高于初始种植海草密度100株/m²；平均覆盖度为71.76%，修复效果显著。



温室内培养鳗草种苗



修复海区种植的海草幼苗

分装的鳗草种苗移植单元



鳗草植株成功定植



种植18个月后的海草植被

4.7.5 | 修复区域管护

海草易受到自然因素和人为因素的影响，进行海草床修复后，海草仍可能会受到较大威胁。在海草床修复方案编制时应明确详实的管护方案，并在开展修复工程后实施必要的管护措施，直至海草成功定植。管护期以2~4年为宜。

海草床的管护措施主要包括以下：

- ① 在修复区域封滩保育海草床，禁止在修复区域内从事会影响海草床的捕捞、养殖、休闲娱乐等活动；宜在海草床修复区设立标识物、警示牌，必要时可采用围网保护；同时，在近岸陆地显著位置设立标志碑，注明海草床建设、保护和管理等信息。



海草床修复区的标识牌

- ② 建设单位应聘用专人巡视看护，具备条件的建设单位宜在修复区设立视频监控系统，实现对海草床修复区的实时观测与监控。
- ③ 控制生态修复区内及周边区域的水产养殖强度、减少向海里排放生产活动废水和生活污水、控制旅游活动强度以及减少沿岸开发活动等，在有效的管理下促进海草床生态系统的自然恢复。

- 4 清除海漂垃圾与漂浮性大型藻类等威胁因素。定期观察修复区域内海漂垃圾、互花米草和大型藻类等出现的情况，及时开展清理工作，降低其对海草生长和存活的影响；在营养负荷较高的区域，要加强对修复区域内大型藻类的观察和清理。对于潮间带区域，互花米草清除后会再生长或扩散入侵，需加强观察和清除。



漂浮性大型藻类

- 5 在修复管护期对海草的密度、成活率和覆盖率进行监测，当海草恢复情况未达到项目预期的目标时，应及时进行海草补植。



海草修复后的监测

- 6 提高海草床保护的公众参与；通过设置科普展板、开展自然教育、聘请社区民众参与修复区域的管护工作等方式，提高周边民众对海草床的保护意识，形成社区参与海草床保护的良好氛围。

4.8 | 监测、效果评估及适应性管理

4.8.1 | 生态修复监测

在生态修复实施后，开展生态修复的监测，了解修复海草床生态系统与周边区域的状态及其变化趋势。

生态修复的方案编制阶段应同步制定生态修复监测方案，明确监测内容、监测区域和站位，并制定详细的监测计划。

除现场监测获取定量数据外，可综合采用观察、资料收集、调访等方式获取其他数据信息。可定期采集海草床植被、动物和生境状况的影像资料，直观反映生态修复的效果。



定期拍摄的影像资料可直观反映海草床的修复效果

(1) 生态修复监测内容

尽管越多的内容和指标被纳入监测可以更加全面地反映生态修复后生态系统的状态，但也会增加监测和后期评估的工作量。因此，海草床生态修复效果评估应根据设定的修复目标、生态修复的方式和生态系统恢复的阶段等因素综合确定监测内容。

在修复工程完成后的5年内，生态监测的重点是被修复的具体对象或生态系统参数，主要包括湿地植被、动物群落、生境条件，以及威胁因素。

海草群落是海草床生态监测的必要内容。对于采用人工种植修复的海草床，在恢复的初期（如3~6个月内），主要针对种植的海草的成活情况进行监测；植株成活率是反映移植法修复的海草床植被定植情况的指标，而采用海草种子播种的修复项目，可通过种子萌发和种苗成活情况反映植被定植情况。定植后海草植物可实现扩繁，海草床面积、覆盖度、海草茎枝密度和生物量等则是进行植被群落监测的重点指标。

如修复项目涉及生境修复和威胁因素消除的，在工程完成后也宜开展生境和威胁因素的监测（表1）。

经过一定时期的恢复（如工程完成5年后），海草植被能够稳定并自我维持后，生态监测则需关注水体环境、沉积物环境和生物群落的恢复。除海草植被外，其他生物群落，包括大型底栖动物、海草叶片附生生物和鱼类浮游生物是海草床的重要组成部分，在海草植被构建后它们也会快速恢复，因此在修复监测中也应考虑这些生物群落的恢复动态。此外，也可以增加表征生态系统固碳、消浪缓流和生物多样性维持等重要生态系统服务相关指标的监测，并考虑海草床的社会和经济效益，如海草床提供的渔业产品、教育科研和休闲旅游等方面的监测。



海草修复效果监测记录

(2) 生态修复监测区域

监测区域应包括海草床修复区和作为参照生态系统的海草床；如本底调查阶段获取的相关信息缺乏或不完整，不足以反映海草床修复前的生态状况，可设置表征

修复前生态系统的对照区来开展监测。对照区的海草床应与修复区域具有相似生境条件和退化情况，且不能受到生态修复项目的影响；其中，生境条件重点考虑水体盐度、水深、透光率、营养盐、沉积物粒度和水文环境动力条件等。

在各监测区域根据修复区面积、植被特征、地形地貌、底质类型、水深、盐度等生境条件布设监测断面和站位，监测断面和站点的布设宜覆盖典型区域，在空间差异大的区域可视情况增加站位密度。针对各修复地块，可根据面积大小设置断面数量，断面方向大体上宜与海岸垂直，每个断面宜均匀设置3个以上站位，可参考GB/T 45031设置。条件允许的项目，应设定固定监测站位开展长期持续跟踪监测，监测站位确定后，尽量保持不变。

可根据需要在修复项目实施过程中开展周边区域的生态环境监测。

(3) 生态修复监测时间

生态修复监测的期限宜参考生态修复目标实现的时间进行设置。条件允许时，宜在生态修复工程实施前和实施过程开展生态监测，获取生态修复实施前、修复实施过程和实施后的监测数据，掌握修复区生态系统的变化情况。

海草植被、动物群落和生境条件的监测时间可设定为5~10年，生态系统服务的监测以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3~5年，以满足短期目标评估的需要。

在海草床修复后，生态修复监测的频次可根据恢复时间调整，参考如下：

- 在植被修复后的短期内，定期监测种子萌发或植株的成活情况，监测频次宜充分考虑不同海草物种种子休眠期、萌发期或成熟植株生长特性等差异，可15~30天开展1次监测，在种苗定植后结束；
- 海草床生态修复后的第2年至第5年，宜逐年开展生态监测，海草植被和沉积物环境监测可每年开展1次，动物群落的监测需考虑所在区域的季节因素，每年宜开展2~4次监测；
- 在海草床生态修复5年后，可根据实际情况开展定期监测，宜每隔2~3年间隔开展1个年度的监测。

如生态修复工程设定了阶段性目标，监测频次的设定也需要考虑阶段性目标实现情况评估的需求。

参照区、对照区和修复区域的监测宜同步开展。在生态修复后，对照区和参照区的生态监测频次可适当减少，如不具备开展长期监测的条件，参照区和对照区至少开展1个年度的监测。

4.8.2 | 生态修复效果评估

根据生态修复的目标设置情况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。

在生态修复工程完成后5年内，重点评估修复项目具体目标实现的情况，主要包括海草植被的恢复、海草床生境条件的恢复和胁迫因素的消减等，评估的指标设置参考4.4.2部分。

在生态修复工程完成5年后，评估内容可针对修复的总体目标设定，关注生物群落的恢复、水文条件、沉积物和水体环境的改善、重要生态过程与重要生态系统服务等恢复情况。

根据生态修复监测结果，从生态修复目标实现程度、生态系统状态恢复程度两个方面开展生态修复效果评估。

(1) 生态修复目标实现程度的评估

将评估指标划分为正向指标和负向指标。正向指标（如覆盖度、面积等）数值增大时，生态系统往改善的方向发展，负向指标（水体营养盐、悬浮物浓度等）则相反。

通过对比评估指标的现状值与目标值，计算评估指标对应修复目标的实现程度。评估指标的现状值根据对应的监测指标的监测结果计算，目标值为修复方案设计的目标值、参照区的监测值或虚拟参照生态系统的状态值。

根据评估指标的类型及其实现程度值，可参考判断生态修复目标实现程度的等级。可设定，当正向指标的实现程度值 $> 85\%$ 时，修复效果优，修复目标实现， $70\% \sim 85\%$ 时修复效果良，修复目标基本实现；负向指标的实现程度值 $< 115\%$ 时，修复效果优，修复目标实现， $115\% \sim 130\%$ 时修复效果良，修复目标基本实现。

(2) 生态系统恢复成效评估

针对海草植被、动物群落、生境条件和重要生态系统服务等对应的指标，通过将指标的状态值与生态修复前的水平对比，评估生态系统状况的改善情况和生态系统服务提升成效，并且分析各指标的变化情况和趋势。

各指标生态修复前的状态值通过本底调查资料或对照区的监测值确定。

可根据监测获得的数据情况，参考GB/T 45031、GB/T 42631-2023第5.2部分或T/CAOE 20.6等相关的方法，从生态系统的水平综合评估海草床生态修复的成效。



4.8.3 | 适应性管理

修复的适应性管理要求根据监测和修复效果的评估结果，结合观察、资料收集、调研等方式获取其他数据信息和影像资料，分析生态修复的总体效果，识别修复效果不理想的修复目标、修复对象以及所在位置，或对生态系统恢复造成不利影响因素。

对于存在修复效果不理想的项目，可采用专家咨询或调查、试验的方法进一步分析其是否对生态系统的恢复造成不利影响，或者明显影响生态系统的恢复，以及影响修复效果的原因。

对效果不理想的修复技术和方法，分析修复技术和方法的适用性、生态修复的方案和实施过程中存在的问题，及时对相应的技术方法和工程措施进行优化调整，或者引入新的技术方法改善修复的效果，继续开展生态修复工程，并加强修复后管护，直至实现预期目标。例如，对于采用自然恢复的海草床，如修复区内海草自然生长数量未达到预期目标，可采用少量的人工种植或者改良微生境条件等措施促进植被恢复。

项目实施过程关注工程对周边的生活、生产的影响，如出现不利影响，应及时调整实施进度，分析影响的原因，必要时对生态修复的技术措施进行优化调整。

可综合环境的长期变化以及国土空间规划和社会经济发展等情况，对生态修复的总体目标进行适当和合理的调整。

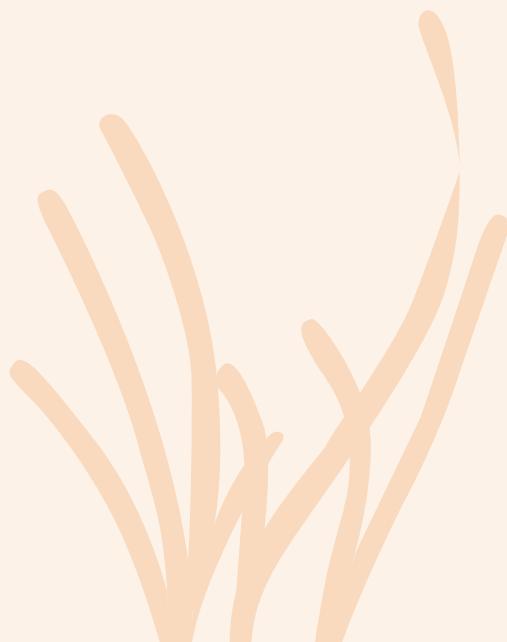
规范性引用文件

GB 3097	海水质量标准
GB/T 12763.2	海洋调查规范 第2部分：海洋水文观测
GB/T 12763.6	海洋调查规范 第6部分：海洋生物调查
GB/T 12763.8	海洋调查规范 第8部分：海洋地质地球物理调查
GB 17378.4	海洋监测规范 第4部分：海水分析
GB 17378.5	海洋监测规范 第5部分：沉积物分析
GB 18668	海洋沉积物质量
GB/T 41339	海洋生态修复技术指南 第4部分：海草床生态修复
GB/T 42631-2023	近岸海洋生态健康评价指南
GB/T 45031	海草床生态修复监测与效果评估技术指南
HY/T 083	海草床生态监测技术规程
SC/T 9110	建设项目对海洋生物资源影响评价技术规程
SC/T 9440	海草床建设技术规范
DB31/T 1243	互花米草生态控制技术规范
T/CAOE 20.6	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

参考文献

- [1] 自然资源部. 海洋生态修复技术指南 第4部分：海草床生态修复：GB/T 41339-2023. 北京：中国标准出版社，2023.
- [2] 国家林业和草原局，自然资源部，农业农村部. 互花米草调查技术规程. 2023.
- [3] 自然资源部海洋预警监测司. 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：T/CAOE20.6-2020. 北京：中国海洋工程咨询协会，2020.
- [4] 农业农村部渔业渔政管理局. 海草床建设技术规范：SC/T 9440-2022. 北京：中国农业出版社，2023.
- [5] 自然资源部，国家林业和草原局. 红树林生态修复手册. 2021.
- [6] 生态环境部. 建设项目环境影响评价分类管理名录（2021年版）. 2020.
- [7] 自然资源部. 自然资源部办公厅关于加强国土空间规划监督管理的通知. [2020-05-26]. https://m.mnr.gov.cn/gk/tzgg/202005/t20200526_2521189.html.
- [8] Florida Department of Environmental Protection. Seagrass Restoration Efforts. [2023-12-28] <https://floridadep.gov/rcp/rcp/content/seagrass-restoration-efforts>.
- [9] Meysick L, Norkko A, Gagnon K, Gräfnings M, Boström C. Context-dependency of eelgrass-clam interactions. *Marine Ecology Progress Series*, 2020, 647: 93-108.
- [10] Donaher SE, Baillie CJ, Smith CS, Zhang SZ, Albright A, Trackenberg SN, Wellman EH, Woodard N, Gittman RK. Bivalve facilitation mediates seagrass recovery from physical disturbance in a temperate estuary. *Ecosphere*, 2021, 12: e03804.
- [11] Sharma S, Goff J, Moody RM, Byron D, Heck Jr, Power PS, Ferraro C, Cebrian J. Do restored oyster reefs benefit seagrasses? An experimental study in the Northern Gulf of Mexico. *Restoration Ecology*, 2016, 24: 306-313.
- [12] Statton J, Sinclair EA, McNear S, Kendrick A, Kendrick GA. Assisting recovery of seagrass in Shark Bay, Gathaagudu. Final Report to the National Environmental Science Program, Marine Biodiversity Hub, 2021.

