

Doi:10.11840/j.issn.1001-6392.2023.02.012

海草恢复生态学与修复技术研究进展

王小康^{1,2}, 杨海杰^{1,2}, 赵鹏²

(1. 海南大学 海洋学院, 海南 海口 570208; 2. 海南大学 南海海洋资源利用国家重点实验室, 海南 海口 570208)

摘 要: 海草是一类生活在近海区域的高等被子植物, 初级生产力高, 是全球重要的碳汇之一, 具有净化水质、消浪固滩, 以及为珍稀濒危海洋生物提供栖息地和保护地的功能。无节制的人类活动和频发的极端气象灾害导致近岸海洋污染加剧、海洋生态系统退化和海草床大面积消失。本文以相关海草床修复生态学基础理论为出发点, 在自然因素和人为因素两个方面归纳了海草修复需要考虑的因素, 梳理了国内外海草修复实践和技术理论方法, 提出了利用营养物质、植物激素和物种共生关系等人为促进海草床生长的技术方法, 并从法律角度、技术体系、保护体系和科普宣传等方面提出了促进我国海草床修复的建议, 以期为我国海草床保护与修复工作提供理论基础和技术参考。

关键词: 滨海湿地; 修复; 无性繁殖; 有性繁殖

中图分类号: P76; X171.4

文献标识码: A

文章编号: 1001-6932(2023)02-0232-09

Research progress in seagrass restoration ecology and technology

WANG Xiaokang^{1,2}, YANG Haijie^{1,2}, ZHAO Peng²

(1. College of Oceanology, Hainan University, Haikou 570208, China; 2. State Key Laboratory of Marine Resources Utilization in the South China Sea, Hainan University, Haikou 570208, China)

Abstract: Seagrass is a kind of higher angiosperms that live in the offshore area, which have high primary productivity, and that is one of the world's important carbon sinks. Seagrass beds can purify water, dissipate waves and consolidate beaches, and provide habitats and protected areas for rare and endangered Marine organisms. Excessive human activities and frequent extreme meteorological disasters have led to the aggravation of coastal Marine pollution, the degradation of Marine ecosystem and the disappearance of seagrass beds. This article, based on the basic theories of seagrass bed restoration ecology as the starting point, summarizes the factors that need to be considered in seagrass restoration from two aspects: natural factors and human factors, and combed the seaweed combed the domestic and international seagrass repair technology theory and practice. Techniques about artificially promoting seagrass bed growth using nutrients, plant hormones and species symbiosis are proposed, and put forward some suggestions to promote the restoration of seagrass bed from the aspects of law, technology system, protection system and science popularization, which is hoped to provide theoretical foundation and technical reference for protection and repair of seagrass bed in our country.

Keywords: coastal wetland; restoration; asexual reproduction; sexual reproduction

海草是现存唯一一类在海水中完成整个生活史的高等被子植物, 与红树林、珊瑚礁并称为三大典型海洋生态系统, 广泛分布于除南极以外的近岸浅海, 受光照条件、温度和营养盐等因素限

制, 主要生活在-6 m以内的潮间带和潮下带, 但在-90 m深处也有发现^[1]。海草是众多海洋生物的栖息地和产卵场, 在净化水质、固碳、防浪固滩等方面具有较高的生态服务价值^[2]。截至2017年,

收稿日期: 2022-07-29; 修订日期: 2022-11-06

基金项目: 海南省重点研发计划项目 (SQ2021SHFZ0638); 北海市科技计划项目 (北科合 2020165011); 世界自然基金会海南碳中和试点项目 (POR0001311)

作者简介: 王小康 (1990—), 硕士研究生, 从事海草床基础生态学和生态修复研究, 电子邮箱: 1005714074@qq.com

通信作者: 赵鹏, 博士, 副研究员, 主要从事蓝碳科学与政策、滨海湿地生态修复研究, 电子邮箱: zp-zp@163.com

全球共有海草6科13属74种^[3]，包括丝粉草科（Cymodoceaceae）、水鳖科（Hydrocharitaceae）、鳎草科（Zosteraceae）、川蔓草科（Ruppiceae）、波喜荡草科（Posidoniaceae）和角果藻科（Zannichelliaceae）等。全球海草床分布根据区域可划分为温带北太平洋、热带印度洋—太平洋、地中海、温带北大西洋、热带大西洋和温带南大洋等六个区域^[4]。

