



中国海洋工程咨询协会
China Association of Oceanic Engineering

团 体 标 准

T/CAOE 21.5-2020

海岸带生态减灾修复技术导则 第 5 部分：海草床

Technical guideline on coastal ecological rehabilitation for hazard mitigation —
Part 5: Seagrass bed

2020-07-21 发布

2020-07-21 实施

中国海洋工程咨询协会 发布

目 次

前 言.....	II
1 范围.....	1
2 规范性引用文件.....	1
3 术语和定义.....	1
4 工作流程.....	2
5 资料收集与调查.....	2
5.1 资料需求.....	2
5.2 生态系统现状调查.....	2
5.3 减灾功能现场观测.....	3
6 适宜性评价.....	3
6.1 评价内容.....	3
6.2 生态现状评估.....	3
6.3 减灾功能评估.....	3
6.4 修复适宜性评价.....	4
7 实施方案编制.....	4
8 海草床生态减灾修复技术.....	4
8.1 物种选择.....	4
8.2 种源地选择.....	5
8.3 海草床修复方法.....	5
8.4 管护.....	5
9 跟踪监测与效果评估.....	5
9.1 跟踪监测.....	5
9.2 效果评估.....	5
10 质量控制.....	6
11 成果与归档.....	6
附录 A（规范性附录）海草床海洋减灾功能评估方法.....	7
附录 B（资料性附录）海草床生态修复主要物种图集.....	11
附录 C（规范性附录）海草床修复方法.....	12
附录 D（规范性附录）海草床修复效果评估指标计算方法.....	14
参考文献.....	17

前 言

T/CAOE 21《海岸带生态减灾修复技术导则》分为以下 11 个部分：

- 第 1 部分：总则；
- 第 2 部分：红树林；
- 第 3 部分：盐沼；
- 第 4 部分：珊瑚礁；
- 第 5 部分：海草床；
- 第 6 部分：牡蛎礁；
- 第 7 部分：砂质海岸；
- 第 8 部分：海堤生态化建设；
- 第 9 部分：连岛海堤和沿岸工程整治改造；
- 第 10 部分：围填海工程海堤生态化建设；
- 第 11 部分：监管监测。

本部分为T/CAOE 21的第5部分，与第1部分配套使用。

本部分按照 GB/T 1.1-2009 给出的规则起草。

本部分由自然资源部海洋预警监测司提出。

本部分由中国海洋工程咨询协会归口。

本部分起草单位：自然资源部第四海洋研究所、国家海洋局北海环境监测中心、自然资源部海洋减灾中心、中国海洋大学。

本部分主要起草人：于硕、陈旭阳、鲍萌萌、陈新平、张沛东、国志兴、宋文鹏、李文涛、赵玉慧、谭皓原、乔莹、尹群健、马笑晚、邢永泽。

海岸带生态减灾修复技术导则

第5部分：海草床

1 范围

T/CAOE 21 的本部分规定了海草床生态减灾修复的工作流程、资料收集与调查、适宜性评价、实施方案编制、生态减灾修复技术、跟踪监测与效果评估、质量控制以及成果与归档等内容。

本部分适用于海岸带保护修复工程中海草床的生态减灾修复工作，其他海草床修复工作可参照使用。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB 3097 海水水质标准

GB/T 12763.2 海洋调查规范 第2部分：海洋水文观测

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

T/CAOE 21.1 海岸带生态减灾修复技术导则 第1部分：总则

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本部分。

3.1

海草床 seagrass bed

由一种或多种海草组成的海草群落。

注：改写 HY/T 083-2005，定义 3.1。

3.1

生殖枝 reproductive shoot

具有花或种子的海草茎枝。

3.2

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。

3.3

繁殖体 propagule

任何可以用于繁殖目的的植物材料，包括分株、种子等。

3.4

分株移植 ramet transplantation

从生长茂盛的天然海草床采集长势良好的分株，将其移栽于待修复海域的一种方法。

3.5

移植单元 planting unit

海草移植的基本单位。

3.6

种子库 seed bank

底质中具有活力的种子总称。

4 工作流程

工作流程按照 T/CAOE 21.1 中第 6 章规定的要求执行。

5 资料收集与调查

5.1 资料需求

海草床生态减灾生态修复工程区应收集和调查的背景资料（见表1），包括：

- 工程区概况：区域位置、范围、气候、岸滩高程；
- 工程区生态状况：海草床、生物群落（大型底栖动物、大型藻类）、水环境、底质环境等；
- 工程区海洋动力状况：区域的波浪、海流、潮位等的特征；
- 工程区海洋灾害状况：区域的风暴潮、台风、海浪灾害等发生的频次及等级等；
- 工程区人类活动：渔业活动、海洋工程、陆源污染等。