- [13] UNEP-Nairobi Convention/WIOMSA. Guidelines on Seagrass Ecosystem Restoration for the Western Indian Ocean Region. UNEP, Nairobi, 2020.
- [14] Zarranz ME, González-Henríquez N, García-Jiménez P, Robaina RR. Restoration of *Cymodocea nodosa* seagrass meadows through seed propagation: Germination in vitro, seedling culture and field transplants. *Botanica Marina*, 2010, 53: 173-181.
- [15] Van Katwijk MM, Van Tussenbroek BI, Hanssen SV, Hendriks AJ, Hassen L. Rewilding the sea with domesticated seagrass. *BioScience*, 2021, 71: 1171-1178.
- [16] Zhou Y, Liu P, Liu B, Liu X, Zhang X, Wang F, Yang H. Restoring eelgrass (*Zostera marina* L.) habitats using a simple and effective transplanting technique. *PLoS ONE*, 2014, 9: e92982.
- [17] Lee KS, Park JI. An effective transplanting technique using shells for restoration of *Zostera marina* habitats. *Marine Pollution Bulletin*, 2008, 56: 1015-1021.
- [18] Gamble C, Debney A, Glover A, Bertelli C, Green B, Hendy I, Lilley R, Nuuttila H, Potouroglou M, Ragazzola F, Unsworth R, Preston J. *Seagrass Restoration Handbook*. Zoological Society of London, UK, 2021.
- [19] Xu S, Zhou Y, Qiao Y, Yue S, Zhang X, Zhang Y, Liu M, Zhang Y, Zhang Z. Seagrass restoration using seed ball burial in northern China. *Restoration Ecology*, 2023, 31: e13691.
- [20] Zhang P, Fang C, Liu J, Xu Q, Li W, Liu Y. An effective seed protection method for planting *Zostera marina* (eelgrass) seeds: Implications for their large-scale restoration. *Marine Pollution Bulletin*, 2015, 95: 89-99.
- [21] Unsworth RKF, Bertelli CM, Cullen-Unsworth LC, Nicole E, Jones BL, Lilley R, Lowe C, Nuuttila HK, Rees SC. Sowing the seeds of seagrass recovery using hessian bags. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2019, 7: 311.
- [22] Liu M, Xu S, Yue S, Qiao Y, Zhang Y, Zhang X, Zhou Y. Seed provision efficacy of detached reproductive shoots in restoration projects for degraded eelgrass (*Zostera marina* L.) meadows. *Sustainability*, 2023, 15: 5904.
- [23] 许战洲, 黄良民, 黄小平, 朱艾嘉, 王汉奎. 新村湾泰来藻有性繁殖的初步研究. *热带海洋学报*, 2008(2): 60-63.
- [24] 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.





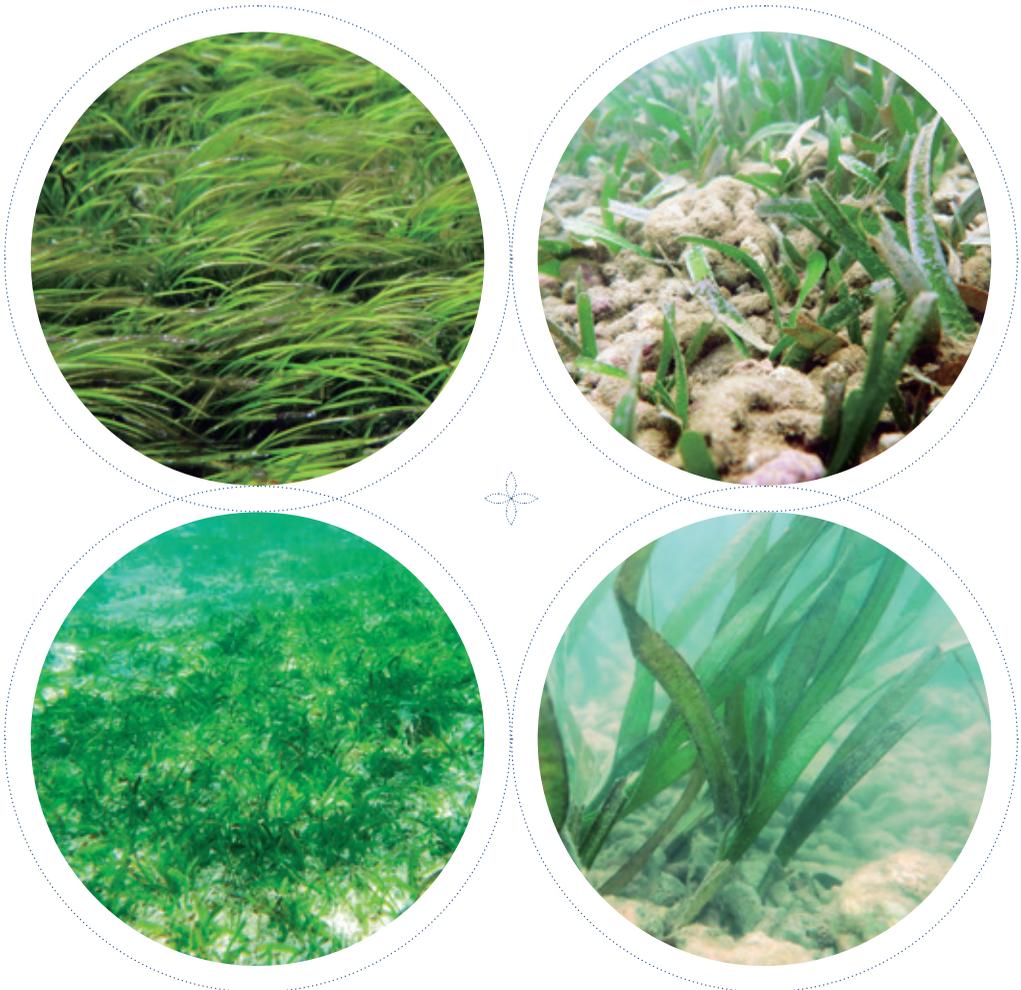
附录：海草床的知识

一	海草床的分布与影响因素	68	—
二	海草对海洋环境的适应	75	—
三	海草床的生态系统服务	80	—
四	海草床的生态退化	84	—
五	我国主要的海草植物	91	—

一 | 海草床的分布与影响因素

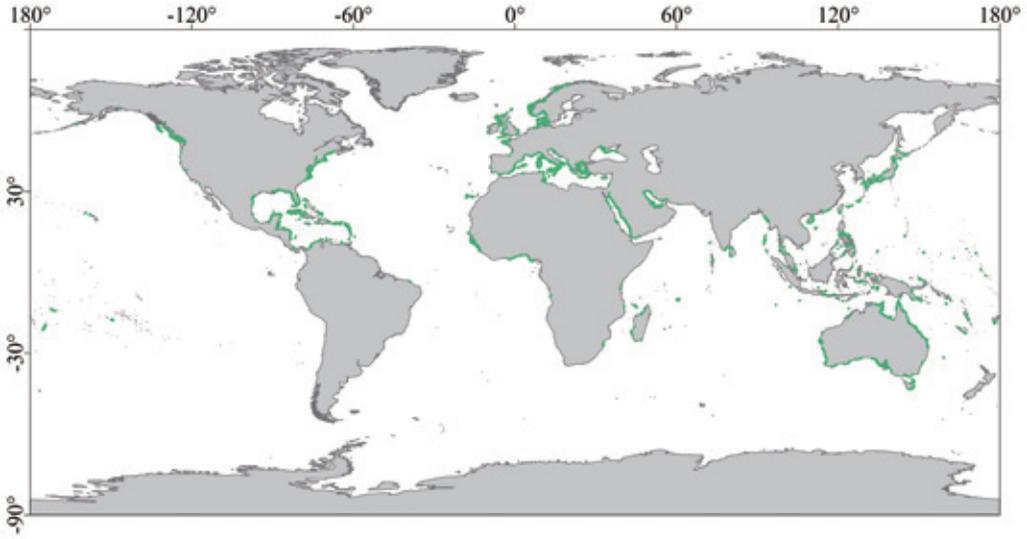
1.1 | 全球海草床的分布

海草是可以完全生活在海水或河口水域咸水中的单子叶被子植物，隶属于泽泻目 (*Alismatales*)。全球共有海草6科13属74种(附表1)，其中二药草属 (*Halodule*)、喜盐草属 (*Halophila*)、波喜荡属 (*Posidonia*)、川蔓草属 (*Ruppia*) 和鳗草属 (*Zostera*) 的物种数较多，占海草物种数的70%；针叶草属 (*Syringodium*)、根枝草属 (*Amphibolis*)、全楔草属 (*Thalassodendron*)、泰来草属 (*Thalassia*) 和鳞毛草属 (*Lepilaena*) 的物种数较少(分别为2种)，而海菖蒲属 (*Enhalus*) 仅海菖蒲 (*E. acoroides*) 1个物种^[1]。