受填海造陆、渔业活动和水体污染等人类活动与台风、飓风和热浪等自然因素的影响^[5]，全球海草床遭到破坏，面积正在快速减少。海草床的退化速度约是其再生速度的10倍，年丧失速率由1940年以前的0.9%增加到1990年以来的7%左右^[5]。已发现的海草种类中约1/3已消失，还有14%的海草种类处于灭绝的边缘，1879—2006年间全球海草床消失了 $3.37 \times 10^3 \text{ km}^2$ ^[7]。

我国共有4科10属22种海草，分属黄渤海分布区和南海分布区，其中黄渤海区优势种为鳎草（*Zostera marina*），南海区优势种为卵叶喜盐草（*Halophila ovalis*）。Harland于1856年在香港采集的卵叶喜盐草标本^[8]，这是我国海草的最早记录；Setchell于1935年将香港海域的鳎草编入全球海草分布图^[9]。20世纪50年代末起，杨岱宗等采集了中国沿海7种海草共273个样品^[10]，指出中国海草床的分布与温度有关。

人类活动是我国海草床退化和消失的主要原因，一些历史上的海草分布区已难觅海草。例如，黄渤海区80%以上的海草床已经消失^[11]，胶州湾的1333 ha日本鳎草（*Zostera japonica*）已不见踪迹^[12]。与此同时，也有一些未曾报道的海草床被发现，黄河三角洲1031.8 ha日本鳎草海草床^[13]，辽东湾694.36 ha日本鳎草和鳎草海草床^[14]，海南岛沿岸新发现8个（总面积203.64 ha）海草床^[15]和广东沿岸13处（总面积697.04 ha）海草床^[16]。

在气候变化和人类活动的共同影响下，海草床退化趋势将进一步加剧。当前，除采取有效管理措施保护现存海草床外，必须通过人为手段科学修复海草床。本文在回顾海草床修复相关生态学理论的基础上，从自然和人为两个方面总结了海草修复需要考虑的因素，梳理了国内外海草修复实践和技术方法，并提出了相应建议，以期为我国海草床保护和修复工作提供技术参考。

1 海草床修复的生态学基础

1.1 生态位理论

生态位（Niche）是指物种在空间内与其他物种和环境之间的关系，在生物多样性与环境因子研究中被广泛应用。海草床修复可根据光照、温度、营养盐、水动力和沉积物等环境因素，以及与其他动植物之间的关系，选择适宜的生态位组合，为海草生长提供适宜条件^[17]。向佛罗里达湾排放额外的淡水降低海水盐度^[18]，促进龟裂泰来草（*Thalassia testudinum*）海草群落恢复。海水富营养化导致意大利第勒尼安海大洋波喜荡草（*Posidonia oceanica*）海草床退化^[19]。

1.2 演替理论

演替理论（Succession Theory）是生态学中最基本的理论之一，生态修复的思路就是通过人为方式加速自然演替过程，缩短达到演替顶级的时间。通过添加鸟粪或者碳酸钙改变海草床底质佛罗里达群岛的莱氏二药草（*Halodule wrightii*），加速恢复^[20]。在泰来草（*Thalassia Hemprichii*）沉积物中添加铁元素改变沉积物铁含量^[21]，可以提升幼苗的生长速度。

1.3 边缘效应理论

边缘效应（Edge Effect）是指不同生态系统交互区域互相作用发生组分和行为改变的现象，具有生物群落结构复杂和生态价值高的特点。边缘效应理论可用于降低自然和人为因素对海草的影响，提高海草适应性，增加海草床生物群落的复杂性。南澳大利亚湾的大洋波喜荡草海草床，海草距离其中心位置越远受到的被捕食风险越高^[22]；澳大利亚菲利普港湾黑茎鳎草（*Zostera nigricaulis*）海草床边缘位置的鱼类体长大于中间位置的鱼类，但边缘位置的生物多样性却小于中间位置^[23]；美国纽约海岸鳎草海草床内生活的扇贝受到受捕食影响，其存活率从内部向边缘逐渐降低^[24]。

1.4 中度干扰理论

干扰理论（Interference Theory）是指生态系统结构受到外界影响而发生变化，偏离其原有的演化速度和方向。如果是受到中度干扰，其生物多样性就会达到最大化。在海草床修复中，适度的人为干扰改变，光照、温度、营养盐和水动力