表1 海草床生态减灾修复工程区域资料收集与调查内容

调查内容	调查要素	调查方式
工程区概况	自然条件：气候等	资料收集
	地理属性：具体位置和地理坐标	资料收集
	地形：岸滩高程	现场调查
	政策法规：法律法规、规划	资料收集
海草床	面积、种类、盖度、茎枝密度、茎枝高度、植被带宽度	现场调查
生物群落	大型底栖动物：种类、密度、生物量	现场调查
	大型藻类：盖度、种类	现场调查
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	资料收集、现场调查
	底质环境：底质类型、粒度、有机碳、硫化物	现场调查
	水动力环境：波浪、海流、潮位	现场调查或资料收集
威胁因素	自然因素：风暴潮、台风、外来物种入侵等	资料收集、现场调查、社会调查等
	人为活动：渔业捕捞、底栖生物采捕、海水养殖、海洋工程、陆源污染等	资料收集、现场调查、社会调查等

5.2 生态系统现状调查

5.2.1 调查要素

调查要素详见表1。

5.2.2 调查方法

海草床、生物群落（大型底栖动物、大型藻类）、水环境、底质环境、岸滩高程、人为活动等指标调查方法按照T/CAOE 20.6的规定执行。水动力环境资料中须包含近5年内且不少于1次的连续观测数据，具体调查方法按照GB12763.2的规定执行。

5.2.3 调查时间

海草床生态减灾修复前后各开展1次调查，调查时间应安排在同一季节。

在风暴潮灾害期间，现场调查应在灾后10d内开展生态系统现状调查。

5.3 减灾功能现场观测

5.3.1 测量断面与测点选取

通过设置断面来现场观测海草床减灾功能。断面应尽量与波向平行，断面范围内海草的茎枝密度和植被带宽度应当能较好地反应整个区域海草床的情况。当海草床分布区域特征均匀时设置1个~2个断面；当海草床分布区域特征有明显差异时，应选取3个以上断面。每个断面测点不少于3个，其中2个分别位于海草植被区向海侧（向海点）和海草植被区向陆侧（向陆点）。

5.3.2 观测要素与方法

减灾功能现场观测要素包括向海点和向陆点的波高和潮位。波高、周期等海浪要素和潮位的观测方法按照 GB/T 12763.2 的相关规定执行。

5.3.3 观测时间

减灾功能现场观测时段应包含整个风暴潮影响期间（风暴潮预警前1d~3d至风暴潮预警解除）。

6 适宜性评价

6.1 评价内容

在海草床生态减灾修复前，应开展适宜性评价，编制适宜性评价报告。评价内容包括生态现状评估、减灾功能评估、修复适宜性评价等内容；如果该区域无海草床分布，则无需进行减灾功能评估。