中文名	拉丁名	中文名	拉丁名
丝粉草科 Cymodoceaceae		波喜荡草科 Posidoniaceae	
根枝草属 <i>Amphibolis</i>		波喜荡草属 <i>Posidonia</i>	
南极根枝草	<i>Amphibolis antarctica</i>	狭叶波喜荡草	<i>Posidonia angustifolia</i>
根枝草	<i>Amphibolis griffithii</i>	澳洲波喜荡草	<i>Posidonia australis</i>
丝粉草属 <i>Cymodocea</i>		革质波喜荡草 <i>Posidonia coriacea</i>	
窄叶丝粉草	<i>Cymodocea angustata</i>	哈托波喜荡草	<i>Posidonia denhartogii</i>
小丝粉草	<i>Cymodocea nodosa</i>	柯克曼波喜荡草	<i>Posidonia kirkmanii</i>
圆叶丝粉草	<i>Cymodocea rotundata</i>	大洋波喜荡草	<i>Posidonia oceanica</i>
齿叶丝粉草	<i>Cymodocea serrulata</i>	奥氏波喜荡草	<i>Posidonia ostenfeldii</i>
二药草属 <i>Halodule</i>		波状波喜荡草 <i>Posidonia sinuosa</i>	
博德特二药草	<i>Halodule beaudettei</i>	川蔓草科 Ruppiaaceae	
百慕大二药草	<i>Halodule bermudensis</i>	川蔓草属 <i>Ruppia</i>	
纤状二药草	<i>Halodule ciliata</i>	卷轴川蔓草	<i>Ruppia cirrhosa</i>
凹缘二药草	<i>Halodule emarginata</i>	丝状川蔓草	<i>Ruppia filifolia</i>
羽叶二药草	<i>Halodule pinifolia</i>	川蔓草	<i>Ruppia maritima</i>
单脉二药草	<i>Halodule uninervis</i>	大果川蔓草	<i>Ruppia megacarpa</i>
莱氏二药草	<i>Halodule wrightii</i>	多果川蔓草	<i>Ruppia polycarpa</i>
针叶草属 <i>Syringodium</i>		块状川蔓草 <i>Ruppia tuberosa</i>	
丝状针叶草	<i>Syringodium filiforme</i>	短柄川蔓草	<i>Ruppia brevipedunculata</i>
针叶草	<i>Syringodium isoetifolium</i>	中国川蔓草	<i>Ruppia sinensis</i>
全楔草属 <i>Thalassodendron</i>		角果藻科 Zannichelliaceae	
全楔草	<i>Thalassodendron ciliatum</i>	鳞毛草属 <i>Lepilaena</i>	
粗茎全楔草	<i>Thalassodendron pachyrhizum</i>	澳洲鳞毛草	<i>Lepilaena australis</i>
水鳖科 Hydrocharitaceae		海洋鳞毛草	<i>Lepilaena marina</i>
海菖蒲属 <i>Enhalus</i>		鳎草科 Zosteraceae	
海菖蒲	<i>Enhalus acoroides</i>	虾形草属 <i>Phyllospadix</i>	
喜盐草属 <i>Halophila</i>		红纤维虾形草	<i>Phyllospadix iwatensis</i>
澳洲喜盐草	<i>Halophila australis</i>	黑纤维虾形草	<i>Phyllospadix japonicus</i>
桂花喜盐草	<i>Halophila baillonii</i>	斯考勒虾形草	<i>Phyllospadix scouleri</i>
贝克喜盐草	<i>Halophila beccarii</i>	齿叶虾形草	<i>Phyllospadix serrulatus</i>
摩揭喜盐草	<i>Halophila capricorni</i>	托利虾形草	<i>Phyllospadix torreyi</i>
毛叶喜盐草	<i>Halophila decipiens</i>	鳎草属 <i>Zostera</i>	
恩氏喜盐草	<i>Halophila engelmanni</i>	宽叶鳎草	<i>Zostera asiatica</i>
显脉喜盐草	<i>Halophila euphlebia</i>	丛生鳎草	<i>Zostera caespitosa</i>
夏威夷喜盐草	<i>Halophila hawaiiiana</i>	好望角鳎草	<i>Zostera capensis</i>
约氏喜盐草	<i>Halophila johnsonii</i>	具茎鳎草	<i>Zostera caulescens</i>
小喜盐草	<i>Halophila minor</i>	智利鳎草	<i>Zostera chilensis</i>
日本喜盐草	<i>Halophila nipponica</i>	巨济鳎草	<i>Zostera geojeensis</i>
卵叶喜盐草	<i>Halophila ovalis</i>	日本鳎草	<i>Zostera japonica</i>
卵圆喜盐草	<i>Halophila ovata</i>	鳎草	<i>Zostera marina</i>
棘状喜盐草	<i>Halophila spinulosa</i>	牟氏鳎草	<i>Zostera muelleri</i>
长萼喜盐草	<i>Halophila stipulacea</i>	黑茎鳎草	<i>Zostera nigricaulis</i>
苏拉威西喜盐草	<i>Halophila sulawesii</i>	诺氏鳎草	<i>Zostera noltii</i>
三脉喜盐草	<i>Halophila tricostata</i>	太平洋鳎草	<i>Zostera pacifica</i>
泰来草属 <i>Thalassia</i>		多栉鳎草	<i>Zostera polychlamys</i>
泰来草	<i>Thalassia hemprichii</i>	塔斯鳎草	<i>Zostera tasmanica</i>
龟裂泰来草	<i>Thalassia testudinum</i>		

目前，全球海草床记录的面积为160387 km²，分布于191个国家和地区(附图1)，地跨热带和温带，从北纬70°到南纬56°^[3]。全球海草分布可分为6个区系(附表2)，包括温带北大西洋区系、温带北太平洋区系、地中海区系和温带南大洋区系、热带大西洋区系和热带印度-太平洋区系，其中热带印度-太平洋区系海草分布面积最大(~87791 km²)，约占全球面积的50%，海草物种多样性也最高^[3,4]。



附图1·全球海草分布图
数据来源于UNEP-WCMC^[5]



澳大利亚西澳大利亚州洛特尼斯岛的海草床

附表 2 · 全球海草床分布的六大区系及海草分布主要情况

区系	主要分布国家及地区	面积及全球占比	海草物种
温带北大西洋区系	葡萄牙、法国、英国、爱尔兰、荷兰、比利时、丹麦、挪威、冰岛、德国、瑞典、芬兰、波兰、加拿大西海岸和美国西海岸等	3229 km ² (1.21%)	川蔓草、 鳎草 、诺氏鳎草、小丝粉草、莱氏二药草等 5 种
热带大西洋区系	墨西哥湾沿岸、加勒比海沿岸、百慕大群岛、巴哈马群岛、非洲几内亚湾沿岸和巴西东部海岸	44222 km ² (41.06%)	博德特二药草、 莱氏二药草 、桂花喜盐草、毛叶喜盐草、恩氏喜盐草、约氏喜盐草、川蔓草、 丝状针叶草 、 龟裂泰来草 、长萼喜盐草等 10 种
地中海区系	西班牙、法国、摩洛哥、阿尔及利亚、突尼斯、意大利、希腊、利比亚、保加利亚、土耳其、埃及约旦、叙利亚、罗马尼亚、乌克兰等地中海、里海、黑海及西北非地区国家的沿岸海域	14167 km ² (9.39%)	小丝粉草、 大洋波喜荡草 、卷轴川蔓草、川蔓草、鳎草、诺氏鳎草、莱氏二药草、毛叶喜盐草、长萼喜盐草等 9 种
温带北太平洋区系	俄罗斯、中国、日本、韩国、朝鲜以及墨西哥、美国和加拿大西海岸等	1866 km ² (0.70%)	红纤维虾形草、黑纤维虾形草、斯考勒虾形草、齿叶虾形草、托利虾形草、川蔓草、宽叶鳎草、丛生鳎草、具茎鳎草、 日本鳎草 、 鳎草 、莱氏二药草、毛叶喜盐草、显脉喜盐草、卵叶喜盐草等 15 种
热带印度-太平洋区系	中国、菲律宾、越南、柬埔寨、印度尼西亚、马来西亚、东帝汶、巴布亚新几内亚、所罗门群岛、热带澳大利亚、印度、缅甸、泰国、孟加拉国、斯里兰卡、巴基斯坦、阿联酋、阿曼、沙特阿拉伯、肯尼亚坦桑尼亚、马达加斯加等东太平洋、南亚和东非等	87791 km ² (44.22%)	窄叶丝粉草、圆叶丝粉草、齿叶丝粉草、 羽叶二药草 、 单脉二药草 、 莱氏二药草 、针叶草、 全楔草 、 海菖蒲 、 贝克喜盐草 、 摩羯喜盐草 、毛叶喜盐草、夏威夷喜盐草、小喜盐草、 卵叶喜盐草 、 卵圆喜盐草 、 棘状喜盐草 、 长萼喜盐草 、 三脉喜盐草 、 泰来草 、川蔓草、好望角鳎草、日本鳎草、牟氏鳎草等 24 种
温带南大洋区系	南非、莫桑比克、温带澳大利亚、新西兰等	9112 km ² (3.42%)	南极根枝草 、 根枝草 、针叶草、全楔草、粗茎全楔草、澳洲喜盐草、毛叶喜盐草、卵叶喜盐草、狭叶波喜荡草、 澳洲波喜荡草 、 奥氏波喜荡草 、 波状波喜荡草 、川蔓草、大果川蔓草、块状川蔓草、好望角鳎草、牟氏鳎草、塔斯鳎草等 18 种

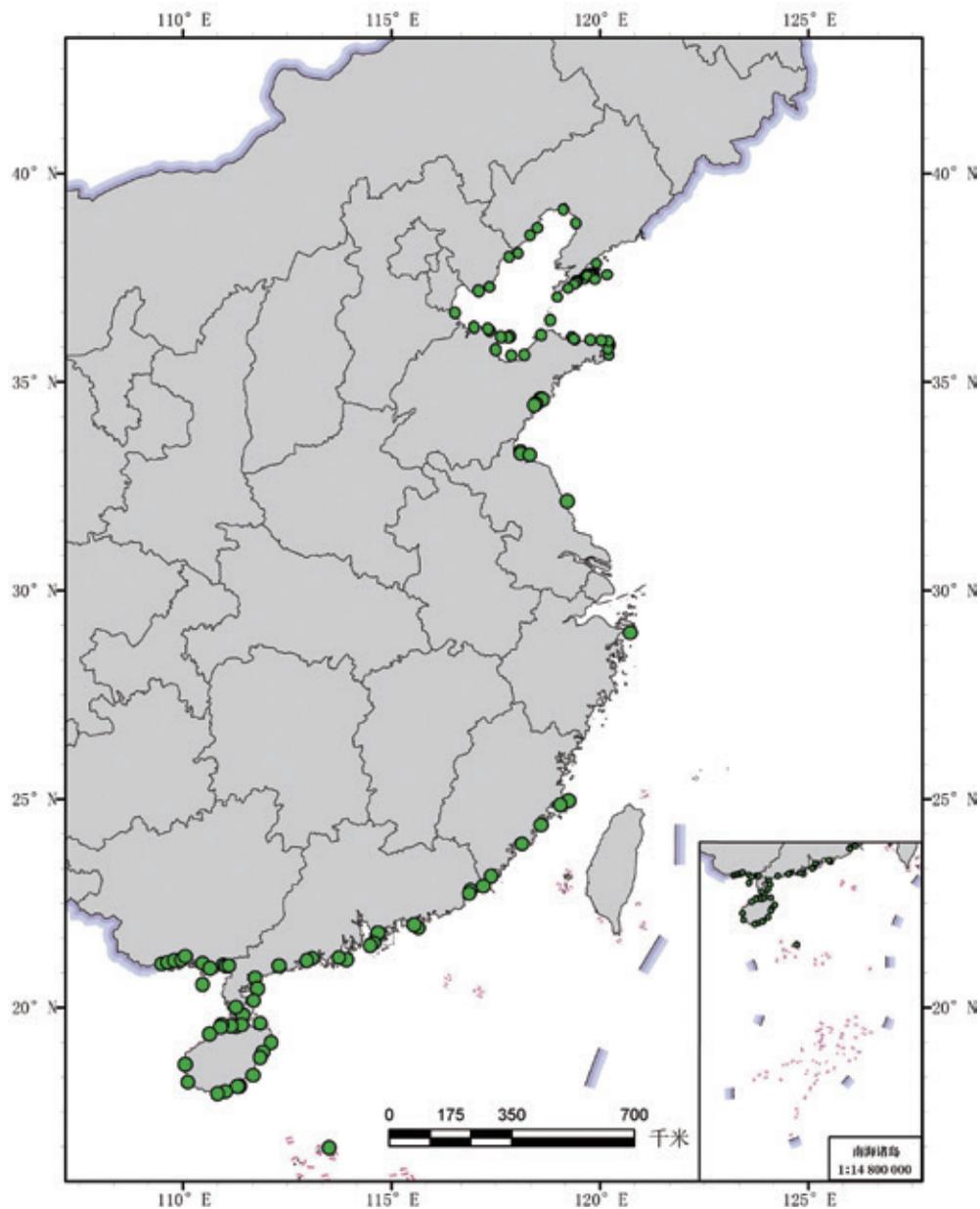
数据来源于 McKenzie 等^[3] 和 Short 等^[4]；蓝色加粗字体的物种表示其为该区系主要物种。

1.2 | 我国海草床的分布

我国海岸线较长，纬度跨度较大，适宜海草生长的区域较多，历史上记录的海草植物4科10属22种^[6,7]。但在2015~2020年全国海草资源普查调查中，仅记录到4科9属16种（附表3），历史上报道的宽叶鳗草（*Z. asiatica*）、具茎鳗草（*Z. caulescens*）、黑纤维虾形草（*Phyllospadix japonicas*）、全楔草（*T. ciliatum*）、毛叶喜盐草（*H. decipiens*）和大果川蔓草（*R. megacarpa*）等6种海草未记录到。现存的物种中，鳗草（*Z. marina*）和日本鳗草（*Z. japonica*）为温带海域海草优势种，泰来草（*T. hemprichii*）、海菖蒲、贝克喜盐草（*H. beccarii*）和卵叶喜盐草（*H. ovalis*）为热带—亚热带海域海草优势种。海南是海草分布种类最多的省份，高达12种；广东、广西、辽宁和山东海草种类较多，均为5种。