等环境因子,增加海草床修复区域生物群落的复杂性和稳定性。增加大型捕食者数量,可以通过自上而下的营养级相互作用改变海草的生态系统结构,短期内提高海草床的生物量^[25];极端气象灾害频发和大型食草动物种群减少导致印度尼西亚和澳大利亚西北部的卵叶喜盐草和澳洲喜盐草(*Halophila australis*)种群的遗传多样性降低^[26]。

除上述生态学基础理论外,岛屿生物地理学理论、集合种群理论和中性理论等都可指导海草床修复实践。通过研究和利用生态学基础理论,可在海草床修复时做到有的放矢,选择合适修复方法,制定合理修复方案,缩短海草床修复周期。

2 海草床修复须考虑的因素

2.1 自然因素

光照、温度、营养盐、水动力和沉积物是影响海草生长的主要因素,根据不同自然因素对于不同海草种类生长的作用,制定不同的修复方案改善海草床生境,增加海草床生物系统多样性和复杂性,缩短海草床修复周期。

2.1.1 光照

光照是植物生长必需的因子,光照强度与水深成反比,是决定海草分布的关键因素。海草对光照强度比较敏感,随着光照强度的减弱出现退化现象。在低光照条件下,卵叶喜盐草、单脉二药草(*Halodule uninervis*)和齿叶粉丝草(*Cymodocea serrulata*)等海草的根系分泌物会发生改变,有益微生物减少^[27],抑制海草正常生长。由于管理不善致使海水浑浊度增加,造成新西兰牟氏鳎草(*Zostera muelleri*)海草床光合作用强度降低^[28],降低海草床初级生产力。

2.1.2 温度

温度对不同海草的生长影响不同,大部分海草的适宜生长温度范围为25~30℃^[29],影响海草光合作用和呼吸作用相关酶的活性。全球变暖导致日本喜盐草(*Halophila nipponica*)从低纬度地区的日本南部沿海区域向高纬度朝鲜半岛南部海域迁移^[30];温度升高降低了地中海大洋波喜荡草地下生物量^[31];气候变暖导致英国锡利群岛鳎草海草床沉积物内硫化物含量升高^[32],抑制海草生长,影响其生态系统的稳定性。

2.1.3 营养盐

氮、磷等营养盐是影响海草生长的限制性因子。一方面适宜的营养盐浓度会促进海草生长,另一方面氮磷比失衡导致的富营养化也会打破海草固定无机碳和消耗有机碳的平衡,导致土壤侵蚀和埋藏碳释放。沉积物中添加适量营养盐^[33],可以增加小丝粉草(*Cymodocea nodosa*)总生物量;在澳洲波喜荡草(*Posidonia australis*)幼苗的沉积物中施加营养盐^[34],则降低移植植株成活率。

2.1.4 水动力

海草生活的潮间带,受潮流水动力影响,物质循环周期短和能量流动快。水动力会导致海草床受到水流侵蚀或沉积物淤积,抑制边缘区域海草生长,影响海草床扩增速度。芬兰西南部海域鳎草海草床内生物群落复杂性随着水动力强度的增加而降低^[35]。人工海草种植可降低水流扰动^[36],促进底栖环境快速恢复。水动力强度大的区域会增强沉积物的流动性^[37],以覆盖海草床的形式降低海草床的盖度。

2.1.5 沉积物

海草植株依靠根或者地下茎固定在沉积物中,不同比例的砾石、沙和淤泥黏土构成的底质会抑制或促进海草床的恢复。底质粒径影响海草种子发芽和幼苗成活率^[38]。高盐度、遮阴和地下生物量过高都可以增加沉积物硫化物含量,抑制海草生长^[39]。光合作用产生的氧气进入龟裂泰来草地组织会降低沉积物中硫化物含量^[40]。海草床修复时应通过增加海草光合作用速率和提高水体含氧量的方式,降低硫化物浓度。

2.2 人为因素

水体污染、围填海工程和渔业活动等人为因素是全球范围海草退化的主要原因。海草床修复应以彻底消除影响海草健康的人为活动因素为前提,科学划定保护范围,促进海草自然恢复,提高修复工作成效。

2.2.1 水体污染

水体污染是海草床生态系统退化的主要原因,其中水体富营养化是导致海草床生态环境恶化的关键因素。沿海地区把未经处理的污水、固体废弃物和居民生活污水排放到近海,致使海水富营养化严重,尤其是排污口附近,造成藻类暴发,导致海边植被死亡、鱼群消失,海草床生态环境