6.2 生态现状评估

生态现状评估按照T/CAOE 20.6的规定执行。

6.3 减灾功能评估

6.3.1 评估内容

评估海草床对风暴潮和海浪的消减效果。

6.3.2 评估指标

波高衰减率按式（1）计算，按公式（1）进行计算。

$$R_{wL} = \frac{H_0 - H_L}{H_0} \times 100\% \dots\dots\dots(1)$$

式中：

R_{wL} ——风暴潮期间波浪经过植被宽度为 L 的海草床植被后，波高衰减量（ $H_0 - H_L$ ）与原波高 H_0 的比值百分数；

H_0 ——海草床植被区向海侧（向海点）的有效波高，单位为米（m）；

H_L ——海草床植被区向陆侧（向陆点）的有效波高，单位为米（m）。

6.3.3 评估方法

见附录 A。

6.3.4 评估结果

评估结果可根据波高衰减率将减灾功能分为优、良、中、差四个等级，具体见表 2。

表2 海草床植被的波高衰减率等级表

波高衰减率	减灾功能等级
≥25%	优
15%~25%	良
5%~15%	中
<5%	差

6.4 修复适宜性评价

6.4.1 评价指标

选取退化海草床（现状评估总分 < 60 分）作为生态修复适宜性评价的主要对象。退化区域的环境条件应满足海草生物学生长的相关要求，主要包括：

- a) 海流流速相对平缓，不宜超过 1.5 m/s；
- b) 水体盐度相对稳定，不低于 20；
- c) 无大量悬浮泥沙来源，透光度较高；
- d) 沉积物中硫化物含量不高于 500 μg/g；
- e) 底质表层为粘土质粉砂、粉砂质砂或细砂（虾形草属海草为岩礁底质）；
- f) 海水污染、渔业活动等人类干扰较少，海水符合 GB 3097 规定的三类以上水质标准。

6.4.2 适宜性分区

适宜性分区可分为适宜修复区、可改造修复区和不适宜修复区，具体按照以下要求划定：

- a) 满足 6.4.1 所有条件，为适宜修复区。
- b) 基本满足 6.4.1 的条件，但主要受海水污染、渔业生产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。
- c) 不满足 6.4.1 海草生长条件，且生境改善不可行，或与当地规划相冲突的区域，为不适宜修复区。

7 实施方案编制

实施方案编制按照 T/CAOE 21.1 中 7.3 规定的要求执行。

8 海草床生态减灾修复技术

8.1 物种选择

优先选择当地具有一定减灾功能的中型或大型海草物种，详见表 3 和附录 B。

表 3 海草床生态修复主要物种

	中文名 (拉丁名)	修复方法	修复时间	种子采集时间	播种密度
温带海草	鳗草 (<i>Zostera marina</i>)	分株移植法	5月-6月或 9月-10月中旬	7月-8月	150,000 粒 /公顷
		种子法	9月中旬-10月初		
	日本鳗草 (<i>Zostera japonica</i>)	分株移植法	5月-6月	9月-10月	300,000 粒 /公顷
		种子法	10月-11月		

	红纤维虾形草 (<i>Phyllospadix iwatensis</i>)	分株移植法	10月-11月	-	-
亚热带 -热带 海草	海菖蒲 (<i>Enhalus acoroides</i>)	分株移植法	4月-6月	9月-12月	100,000粒 /公顷
		种子法	9月-12月		
	日本鳗草 (<i>Zostera japonica</i>)	草块移植法	11月-翌年1月	-	-
	泰来草 (<i>Thalassia hemprichii</i>)	草块移植法	4月-6月	-	-
	圆叶丝粉草 (<i>Cymodocea rotundata</i>)	分株移植法	4月-6月	-	-

8.2 种源地选择

海草床生态修复的种源地选择应遵循以下原则：

- 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；
- 种源地的环境条件与修复区相似。

8.3 海草床修复方法

见附录 C。

8.4 管护

海草床修复区 2 年内需定期管护，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；
- 制定完善的台风、风暴潮等灾害天气的应急预案；
- 加强社会参与力度，提高公众保护意识。

9 跟踪监测与效果评估

9.1 跟踪监测

9.1.1 监测频次

海草床修复当年（第1年）初期应为1周~2周监测1次，待移植海草的成活率趋于稳定，每2个~3个月监测1次。第2年往后每年夏季监测1次，持续监测不少于3年。

9.1.2 监测内容

第1年监测内容主要为海草床，监测指标包括移植单元成活率、盖度、茎枝高度、茎枝密度等。第2年往后监测内容及指标见表4，调查监测方法按照T/CAOE 20.6的规定执行。