2013年我国统计的海草床面积为8765.10公顷，80%分布在我国热带—亚热带海域^[7]。2015~2020年间，我国针对辽宁省至海南岛以及西沙宣德群岛附近海域开展的海草床资源普查，掌握了我国海草的主要分布情况（附图2），记录到我国近海海域海草床面积为26496公顷（统计数据未含港澳台地区），各省（区）中河北、海南、山东和辽宁的海草床面积较高，江苏和浙江较低^[8]。2019年以来，我国对三沙海域的海草资源普查发现，该海域岛礁沿岸及潟湖广泛分布有大面积的海草床，是我国海草床的重要分布区。





附图 2·我国海草床分布情况
图改自文献 [8], 未包含港澳台地区

附表3·中国海草物种及其分布

种类	拉丁名	省份									
		辽宁	天津	河北	山东	江苏	浙江	福建	广东	广西	海南
鳾草科	Zosteraceae										
鳾草属	Zostera										
鳾草	<i>Zostera marina</i>	+		+	+						
日本鳾草	<i>Zostera japonica</i>	+		+	+			+	+	+	+
丛生鳾草	<i>Zostera caespitosa</i>	+			+						
虾形草属	Phyllospadix										
红纤维虾形草	<i>Phyllospadix iwatensis</i>	+			+						
水鳖科	Hydrocharitaceae										
海菖蒲属	Enhalus										
海菖蒲	<i>Enhalus acoroides</i>										+
泰来草属	Thalassia										
泰来草	<i>Thalassia hemprichii</i>										+
喜盐草属	Halophila										
卵叶喜盐草	<i>Halophila ovalis</i>								+	+	+
小喜盐草	<i>Halophila minor</i>										+
贝克喜盐草	<i>Halophila beccarii</i>								+	+	+
丝粉草科	Cymodoceaceae										
丝粉草属	Cymodocea										
圆叶丝粉草	<i>Cymodocea rotundata</i>										+
齿叶丝粉草	<i>Cymodocea serrulata</i>										+
二药草属	Halodule										
单脉二药草	<i>Hadodule uninervis</i>								+	+	+
羽叶二药草	<i>Hadodule pinifolia</i>										+
针叶草属	Syringodium										
针叶草	<i>Syringodium isoetifolium</i>										+
川蔓草科	Ruppiceae										
川蔓草属	Ruppia										
中国川蔓草	<i>Ruppia sinensis</i>	+	+	+	+	+	+				
短柄川蔓草	<i>Ruppia brevipedunculata</i>								+	+	+
种类合计	种类合计	5	1	3	5	1	1	3	5	5	12

数据未包含港澳台地区；数据来源：周毅等^[8]

二 | 海草对海洋环境的适应

2.1 | 海草对海洋环境的适应

海草床是地球上分布最广泛、生产力最高的生态系统之一，在除南极洲之外所有大陆周边海域广泛分布。海草的广布性与其较强的海洋环境适应能力密切相关。在长期的进化过程中，海草逐步形成了各种适应海洋环境的能力。

(1) 具有适应于海水盐度的能力

海草起源于陆地，在长期的进化和环境适应过程中发生了诸多改变。在基因层面，它们丧失了一些与陆地植物性状相关的基因，进化出适应海洋环境的基因。以鳗草为例，其细胞壁不仅包含陆地植物的所有典型多糖基因，而且还包含聚阴离子、低甲基化果胶和硫酸半乳聚糖基因^[9]，这是所有大型藻类细胞壁所共有的特征，对植物体内离子的均质化、养分的吸收和氧气、二氧化碳的交换非常重要。

为了适应海洋环境，海草的根、茎和叶等器官及细胞也在结构上发生了改变。如鳗草没有气孔，鳗草的根、茎、叶表皮细胞与海水接触面均有明显的增厚，能有效减少水分的丧失^[10]。

(2) 具有抵抗波浪冲刷的能力

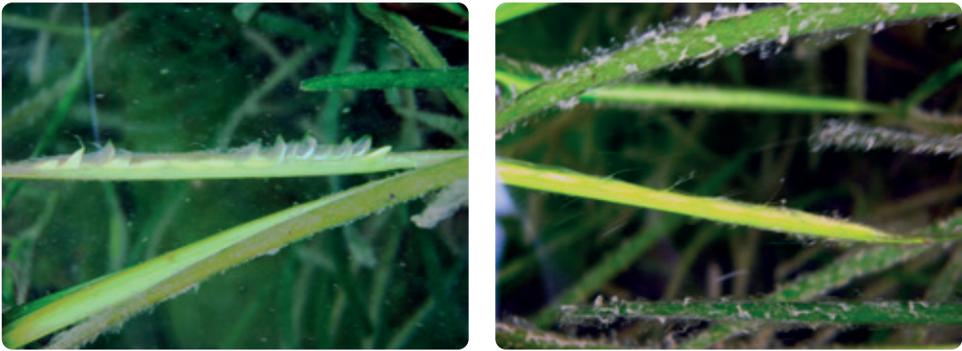
海草的根状茎与根系非常发达，它们匍匐于底质中的地下茎和每节茎上的不定根将植株牢牢固定于沉积物并与沉积物紧密结合，能减少海流冲刷的影响。与陆生植物不同，海草叶片结构高度退化，海草叶片角质层一般很薄，叶片柔软，一些植物的叶片呈带状，可随海流任意改变方向。此外，海草的维管束和机械组织一般都不发达，单位面积的叶片重量普遍较高，这也提高了自身的柔韧性，有利于减少海流的冲击^[11-14]。叶片中通气组织的空隙或气道非常发达，也有助于海草叶片的漂浮和气体交换。海草这些独特的形态结构和生长特征可以帮助它们很好地抵抗波浪的影响，使其可以生长在浅海沉积物中。



(3) 可水下完成正常生理活动及有性繁殖

海草生活在水下，进入水下的光照已不同程度地衰减，因此其光收集复合体家族的成员数量增加，可能会与非光化学淬灭 (NPQ)¹ 共同作用，从而增强弱光下的捕光性能。从解剖学方面来看，海草的有性生殖器官普遍高度简化，这既反映了它们的进化起源，也反映了这些植物在水下进行非生物授粉的特殊机制。

海草的花通常较小，构造上大多退化，呈淡白色，着生于叶簇的基部，雄花花蕊及雌花的花柱和柱头能伸出花瓣，花粉多为丝状或者球形，一般是呈胶状团释放，由水流携带^[15,16]。大多数海草是雌雄异株，如果是雌雄同株则为雌蕊先熟，鳗草属、喜盐草属都为雌性生殖器官先熟。鳗草科 (*Zosteraceae*) 植物的丝状花粉是海草生态学和进化上的重要证据，丝状花粉通过海浪作用被释放到成熟的雌花花序处，随着波浪移动并形成棉絮般的漂浮物；而雌蕊柱头二裂，向上弯曲，与周围水流方向垂直，使传粉概率增加^[17]，伸出的柱头更容易被丝状花粉缠绕，防止由于水流冲击导致花粉脱落，从而大大提高了水下授粉的成功率。



附图3·鳗草伸出佛焰苞释放丝状花粉的雄蕊(左图)和鳗草二裂柱头(右图)

海草种子(或胎生苗)完成水下散布的机制主要为直接沉降于底质表面,在底质受到扰动时随机分散,或是种子(或胎生苗)随着具有浮性的生殖碎片或果实散布于其他地点。例如,海菖蒲和泰来草都能产生个体较大且具有浮力的果实,并在海水中漂浮数天,使种子散布到其他地方^[18]。鳗草种子缺乏浮力,脱落后很快便沉降于水底,但部分种子脱落时,种皮外壁会携带气泡,使种子随海流漂浮一段距离后再沉入水底。此外,鳗草生殖枝在受到扰动时极易断掉,这些断掉的生殖枝会携带成熟的种子漂流近百公里甚至更远^[19],期间种子脱落,完成种子的散布过程^[20]。

| 1 | 植物或藻类在光照过强时用来保护自己而应用的一种机制,反映了植物耗散过剩光能为热的能力,也就是光保护能力。

2.2 | 影响海草分布的环境因素

海草生活在海岸边缘一个狭窄的地带，影响海草它们分布和生长的生境因素包括温度、光照、盐度、海流/波浪、水深、营养盐和底质类型等。这些生境条件是限制海草生长和成活的关键要素，同时也对海草床生态系统的生态学过程，如初级生产力和营养物质的循环、碳的累积等产生影响。

作为具有特定海洋生命周期的有根光合生物，海草植物生长所需的最重要生境条件包括可满足其生根的底质、在海水中充分浸没和维持生长所必需的光照。

(1) 光照

海草床分布的深度主要取决于所处的区域光照条件是否满足其生长，它们主要分布在潮间带至潮下带区域（平均水深为1~3 m区域），最深可分布至50 m水深的区域^[21]。海草植物分布的水深限制主要取决于其生长所需的补偿光照强度²，或者保障其碳收支所需的光照条件。由于光照被海水吸收和被悬浮颗粒物散射，水下可利用的光照随着深度的增加而迅速衰减。海草植物生长的光照强度通常为水体表面光照强度的4%到29%之间，平均约为11%^[22, 23]。海草植物对光照条件的要求通常高于其他海洋光合生物，如大型藻类和微藻^[24]。当大型藻类和浮游生物暴发时，这些生物会遮蔽光照，影响海草植物的光合作用，导致海草生长受阻和死亡。

(2) 水深

除上述光照限制外，海草植物分布的水深条件还受到海草植物对脱水的耐受极限、海洋的动力条件和生物竞争的影响。相比隐蔽的海湾环境，强波浪的区域海草植物分布的上边界更低。海草植物在与海岸垂直方向的分布，同样也受到底质条件的限制。此外，它们的生长也受限于其他生物群落的空间竞争，生长在珊瑚礁环绕的潟湖中的海草植物，它们生长的水深要浅于那些生长在清澈的热带海域的海草植物，因为珊瑚礁占据了较深的水域^[23]。同样，热带地区的红树植物群落也会扩散到潮间带的中低潮区，挤占海草床分布的陆缘一侧的空间。



红树林-海草床连续分布是热带地区典型的景观格局

多数海草植物不能耐受暴露在空气中，仅有少数一些物种，如西欧和西北非地区的诺氏鳗草 (*Z. noltii*)、北太平洋的岩石海岸的虾形草属 (*Phyllospadix*) 和印太区域的喜盐草属，不仅可在潮间带分布并能大片地生长。潮间带海草植物形成密集连片分布的群落并适应暴露在空气中的环境，是因为它们的叶片覆盖在滩涂表面可以保持水分，避免脱水的影响^[25]，它们耐脱水性的种间差异导致不同物种在潮间带分布的隔离^[26]。分布在潮下带的海草植物有时也能生长到潮间带低潮带的区域，但它们会出现生长不良的现象。除脱水的影响外，海草植物长时间暴露在空气中，也将受到高辐射强度的光损伤，强的紫外辐射会胁迫、抑制植物的光合作用^[27]。由于高强度的紫外辐射会诱导花青素等色素的合成，一些海草植物的叶片通常会出现红色斑点。

(3) 底质类型

海草植物只能生长在具有适宜底质条件的区域。绝大多数的海草植物离不开沙质到泥质沉积物的环境，以保障它们生根固着。流动性强的沙质沉积物则不适宜海草的生长，这些细颗粒的沉积物在海流或波浪引起的底沙输送作用下产生大的沙波纹和波浪形沙丘，会阻碍海草植物的生长或造成掩埋和侵蚀，使海草死亡，但这种

负面的作用也取决于这些物理过程发生的频率与强度，以及海草植物的生活史及其生长的能力^[28,29]。除太平洋沿岸的虾形草属物种外，大洋波喜荡草 (*P. oceanica*) 和全楔草属也能生长在岩石上，因为它们坚固的根能够穿透岩石的缝隙，使植株固着。



生长在岩石上的红纤维虾形草

(4) 盐度

多数海草物种是广盐性的，可以耐受一定范围的盐度，从海水到半咸水，或是高盐环境。海草植物通常分布在河口区域，与半咸水的植物分布在一起，如眼子菜属 (*Potamogeton*) 的植物，在全球10%的河口区域，海草植物可以与耐盐的淡水植物一起分布，而它们的生长在盐度超过45时出现明显的下降甚至出现死亡^[30]。海草植物组织在低盐或者高盐环境下（盐度低于10或者高于45时）会受到渗透胁迫，导致它们出现组织坏死或者植株死亡^[31]。尽管实验已经反复证明，海草种子在低盐环境下（甚至淡水条件下）萌芽的效率较高，而一些以鳗草为实验材料的研究发现，海草幼苗在海水环境中具有较高的成活率^[31]。