受到严重威胁。海水富营养化打破海南的优势海草种类卵叶喜盐草叶片的氮磷平衡^[41]，抑制海草生长。船舶石油泄漏覆盖海水表面^[42]，降低海草光合作用的强度，海草床大面积退化。

2.2.2 围填海工程

围填海工程是指通过改变沿海地形地貌来增加陆地面积，会破坏海草床生境环境，造成海草床大面积消失。河道疏浚和抽沙行为造成山东荣成天鹅湖鳎草海草床内沉积物悬浮^[43]，水体透明度下降，降低海草光合速率。广西铁山港疏浚作业致使泥沙沉淀^[44]，造成淤泥大面积覆盖海草床，改变海草床底质环境，抑制海草生长。

2.2.3 渔业活动

海草床及其周围的渔业活动会直接破坏海草床生境，造成海草床退化甚至消失。水产养殖产生的残饵和粪便会增加水体中的氮磷含量，造成水体富营养化。广西合浦海草床由于受到沿岸居民电鱼、底拖网作业、挖沙虫和养蚝等渔业活动行为影响^[45]，破坏海草生境，致使海草大面积死亡。捕鱼的船锚破坏了印度安达曼群岛卵叶喜盐草的根茎^[46]，造成覆盖度降低了47%。

3 国内外海草修复的实践

3.1 国外海草修复实践

1931年，北美大西洋沿岸海草受疾病和富营养化影响出现大面积消失^[47]，海草床修复提上日程。20世纪40年代起，Addy等在大西洋沿岸进行鳎草海草床修复研究^[48]，这也是海草床修复最早记录。截至2010年，全球1786个海草修复实验中海草存活率仅为37%^[48]。根据修复材料和手段的不同，已开展的海草床修复可划分为生境法、种子法和移植法三类。

生境法是指通过保护和改善海草床生境，自然恢复的一种方法，主要通过立法和设立保护区实现，但花费时间长。1935年荷兰瓦登海爆发的黏菌和富营养化致使鳎草和诺氏鳎草（*Zostera noltii*）海草床大面积退化，连续70年降低入海河流的富营养化的努力，恢复了100 km²的海草床^[50]。法国的布尔纳夫湾在关闭牡蛎养殖场并降低陆源污染后的15年时间内^[51]，恢复了3.78 km²的诺氏鳎草海草床。美国通过立法控制排入佛罗

里达湾的水质^[52]，24年时间恢复了2.6 km²的莱氏二药草和川蔓草（*Ruppia maritima*）海草床。

移植法是指通过移植海草斑块或者植株的形式进行海草床修复，此种方法具有操作简单和见效快的特点，是目前最常用的方法。韩国南部安岗湾进行的鳎草根状茎移植修复^[53]，通过对大型底栖生物进行同位素检验验证了移植地具有和原生环境相似的生态功能。新西兰旺阿雷港口牟氏鳎草海草床进行了草皮法和根状茎法移植修复^[54]，根据覆盖度验证了最佳修复方法是草皮法。地中海的大洋波喜荡草根状茎移植修复^[55]，利用草席固定植株提高成活率。

种子法是利用海草种子进行有性繁殖扩增海草床面积，此类方法的修复速度可达生境法的10倍^[56]，对天然海草床破坏较小，但萌发率和成活率较低，种子收集和萌发的技术要求较高。1985年起日本濑户内海2.38 km²的鳎草海草床修复^[57]，1999年开始美国大西洋中西部沿岸潟湖2.13 km²的鳎草海草床修复^[58]以及2011年南澳大利亚州海湾0.061 km²块状川蔓草（*Ruppia tuberosa*）海草床修复实验^[59]都是采用了种子法。

3.2 我国海草修复的实践

我国进行海草床修复研究的时间比较短，其中鳎草属和喜盐草属是研究和实践最多的两个物种。种子法研究最多的海草是鳎草，相关研究集中在种子采集、加工和贮藏方法研究^[60]，除了利用种子法进行海草床修复，我国学者关注最多的海草床修复方法是移植法。在南海海草分布区，邱广龙等通过对广西北海市进行了面积为850 m²卵叶喜盐草和贝克喜盐草（*Halophila beccarii*）移植实验^[61]，查明了光照、底质和海洋环境因子是影响其生长的最大因素；陈石泉等在海南高隆湾进行了1000 m²的泰来草和海菖蒲（*Enhalus acoroides*）根状茎移植实验^[62]，其成活率受固定方式和水动力等因素影响。在黄渤海海草分布区，周毅在山东青岛汇泉湾进行了1700 m²鳎草移植实验^[63]，最佳根状茎移植法是石块法。