9.2 效果评估

9.2.1 减灾效果评估

按照 6.3 规定的方法执行。

9.2.2 生态效果评估

9.2.2.1 选取参照系

以海草床生态减灾修复前的状况为参照系评估海草修复效果。评估方法按照 T/CAOE 20.6 的规定执行。

9.2.2.2 评估指标及赋值

在海草床修复第3年开始进行修复效果综合评估。评估指标包括海草床、生物群落和环境要素等，指标分级及赋值见表4。

表4 海草床生态修复效果评估指标、分级与赋值

海草床	指标	I	II	III
1	海草床面积增加	>15%	≥5%~<15%	<5%
2	盖度增加	>15%	≥5%~<15%	<5%
3	茎枝密度增加	>15%	≥5%~<15%	<5%
赋值		50	30	10
生物群落	指标	I	II	III
1	大型藻类盖度	≤15%	>15%~<30%	>30%
2	大型底栖动物生物量增加	>10%	>5%~<10%	≤5%
赋值		25	15	5
水环境	指标	I	II	III
1	溶解氧 (mg/L)	>6	>5~≤6	≤5
2	悬浮物 (mg/L)	≤10	>10~≤50	>50
3	无机氮 (μg/L)	≤200	>200~≤300	>300
4	活性磷酸盐 (μg/L)	≤15	>15~≤30	>30
赋值		15	10	5
底质环境	指标	I	II	III
1	有机碳含量	≤2.0%	>2.0%~<3.0%	>3.0%
2	硫化物含量 (μg/g)	≤300	>300~≤500	>500
赋值		10	5	1

9.2.2.3 指标计算方法

见附录 D。

9.2.2.4 综合评估方法

修复后海草床生态状况综合评估指数按式 (2) 计算。

$$I_{RSG} = I_{RV} + I_{RB} + I_{RW} + I_{RS} \dots\dots\dots (2)$$

式中：

I_{RSG} ——修复后海草床生态状况综合评估指数；

I_{RV} ——海草床状况指数；

I_{RB} ——生物群落状况指数；

I_{RW} ——水环境状况指数；

I_{RS} ——底质环境状况指数。

当海草床生态系统综合评估指数 $I_{RSG} \geq 80$ 时，生态修复效果为显著改善；当 $60 \leq I_{RSG} < 80$ 时，生态修复效果为改善；当 $I_{RSG} < 60$ 时，生态修复效果为基本无变化。

10 质量控制

质量控制按照T/CAOE 21.1第8章规定的要求执行。

11 成果与归档

成果与归档按照T/CAOE 21.1第9章规定的要求执行。

附录 A
(规范性附录)
海草床海洋减灾功能评估方法

A.1 现场观测方法

A.1.1 现场观测方法的适用性

现场观测方法适用于受灾频繁，且经济条件许可的待评估区域。在开展海草床海洋减灾功能评估的年份，应至少有一次风暴潮对评估区域造成显著影响。

A.1.2 观测数据分析及计算方法

现场观测的有效波高序列（具体见本文件 5.3）选取其中最不利（有效波高最高最大）时段（时长可取为 30 分钟），将观测断面前后测点的有效波高 H_0 和 H_L 带入公式（1）（见本文件 6.3.2），计算得到波高衰减率 R_{wL} 。

A.2 物理模型试验方法

A.2.1 物理模型试验法的适用性

区域海洋灾害频率较低（评估年份内未发生影响待评估区域的风暴潮）或观测条件限制等导致无法进行现场观测的情况下，可采用物理模型试验方法。与经验公式法相比，物理模型实验法的优势在于可以评估具有形态复杂、分布不均的具有复杂特征的海草床海洋减灾效果。

A.2.2 技术方法

A.2.2.1 模型物选取

物理模型需要选取海草床植被区植物模型，可根据海草植物的结构特征，按照长度相似准则确定模型的尺寸，长度相似比尺 λ_L 如式（A.1）所示。

$$\lambda_L = \frac{L_p}{L_m} \dots\dots\dots(A.1)$$

式中：

L_p ——原型的特征长度，单位为米（m）；
 L_m ——模型的特征长度，单位为米（m）。

A.2.2.2 模型物布置

根据实际海草分布特征布置模型物。模型植物布置密度 N_m 和植被带宽度 L_m 可根据长度相似比尺分别按照式（A.2）和（A.3）计算。

$$N_m = N_p \lambda_L^2 \dots\dots\dots(A.2)$$

$$L_{vm} = \frac{L_{vp}}{\lambda_L} \dots\dots\dots(A.3)$$

式中：

N_p ——模型的特征密度；
 N_m ——模型的特征密度；
 L_{vp} ——原型植被带的特征宽度，单位为米（m）；
 L_{vm} ——模型植被带的特征宽度，单位为米（m）。