三 | 海草床的生态系统服务

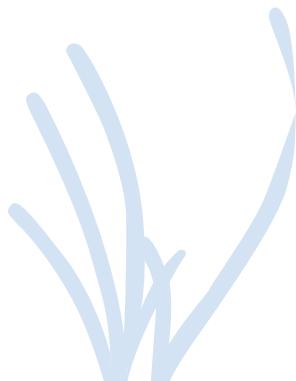
海草床生态系统是近岸海域中生产力极高的生态系统，虽然仅占全球海洋面积不足0.2%，但贡献了全球海洋1%的净初级生产力，其沉积物埋藏的有机碳约占海洋年埋藏量的10%^[32,33]。近年来，海草床的生态系统服务与功能逐渐被人们所认识。海草床为众多的生物提供了栖息地、觅食场、育幼场和庇护所，可以固堤护岸、保护沿海居民的生命财产安全，还可以提高水体的透光率，净化水质等。

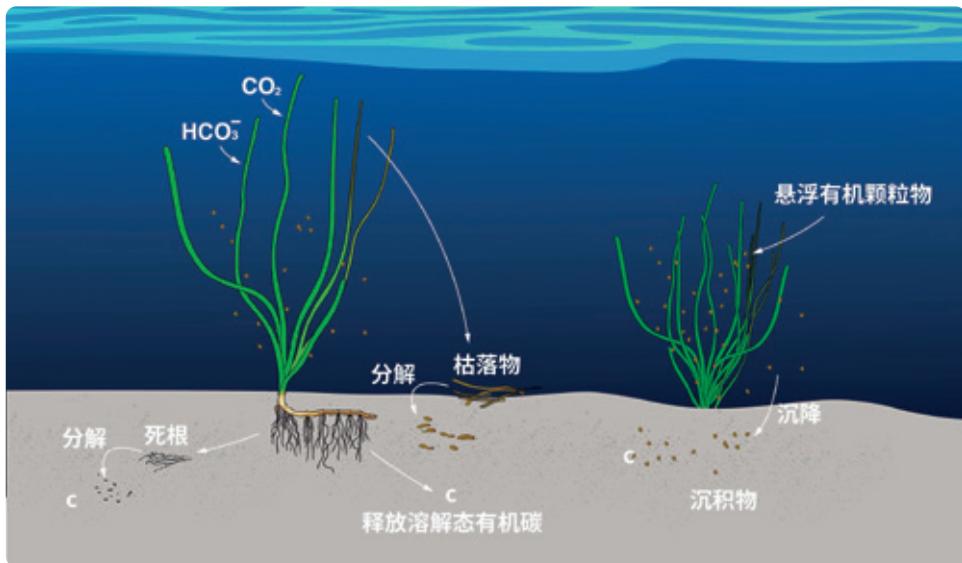
(1) 净化水质

海草的代谢活动可以影响水体中的营养盐、溶解氧、悬浮颗粒物、重金属等物质。海草的地上和地下部分都能吸收大量无机营养盐，改善水体富营养化，增加水体透光率，其光合作用吸收二氧化碳，增加水体溶氧，有缓解海洋酸化的作用。其冠层结构减缓水流速度和波浪，从而增强了悬浮颗粒物的沉降。此外，研究结果表明，海草还能富集沉积物中的重金属，减轻环境污染^[34]。

(2) 固碳储碳

海草是海洋中重要的初级生产者，具有极高的初级生产力。海草床在全球海洋碳循环中起着不可忽视的作用，是重要的蓝碳生态系统。海草床强大的固定和储存有机碳的能力，一方面源于它们所具有将二氧化碳转化为植物生物量的能力，另一方面，海草床可以通过减少水流和沉积物再悬浮来捕获来自生态系统内外的悬浮有机颗粒物^[35]，此外，海草床沉积物在缺氧、厌氧环境下有机碳分解速率慢使得有机碳可被封存数百年甚至千年之久^[36]。据估算，全球海草床生物量的平均值约达460 gDW/m²，年净初级生产量可达1.0 kg/m²；全球海草床年均有机碳埋藏量达48~112 Tg C/年，占海洋总碳埋藏的10~18%，在全球海洋的碳汇中发挥重要作用^[37,38]。





附图4·海草床的主要固碳过程

(3) 防灾减灾

海草床分布于近海岸区域，处于海洋到陆地岸线的过渡地带，健康的海草植物群落能够有效消减波浪，降低水流速度，起到稳固海床，防止岸线侵蚀的作用^[39]。多数海草具有较发达的根系和根状茎，其地下部分在底质内形成纵横交错的网络，可有效稳固底泥，减弱海浪和潮汐运动对泥沙的冲击，起到巩固和防护海床和海岸线的作用，甚至低冠层、低生物量的海草床植被也能将海浪引起的侵蚀作用减弱3倍^[40]。海草床对波高具有高效的消减效果^[41]；研究发现，当海浪经过39 m宽的海草床时波高消减率为30%，在风暴潮等灾害天气下，1000 m宽的海草床波高消减率达30~60%^[42,43]。海草消浪的能力在很大程度上和海草的种类有关，例如，海菖蒲比单脉二药草具有更高的消浪防灾能力^[44]。

(4) 维持海洋生物多样性

海草床环境异质性强，可降低一些小型生物被捕食的风险，从而为诸多海洋生物提供栖息地与庇护场所。同时，海草床也为近岸浅海众多的鱼类和无脊椎动物提供产卵、育幼场所，这是因为海草可以降低水流，减少有性生殖种类（例如海胆）雌雄配子的流失，增加配子接触时间，从而提高受精成功率^[45]，它们地上组织复杂的结构也是黏性卵良好的附着基。海草床还为各类生物提供食物，海草床中一些食草动物，如儒艮、绿海龟、海星、海胆等直接摄食海草的叶片及附生生物，这些消费者可为更高营养级的捕食者提供食物，从而构成复杂的海草床食物网。



摄食海草的绿海龟



海草床孕育着丰富的物种多样性



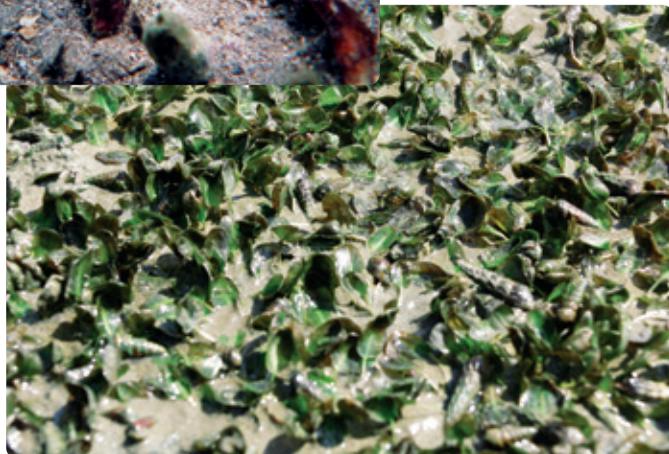
海草叶片为底栖动物提供了适宜的生境

(5) 提供社区生计

海草床是生产力最高的海洋生态系统之一，它们支撑的海洋生物中，包括鱼类、贝类、虾蟹类和棘皮动物等众多经济物种。例如，我国山东威海东楮岛的鳗草床，为当地渔民社区提供了海参、脉红螺、鱼类等众多水产品资源，是当地渔民重要的收入来源。



栖息在海草床中的刺参



四 | 海草床的生态退化

海草床是地球上最受威胁的生态系统之一。研究表明,自1908年以来全球海草以每年 110 km^2 的速度在丧失,1879年所记录的海草如今已消失了29%^[46]。值得警惕的是,全球海草在加速退化,1940年至1990年期间海草床面积的下降速率仅为0.9%/年,而1990年以来下降速率增至7%/年,高于地球上绝大部分生态系统。我国的海草床资源也面临衰退的问题,近40年来我国海草床分布面积急剧下降,与20世纪80年代相比,超过80%的海草床已经消失^[8]。

海草床的退化,最直观的表现就是分布面积的减少和覆盖度的降低^[47],同时,海草床生物多样性(包括海草的物种多样性)丧失的问题亦相当突出。近年来我国的海草床调查中记录到的海草物种,相比历史记录的数量减少了6种,约占我国历史记录物种的27%^[7,8]。海草床退化后不仅造成了部分草食动物觅食地、栖息地、育幼场的丧失,生物多样性的降低,蓝碳的损失和二氧化碳的排放,更加剧了沿岸生态环境的恶化,导致生态系统的不稳定性和脆弱性。

在全球范围内造成海草床生态系统退化的主要因素有水体污染、海岸带开发、水文条件的改变、水产养殖等渔业活动、船只航行、风暴潮等自然灾害和气候变化等,其中水体污染和海岸带开发被认为是最主要的两个威胁因素^[48]。除这些因素外,漂浮性大型藻类暴发和互花米草入侵等也是造成我国海草床资源衰退和生态系统退化的重要原因^[8]。

(1) 海岸带土地利用改变

海岸带开发导致的土地利用改变,主要为围填海、开挖港池等,是我国当前海草生境丧失最重要的原因之一。以广西为例,仅在2008年~2016年的8年间,围填海等滨海开发活动所导致的土地利用改变造成了354公顷海草生境的丧失,占原海草床总面积的37.6%,年均丧失速率高达5.5%^[8]。

围填海工程除了直接掩埋海草床,也可通过改变水动力造成海岸侵蚀或泥沙堆积,改变沉积物环境,间接减少海草栖息地。工程施工造成水中悬浮物扩散,引起水体光衰减并沉降黏附在海草叶片表面,进而影响海草的光合作用。过度开发和开垦,加剧了海岸带的水土流失,悬浮泥沙随暴雨径流入海,造成海水浑浊,影响海草植物的生长。



滨海开发活动导致的海草生境丧失

(A. 铁山港西岸原卵叶喜盐草海草床分布地已被吹填，准备建设为码头，原分布于此的海草已被破坏；
B. 广西铁山港西岸原生长良好的卵叶喜盐草海草床，摄于2008年4月11日)



我国海南高隆湾人工岛的建设(上图)导致岛周边500 m左右区域内490公顷海草床丧失，人工岛及周边长圯港河口附近的海草床变得稀疏和零星分布，下图展示海草床退化前后的景象

(2) 水体环境污染

人为污染导致的水质及沉积物环境质量的下降，是造成全球海草床退化的最重要原因之一^[48]。水体中有机物的分解消耗了水体中的氧气，缺氧环境促进了沉积物中硫化物的产生，可能导致海草床的退化。大量营养盐的输入引起大型藻类和微藻的过度繁殖，降低了水体中的可利用光，使海草的生长受到限制；此外，藻类死亡后的分解进一步消耗了氧气，也可能对海草的生长产生负面影响。2012年我国桑沟湾夏季爆发的褐潮，造成东楮岛海域约36公顷鳗草的死亡和退化。富营养化和藻类暴发还会改变海草床沉积物中有机碳组成的改变，导致活性有机碳比例增加，并将进一步引发“激发效应”，促进海草床沉积物中储存有机碳的再矿化，造成“蓝碳”的损失^[49-51]。

网箱养殖则会导致海草可利用光照的减小，而养殖过程产生的残饵和水产品的排泄物也增大了海水富营养化的风险。此外，石油泄漏等突发性灾害，在海草床区域的家禽家畜养殖，如华南地区潮间带海草床及周边区域养殖的海鲜猪以及海鸭等，所产生的环境污染对海草床的负面影响亦不容忽视。



海草床区域的网箱养殖



海草床旁边的垃圾排放



被大型藻类完全覆盖的卵叶喜盐草

(3) 频繁而无序的渔业活动

频繁而无序的渔业活动，包括各种赶海挖掘活动、拖网、滩涂/网箱养殖、非法围网、电鱼毒鱼等，也是造成我国海草床（尤其是潮间带海草床）退化不可忽视的因素，不仅对海草植物群落本身带来威胁，也给海草床的底栖动物群落与生态系统带来负面影响。

海草床及其周围海域的海水养殖，例如，插桩吊养贝类，不仅占用了海草的生长空间，作业时的践踏、打桩、挖掘等活动也会破坏海草植被和地貌条件。

我国华南地区，在潮间带海草床内挖耙贝类和沙虫等获取经济收入的现象十分普遍，仅在广西铁山港海草分布区，每天挖耙贝类和沙虫者可达到近千人。赶海渔民在退潮时挖掘海草床内的经济动物，挖耙作业不仅会将海草连根翻起，还扰动了沉积物，造成泥沙埋没海草。高频度的挖掘活动还破坏了潮间带的景观完整性，加速了海草床的破碎化。除潮间带外，在浅海区域的海草床中非法围网、电鱼电虾、底网拖鱼、围栏养殖，甚至采用高压水枪采集底栖动物的现象也屡有发生。