4 海草繁育和移植方法

4.1 有性繁殖

海草的有性繁殖包括种子繁殖和真胎生两类。

种子繁殖就是把种子播种于修复区或者在室内进行种子发育成幼苗后再移植的方法。真胎生是种子成熟后不经休眠直接在果实内发芽的特殊有性繁殖现象,对于种群的传播和环境适应具有重要意义,鳎草科鳎草属海草具有典型的真胎生现象。有性繁殖修复主要包括种子收集、种子休眠、种子萌发和播种等4个步骤。

4.1.1 种子收集

在海草种子成熟后,可根据是否漂浮在水面将种子划分为浮性和沉性两种。如海菖蒲种子^[64]和澳洲波喜荡草种子^[65]是浮性的,鳎草种子和莱氏二药草种子^[66]则是沉性的。海草种子的成熟时间,除了受自身基因调控,还受水温和光照等环境因子的影响^[67],成熟后就需要人为或者机械收集种子。与沉性海草种子相比,浮性海草种子收集起来相对简单,对海草床破坏小。

4.1.2 种子休眠

种子休眠就是指具有活力的种子处于不萌发的状态,是一种自我保护的手段。种子休眠除了跟自身基因有关,还与环境因素有关,尤其是温度和盐度。不同海草种子休眠期时间长短相差很大,虾形草属(*Phyllospadix*)的海草种子休眠期只有两周^[68],二药草属(*Halodule*)的海草种子休眠期则长达4年^[69]。存在休眠期的海草种子种皮都比较坚硬^[69],这是海草种子存在休眠的一个重要外部形态特征。

4.1.3 种子萌发

海草种子萌发受到光照、温度、盐度和沉积物类型等因素的影响。大多数种子在低温和高盐度情况下都不会萌发,鳎草种子在15℃的淡水萌发率最高((88.67±5.77)%)^[70]。沉积物类型是影响鳎草种子萌发的因素之一^[71]。红光可以在短期内加速鳎草种子萌发^[72],海菖蒲种子萌发率受到埋藏深度限制^[73]。不同海草种类的种子萌发还与自身生理、遗传因素紧密相关。

4.1.4 播种

海草种子的播种方法主要有手工播种法和机械播种法。手工播种法操作简单,但容易受到外界因素的影响,成活率较低,主要是通过人为方式深埋和利用麻袋固定等方法降低水流和动物的影响。机械播种法具有速度快的特点,但容易受到沉积物类型的影响,实施成本较高^[67]。山东荣

成通过利用机械设备把鳎草种子内藏于泥饼内播种^[74],增加锚定力,提高种子的播种率。美国弗吉尼亚州东海岸的鳎草种子利用机器播种机均匀快速地铺设于修复区域^[75],修复效率高。

4.2 无性繁殖

目前海草床修复最常见的方法就是移植法,即利用自身组织扩增的方法用于海草床规模化修复。此外假胎生也是无性繁殖的一种,即营养器官如芽孢和胞芽等在母体上发育,脱离母体独自成长为新植株的一种方式,对环境具有较强的适应性,利于植物种群的繁衍,其中丝粉草科根枝草属海草就是典型的假胎生海草种类。

4.2.1 移植分类

根据移植单元和移植方式的不同,海草移植可以分为草皮法、草块法和根状茎法。草皮法操作比较简单,直接把扁平状草皮平铺到移植区域,这种方法由于没有深埋,容易受到水流影响,尤其是在遭受恶劣气象灾害时,成活率非常低^[76];草块法与草皮法相比,其底质保存完整,形状多为圆柱体、正方体或者其他不规则体,放置于与原移植单元相同的土坑中^[77],具有固定能力强和成活率高的特点,是目前最常用的移植方法,但此种方法劳动成本较高;根状茎法的特点就是植株不含有底质,在移植过程中,需要着重对移植单元进行固定^[62],具有操作简单和运输方便的特点,但是劳动强度大和成本高。