A. 2. 2. 3 水位和波浪条件

根据待评估海草床植被区的近岸潮汐及波浪特征,模型水动力参数中波高和水位可采用长度比尺推求,计算公式如式(A.4)和式(A.5)所示。模型试验与原型参数还应符合重力相似准则,即原型弗洛德数与模型弗洛德数相等。根据长度比尺及重力相似准则,得到模型中波浪周期与真实海况周期的关系如式(A.6)所示。

$$H_{0m} = \frac{H_{0p}}{\lambda_L} \dots\dots\dots(A.4)$$

$$\eta_m = \frac{\eta_p}{\lambda_L} \dots\dots\dots(A.5)$$

$$T_m = \frac{T_p}{\sqrt{\lambda_L}} \dots\dots\dots(A.6)$$

式中:

H_{0p} ——原型水动力参数的特征有效波高,单位为米(m);

H_{0m} ——原型水动力参数的特征有效波高,单位为米(m);

η_p ——原型水动力参数的特征水位,单位为米(m);

η_m ——模型水动力参数的特征水位单位为米(m);

T_p ——原型水动力参数的特征有效波周期,单位为秒(s);

T_m ——原型水动力参数的特征有效波周期,单位为秒(s)。

A. 2. 2. 4 水槽及测量仪器布置

物理模型实验的实验水槽首端应布设具备主动吸波功能的造波设备。模型布置在水槽中部,与造波设备相隔一定距离。在模型区后,经过一段距离后设置消波设备。实验室通常采用数字波高仪测量波浪在海草床植被区的传播衰减,可将波高仪布置在植被区及其前后,波高仪测点至少为3个(植被区的前、中、后边缘各一个)。

A. 2. 3 试验数据分析及计算

利用模型试验得到的数据,将试验工况的水位、波高、周期等水动力参数及植被区的宽度、高度等参数以公式(A.3)~公式(A.5)计算相应的参数,并将待评估原型植被减灾区前后的波高 $H_0 = H_{0p}$ 和 $H_L = H_{Lvp}$ 以及评估断面植被区宽度 $L = L_{vp}$ 带入到公式(1),即可计算得到波高衰减率 R_{wL} 。

A. 3 数值模拟方法

A. 3. 1 数值模拟法的适用性

在区域海洋灾害频率较低(评估年份内未发生影响待评估区域的风暴潮)或经济技术条件不允许采用现场观测方法时,若掌握了区域植被区长度、宽度等分布区域特征,以及植被茎枝的密度、高度等特征参数、水动力条件,且有成熟的数值模拟技术条件时,可采用此法评价海草床减灾功能。

A. 3. 2 数值模式

现有的植物与波浪相互作用的数值模型主要有两类，一类是在海流和海浪模型中直接增加一项植物作用力项来表征植物作用，并对模型在海草床区域的相关参数进行修正；另一类是使用专门的海草床区域中的波流运动模型，这一类模型也有不同的处理方法，如将植物区视为多孔介质进行空间平均推导得到的植物区波流运动流体控制方程。具体的数值模拟可根据实际需求和计算能力等条件选择合适的数值模型。

本导则给出多孔介质波流运动流体控制方程的计算方法，具体如下：

该模型将植被区植株视为多孔介质，对 N-S 方程进行空间平均推导得到，模型控制方程如式 (A.7) 和式 (A.8)。该模型能够较好的模拟波浪在植被区传播衰减的过程。

$$\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_i} = 0 \quad \dots\dots\dots (A.7)$$

$$\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial t} + \langle u_j \rangle \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \langle P \rangle}{\partial x_i} + g_i + \nu \frac{\partial^2 \langle u_i \rangle}{\partial x_i \partial x_j} - \frac{\partial^2 \langle u_i' u_j' \rangle}{\partial x_j} - \langle f_i \rangle \quad \dots\dots\dots (A.8)$$