民众在贝喜盐草海草床中插桩养殖牡蛎



渔民在海草床布放的地笼网



珍珠湾日本鳗草海草床中
渔民在耙取经济贝类



渔民在卵叶喜盐草海床挖取裸体方格星虫
(当地俗称“沙虫”)



渔民在海草床采用高压水枪采集裸体方格星虫

(4) 其他人为影响

互花米草 (*Spartina alterniflora*) 自引入我国以后, 在我国沿海潮间带地区迅速扩张并挤占了潮间带海草的生长空间, 对海草床生态系统产生影响^[52,53]。在山东东营黄河三角洲, 自2009年以来互花米草的入侵和大面积暴发对当地的原生日本鳎草群落带来巨大影响; 遥感影像分析结果显示, 2009年至2017年约有177公顷的日本鳎草因被互花米草侵占而消失^[54]。

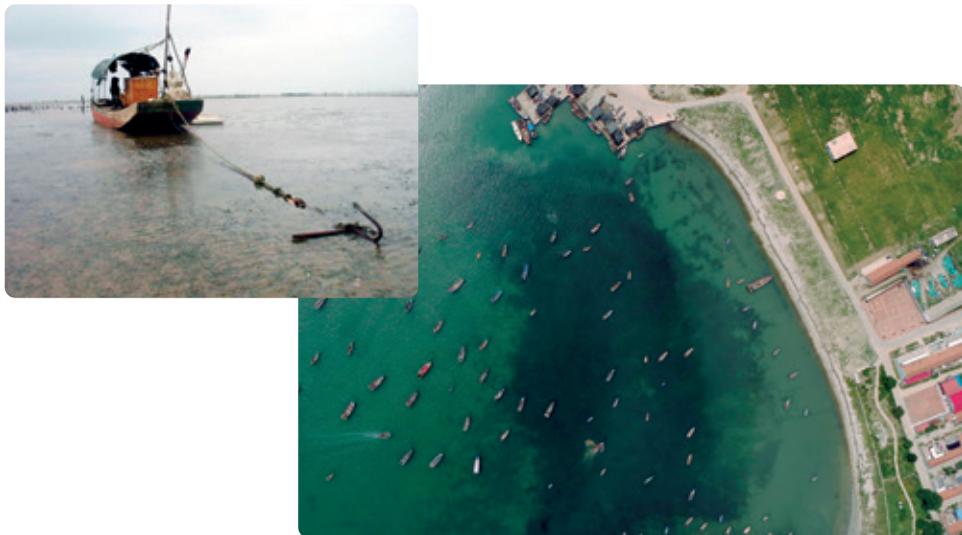


互花米草入侵黄河三角洲的日本鳎草海草床



互花米草侵占贝克喜盐草海草床

近海渔船在浅水区域的频繁进出航行和抛锚停靠同样会导致海草床生态系统的衰退。例如, 螺旋桨的切割和渔船搁浅停靠的物理挤压导致海草死亡, 尤其对鳎草、海菖蒲等茎叶较长的海草伤害更大^[55,56]。渔船航行的搅动会导致沉积物再悬浮, 水体浊度增加或悬浮物附着在海草叶片, 影响海草的光合作用甚至造成海草死亡; 此外, 沉积物再悬浮将释放沉积物营养盐, 刺激水体浮游植物或大型藻类的生长, 其带来的遮蔽作用对海草光合作用带来不利影响^[57-59]; 渔船产生的废水及入海的油污对海草床区域的水质环境带来不利影响, 威胁海草的生长。



船舶航行和停靠是海草床的潜在影响因素



(5) 极端气候

台风引起的风暴潮、风浪直接冲刷海草，将海草连根冲刷起来，或导致海草植物的被掩埋，造成海草资源毁灭性的破坏。2019年，超强台风利奇马导致了山东黄河口上千公顷海草床的丧失^[60]。台风、风暴潮还会造成海草生殖枝和海草种子库的流失，影响海草床的种群更新。此外，台风带来的大量降水，造成局部海水盐度的剧降，以及风暴潮引起底质松动和搅动导致的海水悬浮物增多，都会对海草的生长带来不利的影响^[60]。

五 | 我国主要的海草植物

01	圆叶丝粉草	<i>Cymodocea rotundata</i>
02	齿叶丝粉草	<i>Cymodocea serrulata</i>
03	单脉二药草	<i>Halodule uninervis</i>
04	羽叶二药草	<i>Halodule pinifolia</i>
05	针叶草	<i>Syringodium isoetifolium</i>
06	海菖蒲	<i>Enhalus acoroides</i>
07	泰来草	<i>Thalassia hemprichii</i>
08	卵叶喜盐草	<i>Halophila ovalis</i>
09	小喜盐草	<i>Halophila minor</i>
10	贝克喜盐草	<i>Halophila beccarii</i>
11	红纤维虾形草	<i>Phyllospadix iwatensis</i>
12	丛生鳗草	<i>Zostera caespitosa</i>
13	鳗草	<i>Zostera marina</i>
14	日本鳗草	<i>Zostera japonica</i>
15	中国川蔓草	<i>Ruppia sinensis</i>
16	短柄川蔓草	<i>Ruppia brevipedunculata</i>

01

圆叶丝粉草

Cymodocea rotundata

科

丝粉草科 Cymodoceaceae

属

丝粉草属 *Cymodocea*

分布:

台湾；海南文昌、琼海、陵水、三亚和西沙海域。

多年海生沉水草本植物。根状茎匍匐，较纤细，单轴分枝，每节具1~3条略粗而不规则分枝的根和1条缩短的直立茎，茎端簇生叶片2~5枚。叶片线形，多少呈镰刀状，长7~15 cm，宽4 mm以下，全缘，叶先端不变狭，呈钝圆形或截形，平行脉7~15条。花单性，雌雄异株。花单生于叶腋，无花被。果实半圆形或半椭圆形，侧扁，无柄，外果实骨质，具三条平行的背脊。花果期末定。水媒传粉。



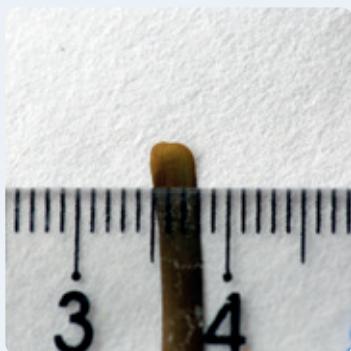
圆叶丝粉草群落



圆叶丝粉草植株



圆叶丝粉草叶片



02

齿叶丝粉草

Cymodocea serrulata

科

丝粉草科 Cymodoceaceae

属

丝粉草属 *Cymodocea*

分布：

台湾；海南琼海。

多年海生沉水草本植物。根状茎匍匐，单轴分支，每节上疏生2条分枝的根和1条短缩的直立茎。茎端簇生叶片2~5枚。叶片线形，扁平，具鞘，具叶耳和叶舌，叶鞘三角形，基部狭，早落，脱落后常在茎上留下开口的环状叶痕。叶长可达15 cm，宽4~9 mm，平行脉13~17条，近边缘的侧脉于叶片先端汇合，具次级横脉，先端钝，密集三角形锯齿。花单生，雌雄异株。果实卵圆形，侧扁，具3条平行的背脊，长7~9 mm，宽3.75~4.5 mm，厚2 mm。花果期末定。水媒传粉。



齿叶丝粉草



齿叶丝粉草植株



03

单脉二药草

Halodule uninervis

科

丝粉草科 *Cymodoceaceae*

属

二药草属 *Halodule*



分布：

台湾；广东雷州、徐闻；广西北海；

海南海口、文昌、琼海、万宁、陵水、东方、儋州、临高、南沙和西沙海域。

多年浅海生沉水草本植物。根状茎匍匐，单轴分枝，节间长2.5~5 cm，宽0.25~3.5 mm，上部有时微弯成镰状。叶长5~12 cm，叶脉3条，平行，中脉明显至先端常略扩展或分叉，末梢于叶端突出而形成中齿，侧齿发育正常。花小，单性雌雄异株，无花被。坚果，卵球形，长2.5 mm，宽2 mm，略扁，喙顶生，长约1 mm，不开裂。种子1枚，直立。花果期未定。水媒传粉。



单脉二药草群落



单脉二药草的叶尖



单脉二药草植株



04

羽叶二药草

Halodule pinifolia

科

丝粉草科 Cymodoceaceae

属

二药草属 *Halodule*

分布：

台湾；海南澄迈。

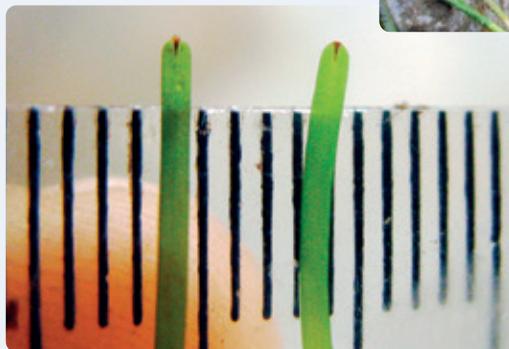
浅海生沉水草本。根状茎匍匐，单轴分支，节间长1~3 cm。节生鳞片卵形，膜质，每节须根2~3条。直立茎短，基部常被残存叶鞘所包围。叶1~4枚互生，叶鞘长1~1.4(~2.8) cm，抱茎，叶耳和叶舌明显，叶片线形，扁平，长2~8 cm，宽0.6~1.2 mm，先端通常平截或钝圆，有时可见很不发育的2侧齿。平行脉3条，中脉明显，顶端常稍扩展或分叉，侧脉常不明显。花小单性，雌雄异株，无花被。坚果，卵形，长约2 mm，喙侧生。花果期未定。水媒传粉。



羽叶二药草群落



羽叶二药草植株



羽叶二药草叶尖

05

针叶草

Syringodium isoetifolium

科

丝粉草科 Cymodoceaceae

属

针叶草属 *Syringodium*



分布:

台湾；海南文昌、琼海及西沙海域。

多年海生沉水草本植物。茎枝高度约25 cm。根状茎纤细匍匐，单轴分支，节间长1.5~3.5 cm。直立茎段，节间显著短缩。叶2~3枚互生，常生于短缩直立茎的上部，叶片钻状针形，长7~10 cm，宽1~2 mm。具伞花序下部二歧分枝，上部单歧分枝，花单性，雌雄异株。果实斜倒卵形，长约4 mm，宽约2 mm，喙长约2 mm。花果期未定。水媒传粉。



针叶草群落



针叶草植株



针叶草的叶片为圆柱形

06

海菖蒲

Enhalus acoroides

科

水鳖科 Hydrocharitaceae

属

海菖蒲属 *Enhalus*

分布：

台湾；海南文昌、琼海、陵水、三亚。

多年海生沉水草本植物。须根粗壮，长10~20 cm，直径3~5 mm。根状茎匍匐，直径约1.5 cm，节密集外包有许多粗纤维状的叶鞘残体。叶片生于根状茎的顶端，带状，椭圆形或线形，扁平，对生，长30~150 cm，宽1.25~1.75 cm，常扭曲，全缘，先端钝圆，基部具膜质叶鞘。雌雄异株，蒴果肉质，卵形，长5~7 cm，果皮有密集直立二叉状附属物，不规则开裂。种子少数，具棱角，直径达1~1.5 cm。花期5月。风媒传粉。



退潮后的海菖蒲群落



海菖蒲的幼果



海菖蒲的果实



海菖蒲的雌花佛焰苞

泰来草

Thalassia hemprichii

科

水鳖科 Hydrocharitaceae

属

泰来草属 *Thalassia*



分布:

台湾；海南文昌、琼海、万宁、陵水、三亚、儋州、临高、南沙及西沙海域。

多年海生沉水草本植物。根状茎长，圆柱形，有明显的节和节间，并有数条不定根，节上长出直立茎，节间长4~7 mm。叶带状略呈镰刀状弯曲，互生，全缘，长6~12 cm，有时可达40 cm，宽4~11 mm。花单性，雌雄异株。蒴果，球形，淡绿色，长2~2.5 cm，宽1.8~3.2 cm。种子多数，着生于侧膜胎座上。花果期未定。水媒传粉。



泰来草群落



泰来草植株



泰来草的雄花



单脉二药草(左)、圆叶丝粉草(中)和泰来草(右)