式中：

$\langle u_i \rangle$ ——i (二维问题中 i=1,2; 三维问题中 i=1,2,3) 方向的空间平均速度；

$\langle P \rangle$ ——空间平均压力；

ρ ——流体密度，单位为 kg/m³；

g_i ——i 方向的重力加速度；

ν ——流体运动粘度；

$\langle u_i' u_j' \rangle$ ——空间平均雷诺应力，可才用 k-e 紊流模型求解；

$\langle f_i \rangle$ ——空间平均植物作用力。

植被区作用力 f_i 可概化为拖曳力项和惯性力项，对于单根圆柱可分别采用式 (A.9) 和式 (A.10) 计算其对水体作用的拖曳力和惯性力。

$$f_D = \frac{1}{2} \rho C_D D u |u| \quad \dots\dots\dots (A.9)$$

$$f_I = \rho C_m \frac{\pi D^2}{4} \frac{\partial u}{\partial t} \quad \dots\dots\dots (A.10)$$

式中：

f_D ——拖曳力；

f_I ——惯性力；

C_D ——拖曳力系数 (可根据不同海草植物种类的刚性和柔性特征等具体特征进行确定)；

C_m ——惯性力系数 (可根据不同海草植物种类的刚性和柔性特征等具体特征进行确定)；

ρ ——流体的密度，单位为 kg/m³；

D ——植株的直径，单位为 m；

u ——水流速度，单位为 m/s。

A.3.3 数值模拟结果分析及计算

采用数值模拟方法评估减灾功能时，应采用真实尺度进行模拟计算，并将模拟得到的待评估植被区前后的波高 H_0 和 H_L 带入到公式 (1)，即可计算得到波高衰减率 R_{wl} 。

A.4 评估方法的选取

评估方法的选取，应结合区域的现场条件、经济条件、技术设备以及实验条件综合考虑。在条件允许时，应首先优先考虑现场观测法直接测量计算风暴潮期间海草床的波高消减率。当条件有限，如近些年没有风暴潮影响评估区域，无法进行风暴潮灾害期间的现场观测式，可采用其他方法；如物理模型实验条件允许，可采用物理模型进行评估，要确保原型植物参

数与海洋水动力参数真实可靠；当采用数值模拟方法评估时，应注意选取可靠的数值模型、确保海草植物特征合理准确的参数化。

附录 B
(资料性附录)
海草床生态修复主要物种图集



鳗草



鳗草种子



红纤维虾形草



海菖蒲



海菖蒲果实



海菖蒲种子



泰来草



圆叶丝粉草



日本鳗草

附录 C (规范性附录) 海草床修复方法

C.1 移植法

C.1.1 移植时间

不同海草物种的修复时间不同。详见表 3。

C.1.2 移植单元采集

常用的移植单元包括草块和克隆分株，按照以下方法在种源地采集。在采集移植单元时，尽量从海草床不同区域进行采集，以减少对海草床的破坏。

——草块：采用直径（约 20 cm~30 cm）的 PVC 管或铁铲等工具在海草床内连根带底质挖取具有一定形状（圆柱体、长方体）的草块。为方便运输，草块的长、宽度均小于等于 30 cm，草块深度根据不同海草根系的发达程度而定。采集草块的间距不低于 0.5 m。

——分株：首先采集草块（方法如上），随后就地洗掉附带的底质，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。

C.1.3 移植单元暂养与运输

采集移植单元后可采用加厚塑料整理箱或暂养池中暂养。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。海草植株容易腐烂，移植单元采集后应尽快移植（2d~3d 内）。

C.1.4 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坑，将草块放入后压实。草块移植间距不超过 50 cm。

——分株：为防止被海浪冲走，移植单元的固定需要借助其他外物。具体方法有：

a) 根状茎绑石法：用麻绳或塑料扎带（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。

b) 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。枚订插入底质的长度 15 cm 左右，移植单元均匀分布。

c) 网格法：将根状茎用麻绳或扎带固定于网片或网格框架上，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。

C.2 种子法

C.2.1 种子采集

不同物种的种子成熟期不同，采集时间见表 2。种子采集方法如下：

——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和日本鳗草。

——种子库采集：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（孔径不超过种子短径）清洗，挑取种子。该方法主要应用于有种子库的物种，如鳗草、日本鳗草等。