泰来草果实

08

卵叶喜盐草

Halophila ovalis

科

水鳖科 Hydrocharitaceae

属

喜盐草属 *Halophila*

分布：

台湾；广东汕头、潮州、汕尾、湛江；香港；广西防城港、钦州、北海、涠洲岛；海南海口、文昌、琼海、万宁、陵水、三亚、儋州、临高、澄迈、南沙和西沙海域。

多年海生沉水草本植物。根状茎匍匐，细长，易折断，节间长1~5 cm，直径约1 mm。叶2枚自鳞片腋部生出，叶片薄膜质，淡绿色，有褐色斑纹，透明，长椭圆形或卵形，长1~10 mm，宽0.5~2 mm，先端圆或略尖，基部钝形、截形、圆形或楔形，全缘呈波状。叶脉3条，中脉明显，缘脉距叶缘约0.5 mm，与中脉在叶端相连，次级横脉8~25对，连接中脉与缘脉。花单性，雌雄异株。蒴果肉质，近球形，直径3~4 mm，具4~5 mm长的喙，果皮膜质。种子多数，近球形，直径小于1 mm，种皮具疣状突起与网状纹饰。花期11~12月。水媒传粉。



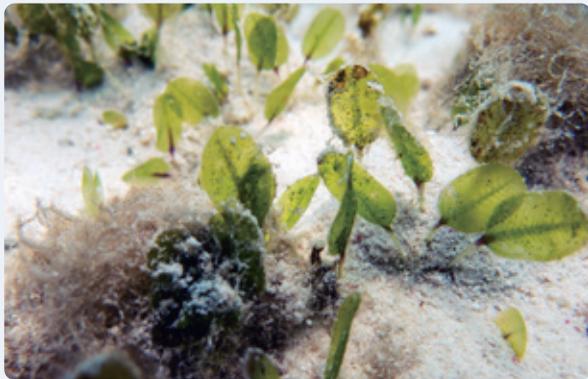
卵叶喜盐草的植株



退潮后的卵叶喜盐草群落



卵叶喜盐草的种子



水下的卵叶喜盐草

09

小喜盐草

Halophila minor

科

水鳖科 Hydrocharitaceae

属

喜盐草属 *Halophila*

分布:

海南陵水。

多年海生沉水草本植物。根状茎匍匐，细长，易断，节间长1~3 cm。每节生纤细根1条，鳞片2枚。叶2枚，叶片绿色，透明，长椭圆形或卵形，长7~12 mm，宽3~5 mm，先端钝，或具小尖头，基部钝或短楔形，或骤缩下延至柄，全缘。叶脉3，中脉明显，缘脉与中脉在叶端连接次级横脉3~8对，不明显，与中脉交角70°~90°。叶柄圆柱形，长0.5~3.5 cm。花单性，雌雄异株。蒴果，卵圆形、球形，长2~4 mm，果皮膜质。种子约20粒，近球形，棕色，直径约0.5 mm。花果期末定。水媒传粉。

小喜盐草生境小喜盐草叶脉小喜盐草群落小喜盐草植株

10

贝克喜盐草

Halophila beccarii

科

水鳖科 Hydrocharitaceae

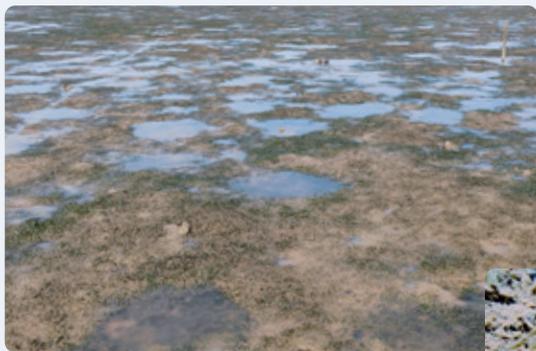
属

喜盐草属 *Halophila*

分布：

海南、广西、广东、福建、香港和台湾等沿海地区。

海生沉水草本植物。茎纤细，多匍匐，节间长1~2 cm。直立茎短，长1~1.5 cm。叶6~10枚簇生直立茎顶端，叶片长椭圆形或披针形，长6~11 mm，宽1~2 mm，先端钝圆或尖，基部楔形，全缘，中脉较宽，明显，无横脉，叶柄长1~2 cm，具鞘，鞘膜质，透明，长3~4 mm，顶端圆形。花单性，雌雄同株。果实卵形，长0.5~1.5 mm，具喙，锐尖。种子小，种皮具网状纹饰。花果期未定。水媒传粉。



分布于潮间带的贝克喜盐草海草床



贝克喜盐草的雄花



贝克喜盐草群落

红纤维虾形草

Phyllospadix iwatensis

科

鳗草科 Zosteraceae

属

虾形草属 *Phyllospadix*



分布：

辽宁大连；山东烟台、威海和青岛。

多年海生沉水草本植物。根状茎粗短，匍匐，直径约0.5 cm，植株基部常为一丛缠绕的红棕色毛状纤维所包围，长可达10 cm。茎短缩，节间长4~5 mm。叶互生，具鞘。叶鞘长可达25 cm，叶耳钝尖，叶舌短，新月形，5脉，叶片线形长100~150 cm，宽1.25~4.5 mm，下部全缘，上部边缘具连续的鳍刺状齿，后部分脱形成连续的细齿，叶端钝。花单性，雌雄同株。果实扁，新月形，长2.2~3 mm，宽4~5 mm，具短喙和中脊，每边各有1近轴的背沟，从中间到侧边有急弯的刚毛。种子椭圆形。花期4~6月，果期8~10月。半水媒传粉。



生长于岩石的红纤维虾形草



红纤维虾形草佛焰苞



红纤维虾形草的叶尖

12

丛生鳗草

Zostera caespitosa

科

鳗草科 Zosteraceae

属

鳗草属 *Zostera*

分布：

辽宁大连和葫芦岛；山东烟台、威海和青岛。

多年生沉水草本植物。呈丛生状。根状茎极短而近直立，节间长一般不超过5 mm，营养枝具3~4叶。叶鞘长5~15 cm，较叶片略宽，管状，宿存，后期呈不规则的撕裂状，叶片线形，互生长达70 cm宽3~6 mm，全缘或有时具单细胞所构成的微齿，先端微凹，初级叶脉5~7条，平行，于叶端相互连接，脉间附束4~5条，次级叶脉间隔2~5 mm，与初级脉垂直排列。生殖枝长30~60 cm，稀疏分枝，具佛焰苞数至10枚。花小，单性，雌雄同株。瘦果，卵形或椭圆形，长约3.5 mm，褐色，具喙，外果皮近革质，具纵向条纹。种子褐色，椭圆形，具16~20条纵肋。花果期4~6月。半水媒传粉。



鳎草

Zostera marina

科

鳎草科 Zosteraceae

属

鳎草属 *Zostera*



分布:

辽宁大连、葫芦岛；河北北戴河、曹妃甸；山东烟台、青岛和威海。

多年生草本植物。根状茎匍匐生长直径2~4 mm，直立茎管状，侧扁，或疏生分枝，淡绿色，膜质，节间长10~35 mm。营养枝短，具叶3~8枚。叶鞘膜质，管状，长5~15 cm，后期呈不规则的撕裂状，叶片线形，绿色，互生，长可达120 cm，宽2~12 mm，边缘全缘或呈波形，粗糙，先端圆头。生殖枝长，可达100 cm，疏生分枝，花小，单性，雌雄同株，无花被。瘦果，椭圆形至长圆形，长约4 mm，具喙，外果皮褐色，干膜质至近革质，具纵纹。种子暗褐色至淡黄色，具清晰的16~25条纵肋。花果期3~7月。半水媒传粉。



退潮后潮间带的鳎草群落



鳎草植株



鳎草的叶尖

14

日本鳗草

Zostera japonica

科

鳗草科 Zosteraceae

属

鳗草属 *Zostera*

分布：

辽宁葫芦岛和大连；河北北戴河；山东烟台、潍坊和青岛；福建泉州晋江、厦门和漳州；台湾；广东汕头、汕尾、阳江、湛江；广西北海、防城港；海南海口、琼海、陵水和新盈。

多年生草本植物。具发达的根状茎，根状茎匍匐，直径0.5~1.5 mm，节间长5~30 mm。营养枝具叶2~4枚，叶鞘长2~10 cm，边缘膜质，叶耳钝圆，长0.3~0.5 mm；叶舌明显，叶片线形，深绿色，长5~35 cm，宽1~2 mm，先端钝或微凹，近基部略窄，略分叉，初级脉3条，平行，中脉于顶端增宽或分叉，侧脉边缘生，与中脉在叶片顶端连接，脉间附束3~5条，次级脉间隔1~4 mm，与初级脉垂直排列。生殖枝长10~30 cm，花小，单性，雌雄同株。瘦果，椭圆形至长椭圆形，长约2 mm，有光泽，外果皮红褐色至淡紫褐色。种子棕色，一端稍扁，另一端稍尖细。花期6~9月。半水媒传粉。



日本鳗草植株



日本鳗草群落



日本鳗草的佛焰苞

中国川蔓草

Ruppia sinensis

科

川蔓草科 Ruppiales

属

川蔓草属 *Ruppia*



分布：

分布于辽宁、河北、天津、山东、江苏、上海和浙江等沿海地区。

沉水草本。一年或多年生。地下茎匍匐，茎粗0.5~1.2 mm，节间长0.5~2.5 cm，单轴分枝。每个节上有1~2条根，长1~6 cm，根尖弯曲。地上茎分枝多，分枝高度与水深相关。叶窄线形，中肋明显，叶长2~31 cm，宽0.2~0.6 mm，叶尖渐尖或急尖，叶缘有小齿。花序单轴，2朵花背靠背排列，叶鞘包裹。花两性，花被缺失，水面传粉。果实不对称，外果皮易腐烂，内果皮坚硬，具果柄，果柄长0.5~3.5 cm，与种子一起脱落。种子卵形或梨形，具喙，种子两侧各具1个胚孔。



中国川蔓草群落



中国川蔓草植株



中国川蔓草的果实



中国川蔓草的花

16

短柄川蔓草

Ruppia brevipedunculata

科

川蔓草科 Ruppiales

属

川蔓草属 *Ruppia*

分布：

分布于福建、广东、广西和海南等沿海地区。

沉水草本。一年生。地下茎匍匐，茎粗0.5~1.3 mm，节间长1~5 cm，单轴分枝。每个节上有1~2条根，长1~7 cm，根尖弯曲。地上茎分枝多，分枝高度与水深相关。叶窄线形，中肋明显，叶长2~20 cm，叶尖渐尖或急尖，叶缘顶部有小齿。包裹花的叶鞘膨胀，半透明，具膜状翼。花序单轴顶生，由2朵花组成，近无梗，叶鞘包裹。花两性，花被缺失，水下传粉。果实卵形，外果皮易腐烂，内果皮坚硬。具果柄，果柄长0.4~2.5 cm。种子卵形，具喙，种子两侧各具1个胚孔。