——果实采集：每年 9 月~12 月采集海菖蒲成熟果实，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。

C. 2. 2 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 0-4℃ 冷藏保存（浸泡在海水中）；海菖蒲需常温保存（浸泡在海水中）。播种时，将种子取出，用泡沫箱（加冰块）运输至修复区。海菖蒲种子释放后尽快播种，以防止种子腐烂（3d~5d）。

C. 2. 3 播种时间与密度

不同物种的播种时间见表 3。

不同物种的播种密度不同。鳗草的播种密度不低于 150,000 粒/公顷；日本鳗草的播种密度不低于 300,000 粒/公顷。海菖蒲的播种密度 100,000 粒/公顷。

C. 2. 4 播种方法

主要包括直接播种法、泥块播种法、网袋播种法、机械播种法、移植幼苗法等。

——直接播种法：低潮时将种子直接播撒在修复区。该方法成本低，但种子流失严重。适合于种子量充足的物种。

——泥块播种法：将细沙与黏土用水混合均匀，采用直径为 7 cm~10 cm，高 3 cm~5 cm 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 1d~2d 后，抛掷在海草修复区。该方法适用于鳗草。

——网袋装种播种法：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），将网袋平铺于修复海域，平铺时厚度不超过 5 cm。

——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。

——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。

附录 D
(规范性附录)
海草床修复效果评估指标计算方法

D.1 海草床指标

a) 海草床面积增加率按式 (D.1) 计算:

$$V_1 = \frac{A-A_0}{A_0} \times 100\% \quad \text{..... (D.1)}$$

式中:

V_1 ——海草床的面积增加率, 单位为百分比 (%);

A ——修复后的面积, 单位为公顷 (hm²);

A_0 ——初始栽种面积, 单位为公顷 (hm²)。

注: 海草床面积的边界界定为盖度为 $\geq 5\%$ 。

b) 海草盖度指标按式 (D.2) 计算:

$$\bar{C} = \frac{\sum_1^N C_i}{N} \quad \text{..... (D.2)}$$

式中:

\bar{C} ——修复后海草盖度监测平均值, 单位为百分比 (%);

C_i ——第 i 个样方盖度数值, 单位为百分比 (%);

N ——评估区域样方总数。

海草盖度的变化按式 (D.3) 计算:

$$V_2 = \frac{\bar{C}-C_0}{C_0} \times 100\% \quad \text{..... (D.3)}$$

式中:

V_2 ——海草盖度的变化率, 单位为百分比 (%);

\bar{C} ——修复后海草盖度监测平均值;

C_0 ——初始栽种盖度。

c) 海草茎枝密度指标按式 (D.4) 计算:

$$\bar{D} = \frac{\sum_1^N D_i}{N} \quad \text{..... (D.4)}$$

式中:

\bar{D} ——茎枝密度监测平均值, 单位为株/m²;

D_i ——第 i 个样方茎枝密度, 单位为株/m²;

N ——评估区域样方总数。

海草茎枝密度的变化按式 (D.5) 计算:

$$V_3 = \frac{\bar{D}-D_0}{D_0} \times 100\% \quad \text{..... (D.5)}$$

式中:

V_3 ——茎枝密度的变化率, 单位为百分比 (%);

\bar{D} ——修复后茎枝密度监测平均值;

D_0 ——初始栽种茎枝密度。

d) 修复海草床评估指数计算按式 (D.6) 计算:

$$I_{RV} = \frac{\sum_1^q V_i}{q} \quad \text{..... (D.6)}$$

式中:

I_{RV} ——修复后海草床评估指数;

V_i ——第 i 个海草床评估指标赋值 (见表 4);

q ——海草床评估指标总数。

D.2 生物群落指标

a) 大型藻类盖度平均值按式 (D.7) 计算:

$$B_1 = \frac{\sum_1^N MA_i}{N} \dots\dots\dots (D.7)$$

式中:

B_1 ——修复后大型藻类盖度平均值, 单位为百分比 (%);
 MA_i ——第 i 个样方内大型藻类盖度值, 单位为百分比 (%);
 N ——评估区域样方总数。

b) 大型底栖动物生物量指标按式 (D.8) 计算:

$$\overline{BA} = \frac{\sum_1^N BA_i}{N} \dots\dots\dots (D.8)$$

式中:

\overline{BA} ——修复后大型底栖动物生物量监测平均值, 单位为 g/m^2 ;
 BA_i ——第 i 个样方大型底栖动物生物量值, 单位为 g/m^2 ;
 N ——评估区域样方总数。

c) 大型底栖动物生物量的变化率按式 (D.9) 计算:

$$B_2 = \frac{\overline{BA} - BA_0}{BA_0} \times 100\% \dots\dots\dots (D.9)$$

式中:

B_2 ——大型底栖动物生物量的变化率, 单位为百分比 (%);
 \overline{BA} ——修复后大型底栖动物生物量监测平均值, 单位为 g ;
 BA_0 ——修复前大型底栖动物生物量。

d) 修复海草床生物群落 (I_{RB}) 状况指数按式 (D.10) 计算:

$$I_{RB} = \frac{\sum_1^q B_i}{q} \dots\dots\dots (D.10)$$

式中:

I_{RB} ——修复后海草床生物群落状况指数;
 B_i ——第 i 个生物群落评估指标赋值 (见表 4);
 q ——生物群落评估指标总数。

D.3 水环境指标

水环境评估按以下方法计算。

a) 水环境每项指标赋值按式 (D.11) 计算:

$$W_q = \frac{\sum_1^n W_i}{n} \dots\dots\dots (D.11)$$

式中:

W_q ——第 q 项评估指标赋值;
 W_i ——第 i 个站位第 q 项评估指标赋值 (见表 4);
 n ——评估区域站位数。

b) 水环境状况指数按式 (D.12) 计算:

$$I_{RW} = \frac{\sum_1^m W_q}{m} \dots\dots\dots (D.12)$$

式中:

I_{RW} ——修复后水环境状况指数;
 W_q ——第 q 项评估指标赋值 (见表 4);
 m ——评估区域评估指标总数。

D.4 底质环境指标

a) 底质环境各项评估赋值按公式 (D.13) 计算:

$$S_q = \frac{\sum_1^n S_i}{n} \dots\dots\dots (D.13)$$

式中:

S_q ——底质环境第 q 项评估指标赋值;

S_i ——底质环境第 i 个站位第 q 项评估指标赋值（见表 4）；

n ——评估区域站位数。

b) 底质环境状况指数按式 (D.14) 计算：

$$I_{RS} = \frac{\sum_i^q S_q}{q} \dots\dots\dots (D.14)$$

式中：

I_{RS} ——修复后底质环境状况指数；

S_q ——第 q 项评估指标赋值；

q ——评估区域评估指标总数。

参考文献

- [1] 张大勇. 2004. 植物生活史进化与繁殖生态学. 北京: 科学出版社.
- [2] 李森, 范航清, 邱广龙 等, 2010. 海草床恢复研究进展. 生态学报, 30(9): 2443–2453.
- [3] 张沛东, 曾星, 孙燕 张秀梅. 2013. 海草植株移植方法的研究进展. 海洋科学, 37(5):100–107.
- [4] 于硕, 张景平, 崔黎军, 江志坚, 张凌, 黄小平. 2019. 基于种子法的海菖蒲海草床恢复. 热带海洋学报, 38(1): 49–54.
- [5] 邱广龙, 范航清, 李蕾鲜, 李森. 2014. 潮间带海草床的生态修复. 北京: 中国林业出版社.
- [6] 国家海洋局. 2005. HY/T 083-2005 《海草床生态监测技术规程》[S].国家海洋环境监测中心.
- [7] Calumpong H.P., and Fonseca M.S. 2001. Seagrass transplantation and other seagrass restoration methods. In: Short F.T. and Coles R.G (Eds.). Global Seagrass Research Methods. Elsevier Science B.V. pp. 425–443.
- [8] Statton J., Dixon K.W., Irving A.D., et al. 2018. Decline and Restoration Ecology of Australian Seagrasses. In: Larkum A.W.D., Kendrick G.A., Ralph P.J. (Eds.), Seagrasses of Australia, Structure, Ecology and Conservation. Springer Nature Switzerland A.G. pp. 665–704.
-