短柄川蔓草植株



中国川蔓草 (A) 和短柄川蔓草 (B) 的果柄

附录参考文献

- [1] Short FT, Polidoro B, Livingstone SR, Carpenter KE, Bandeira S, Bujang JS, Calumpong HP, Carruthers TJB, Coles RG, Dennison WC, Erftemeijer PLA, Fortes MD, Freeman AS, Jagtap TG, Kamal AHM, Kendrick GA, Kenworthy WJ, Nafie YAL, Nasution IM, Prith RJ, Prathep A, Sansiangco JC, Tussenbroek BV, Vergara SG, Waycott M, Zieman JC. Extinction risk assessment of the world's seagrass species. *Biological Conservation*, 2011, 144: 1961-1971.
- [2] 黄小平, 江志坚, 张景平, 于硕, 刘松林, 吴云超. 全球海草的中文命名. *海洋学报*, 2018, 40(4): 127-133.
- [3] McKenzie LJ, Nordlund LM, Jones BL, Cullen-Unsworth CL, Roelfsema C, Unsworth RKF. The global distribution of seagrass meadow. *Environmental Research Letters*, 2020, 15: 074041.
- [4] Short FT, Carruthers TJB, Dennison WC, Waycott M. Global seagrass distribution and diversity: A bioregional model. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2007, 350: 3-20.
- [5] UNEP-WCMC, Short FT. Global distribution of seagrasses (version 7.1). Seventh update to the data layer used in Green and Short (2003). Cambridge (UK): UN Environment Programme World Conservation Monitoring Centre, 2021. Data DOI: <https://doi.org/10.34892/x6r3-d211>
- [6] 范航清, 石雅君, 邱广龙. 中国海草植物. 海洋出版社, 2009.
- [7] 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(5): 517-526.
- [8] 周毅, 江志坚, 邱广龙, 张沛东, 徐少春, 张晓梅, 刘松林, 李文涛, 吴云超, 岳世栋, 顾瑞婷, 丁丽, 郑凤英, 黄小平, 范航清. 中国海草资源分布现状、退化原因与保护对策. *海洋与湖沼*, 2023, 54(5): 1248-1257.
- [9] Olsen JL, Rouzé P, Verhelst B, Lin YC, Bayer T, Collen J, Dattolo E, De Paoli E, Dittami S, Maumus F, Michel G, Kersting A, Lauritano C, Lohaus R, Töpel M, Tonon T, Vanneste K, Amirebrahimi M, Janina B, Boström C, Chovatia M, Grimwood J, Jenkins JW, Jueterbock A, Mraz A, Stam WT, Tice H, Bornberg-Bauer E, Green PJ, Pearson GA, Procaccini G, Duarte CM, Schmutz J, Reusch TBH, Peer YVD. The genome of the seagrass *Zostera marina* reveals angiosperm adaptation to the sea. *Nature*, 2016, 530: 331-335.
- [10] 叶春江, 赵可夫. 高等植物大叶藻研究进展及其对海洋沉水生活的适应. *植物学通报*, 2002(2): 184-193.
- [11] Cambridge ML, Lambers H. Specific leaf area and functional leaf anatomy in Western Australian seagrasses. In: Lambers H, Poorter H and Van Vuuren MMI (eds) *Inherent Variation in Plant Growth: Physiological Mechanisms and Ecological Consequences*. Leiden: Backhuys Publishers. 1998.
- [12] 谢伟东, 朱栗琼, 招礼军, 邱广龙, 范航清. 广西三种主要海草的茎叶解剖结构研究. *广西植物*, 2013, 33(1): 25-29.
- [13] 王文峰. 针叶藻和大叶藻营养器官的研究. 海南大学, 2014.
- [14] 王林柱, 赵博, 黄勃. 高等海洋植物海神草营养器官的组织学特点. *海洋科学*, 2015, 39(12): 86-90.
- [15] Ackerman JD. Sexual Reproduction of Seagrasses: pollination in the marine context. In: Larkum AWD, Orth RJ, Duarte CM (eds) *Seagrasses: Biology Ecology and Conservation*. Dordrecht: Springer Netherlands, 2006: 89-109.

- [16] 杜建国, 陈炜霖, 邱广龙, 张涵, 陈彬, 胡文佳, 郭玉清. 海草有性繁殖成花诱因研究进展与展望. 渔业科学进展, 2023, 44(4): 1-11.
- [17] Ackerman J. Submarine pollination in the marine angiosperm *Zostera marina* (Zosteraceae). II. Pollen transport in flow fields and capture by stigmas. American Journal of Botany, 1997, 84: 1110-1119.
- [18] Lacap CDA, Vermaat JE, Rollon RN, Nacorda MH. Propagule dispersal of the S.E. Asian seagrasses *Enhalus acoroides* and *Thalassia hemprichii*. Marine Ecology Progress Series, 2002, 235: 75-80.
- [19] Harwell MC, Orth R J. Long-Distance Dispersal Potential in a Marine Macrophyte. Ecology, 2002, 83: 3319-3330.
- [20] 韩厚伟, 江鑫, 潘金华, 丛炜, 孙娟, 张壮志, 宋少峰, 盛宝利, 王青岩, 李晓捷. 海草种子特性与海草床修复. 植物生态学报, 2012, 36(8): 909-917.
- [21] Duarte CM. Seagrass Ecosystems. In: Levin SL (ed) Encyclopedia of biodiversity. San Diego: Academic Press, 2001: Vol 5: 254-268.
- [22] Dennison WC, Orth RJ, Moore KA, Stevenson JC, Carter V, Kollar S, Bergstorm PW, Batiuk RA. Assessing Water Quality with Submersed Aquatic Vegetation. BioScience, 1993, 43: 86-94.
- [23] Hemminga M, Duarte C. Seagrass Ecology. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- [24] Duarte CM. Submerged aquatic vegetation in relation to different nutrient regimes. Ophelia, 1995, 41: 87-112.
- [25] Powell GVN, Schaffner FC. Water trapping by seagrasses occupying bank habitats in Florida Bay. Estuarine Coastal and Shelf Science, 1991, 32: 43-60.
- [26] Ramirez-Garcia P, Lot A, Duarte CM, Terrados J, Agawin NS. Bathymetric distribution, biomass and growth dynamics of intertidal *Phyllospadix scouleri* and *Phyllospadix torreyi* in Baja California (Mexico). Marine Ecology Progress Series, 1998, 173: 13-23.
- [27] Dawson SP, Dennison WC. Effects of ultraviolet and photosynthetically active radiation on five seagrass species. Marine Biology, 1996, 125: 629-638.
- [28] Jarvis JC, Moore KA. Effects of seed source, sediment type, and burial depth on mixed-annual and perennial *Zostera marina* L. Seed germination and seedling establishment. Estuaries and Coasts, 2015, 38: 964-978.
- [29] Wang M, Wang Y, Guo X, Sha J, Zhang H, Tang X, Zhou B. Reproductive properties of *Zostera marina* and effects of sediment type and burial depth on seed germination and seedling establishment. Aquatic Botany, 2016, 134: 68-74.
- [30] Quammen ML, Onuf CP. Laguna madre: Seagrass changes continue decades after salinity reduction. Estuaries, 1993, 16: 302-310.
- [31] Biebl R, McRoy CP. Plasmatic resistance and rate of respiration and photosynthesis of *Zostera marina* at different salinities and temperatures. Marine Biology, 1971, 8: 48-56.
- [32] Duarte CM, Cebrián J. The fate of marine autotrophic production. Limnology and Oceanography, 1996, 41: 1758-1766.
- [33] Duarte CM, Middelburg JJ, Caraco N. Major role of marine vegetation on the oceanic carbon cycle. Biogeosciences, 2005, 2: 1-8.
- [34] Lewis MA, Dantin DD, Chancy CA, Abel KC, Lewis CG. Florida seagrass habitat evaluation: A comparative survey for chemical quality. Environmental Pollution, 2007, 146: 206-218.
- [35] Chen G, Azkab MH, Chmura GL, Chen S, Sastrosuwondo P, Ma Z, Dharmawan WE, Yin X, Chen B. Mangroves as a major source of soil carbon storage in adjacent seagrass meadows. Scientific Reports, 2017, 7: 42406.

- [36] Mcleod E, Chmura GL, Bouillon S, Salm R, Björk M, Duarte CM, Lovelock CE, Schlesinger WH, Silliman BR. A blueprint for blue carbon: toward an improved understanding of the role of vegetated coastal habitats in sequestering CO₂. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2011, 9: 552-560.
- [37] Duarte CM, Chiscano CL. Seagrass biomass and production: a reassessment. *Aquatic Botany*, 1999, 65: 159-174.
- [38] Nellemann C, Corcoran E, Duarte CM, Valdrés L, Young CD, Fonseca L, Grimsditch G. Blue Carbon: The Role of Healthy Oceans in Binding Carbon. UN Environment, GRID-Arendal, 2009.
- [39] 张小霞, 林鹏智. 滨海植物的海岸带减灾特性研究综述. *海洋通报*, 2023, 42(5): 585-600.
- [40] Christianen MJA, van Belzen J, Herman PMJ, van Katwijk MM, Lamers LPM, van Leent PJM, Bouma TJ. Low-canopy seagrass beds still provide important coastal protection services. *PLoS ONE*, 2013, 8: e62413.
- [41] Narayan S, Beck MW, Reguero BG, Losada IJ, van Wesenbeeck B, Pontee N, Sanchirico JN, Ingram JC, Lange GM, Burks-Copes KA. The effectiveness, costs and coastal protection benefits of natural and nature-based defences. *PLoS ONE*, 2016, 11: e0154735.
- [42] Bradley K, Houser C. Relative velocity of seagrass blades: Implications for wave attenuation in low-energy environments. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2009, 114: F01004.
- [43] Infantes E, Orfila A, Simarro G, Terrados J, Luhar M, Nepf H. Effect of a seagrass (*Posidonia oceanica*) meadow on wave propagation. *Marine Ecology Progress Series*, 2012, 456: 63-72.
- [44] Rasheed M, Unsworth R. Long-term climate-associated dynamics of a tropical seagrass meadow: implications for the future. *Marine Ecology Progress Series*, 2011, 422: 93-103.
- [45] Simon TN, Levitan DR. Measuring fertilization success of broadcast-spawning marine invertebrates within seagrass meadows. *The Biological Bulletin*, 2011, 220: 32-38.
- [46] Waycott M, Duarte CM, Carruthers TJB, Orth RJ, Dennison WC, Olyarnik S, Calladine A, Fourqurean JW, Heck KL, Hughes AR, Kendrick GA, Kenworthy WJ, Short FT, Williams SL. Accelerating loss of seagrasses across the globe threatens coastal ecosystems. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2009, 106: 12377-12381.
- [47] Short FT, Wyllie-Echeverria S. Natural and human-induced disturbance of seagrasses. *Environmental Conservation*, 1996, 23: 17-27.
- [48] Dunic JC, Brown CJ, Connolly RM, Turschwell MP, Côté IM. Long-term declines and recovery of meadow area across the world's seagrass bioregions. *Global Change Biology*, 2021, 27: 4096-4109.
- [49] Jiang Z, Liu S, Zhang J, Wu Y, Zhao C, Lian Z, Huang X. Eutrophication indirectly reduced carbon sequestration in a tropical seagrass bed. *Plant and Soil*, 2018, 426: 135-152.
- [50] Liu S, Trevathan-Tackett SM, Lewis CJE, Huang X, Macreadie PI. Macroalgal blooms trigger the breakdown of seagrass blue carbon. *Environmental Science and Technology*, 2020, 54: 14750-14760.
- [51] Chen S, Chen S, Chen B, Wu Z, An W, Luo L, Wang J, Xie L, Zhang J, Chen G. Implication of macroalgal bloom to soil organic carbon stock in seagrass meadows - A case study in South Hainan, China. *Frontiers in Marine Science*, 2022, 9: 870228.
- [52] Su Z, Qiu G, Fan H, Li M, Fang C. Changes in carbon storage and macrobenthic communities in a mangrove-seagrass ecosystem after the invasion of smooth cordgrass in southern China. *Marine Pollution Bulletin*, 2020, 152: 110887.

- [53] Yue S, Zhou Y, Xu S, Zhang X, Liu M, Qiao Y, Gu R, Xu S, Zhang Y. 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.
- [54] 马旭, 王安东, 付守强, 岳修鹏, 邱冬冬, 孙丽敏, 汪方芳, 崔保山. 黄河口互花米草对日本鳗草 *Zostera japonica* 的入侵生态效应. *环境生态学*, 2020, 2(4): 7.
- [55] 钟超, 廖亚琴, 刘伟杰, 隋昊志, 陈清华. 广东沿海海草床的现状、面临的威胁与保护建议. *生物多样性*, 2024, 32(02): 118-135.
- [56] 朱志雄, 马坤, 方彰胜, 蔡泽富, 陈石泉. 海南省麒麟菜自然保护区海草资源分布及保护建议. *广东农业科学*, 2017, 44(4): 90-98.
- [57] Sagerman J, Hansen J P, Wikström S A. Effects of boat traffic and mooring infrastructure on aquatic vegetation: A systematic review and meta-analysis. *Ambio*, 2020, 49: 517-530.
- [58] 叶嘉晖, 邱崇玉, 曾文轩, 史云峰, 赵牧秋, 韩秋影. 海草床沉积物有机碳研究综述. *海洋科学*, 2022, 46(09): 130-145.
- [59] 李艳平, 张彦浩, 吴晓晓, 张文涛, 张沛东. 不同水体浊度对鳗草存活、生长和生理的影响. *渔业科学进展*, 2023: 44(4): 35-44.
- [60] Yue S, Zhang X, Xu S, Liu M, Qiao Y, Zhang Y, Liang J, Wang A, Zhou Y. The super typhoon Lekima (2019) resulted in massive losses in large seagrass (*Zostera japonica*) meadows, soil organic carbon and nitrogen pools in the intertidal Yellow River Delta, China. *Science of the Total Environment*, 2021, 793: 148398.



An underwater photograph showing a dense seagrass bed. The water is clear and greenish, with sunlight filtering through, creating a bright, shimmering effect. The seagrass leaves are long and narrow, with some showing signs of damage or discoloration. A solid green horizontal bar is positioned at the bottom of the image, containing the title text in white.

海草床生态修复手册