4.2.2 移植固定

海草根状茎法移植适用于经常或者周期性发生淤泥覆盖的区域^[78],由于经常受到近海水动力的冲击作用,移植单元容易被冲走,目前固定的方法主要有订书针法、框架法和贝壳法等三种方法。订书针法根据订书针的原理,是利用金属、木质或者竹制工具把海草两端固定于潮滩底部的一种移植方法^[79],具有固定效果好和成活率高的优点,但缺点是工作量大和费用高;框架法是指将海草固定于利用可降解材料做成的框架上^[80],放置于修复区域,待长出新根后回收框架,减少对海洋的污染,该方法固定移植海草效果好,能够有效降低其他生物对海草的影响,成活率较高,但框架的制作和回收费用较高;贝壳法通过将贝壳作为海草根状茎的载体,把海草固定于贝壳上后沉入海底^[81],该方法操作简单,不会污染海洋,

但在底质较硬的区域抓地力不足，容易受到水动力的影响，除了贝壳还可以利用石块、麻袋等其他沉性物体作为载体。

5 人为促进海草生长的技术方法

5.1 添加营养物质

营养物质是海草生长过程中必不可缺的物质，通过在沉积物中添加营养盐物质，增加肥力，促进海草生长。沉积物中增加氮元素含量，提高泰来草的株高生长速度^[82]和增加龟裂喜盐草生物量^[83]；沉积物中以添加鸟粪的形式增加营养盐含量，可以增加日本鳗草（*Zostera japonica*）的地下生物量^[84]。营养盐物质可以间接促进其他生物的生长，提高海草床的修复潜力，缩短海草床修复时间。

5.2 植物激素处理

植物激素由植物体产生或者人工合成，用于调节生理机能的有机化合物，细胞分裂素、赤霉素和色氨酸等植物激素都能促进海草生长。通过研究海草应对植物激素刺激的原理，在水环境中添加植物激素，让海草叶片吸收^[85]，提高海草生长速度。澳洲波喜荡草生长环境中添加低浓度的生长素或者细胞分裂素^[65]，提高幼苗的成活率。赤霉素可以促进小粉丝草（*Cymodocea nodosa*）幼苗叶片生长^[86]，但添加生长素或者细胞分裂素却抑制其生长。

5.3 利用物种共生关系

不同物种或者生物与环境之间，相互作用影响彼此的生长。根据海草床内生物的种类与群落的关系，提高海草床保护和修复效率。海草可以为周边动植物呼吸提供所需的氧气^[87]，双壳贝类通过增加土壤疏松性和肥力促进海草生长^[88]，提高海草的生物量。海草床修复时放养双壳类动物或者投放牡蛎礁，改善土质和水文环境，提升海草的适应能力，提高海草的成活率。

6 促进我国海草恢复的建议

6.1 进一步明确海草法律地位

《中华人民共和国湿地保护法》《中华人民共和国海洋环境保护法》为滨海湿地保护修复提供

了法律依据。虽然海草床属于滨海湿地范畴，但我国法律法规未明确提及海草床，造成海草床保护意识不强，修复工作滞后的问题。未来应推动在相关法律法规中明确海草床等潮下带生态系统保护修复法律地位，国务院自然资源管理部门出台海草床保护修复的部门规章，在海草床分布集中地区出台海草床保护修复地方性法规。

6.2 深化海草修复基础科学研究

深化海草基础生物学、生态学研究，开展海草生长、繁殖、耐受环境胁迫等方面的基础实验研究，查明我国海草生长的关键因子；利用地理信息技术和大数据分析技术，对海草生长环境、生物、气候等因素进行系统分析，查明海草修复适宜区域；开展海草生长、恢复、破坏等现象的野外观测研究，为海草修复提供现场验证。

6.3 建立海草规模化修复技术体系

建立包括环境概况和生物多样性信息的海草资源信息库，在现有海草床修复技术的基础上，研发高效的海草种植和移植关键设备，提高机械化率，降低体力劳动强度与经济成本，减少修复过程中对天然海草床生态系统生境的破坏和珍稀濒危野生动植物的影响，实现海草床规模化修复。根据不同海域的生境状况和不同海草种类，因地制宜建立海草床修复评估技术体系，为相关海域海草床修复提供高效的技术方案。

参 考 文 献

- [1] 李捷, 刘译蔓, 孙辉, 等. 中国海岸带蓝碳现状分析[J]. 环境科学与技术, 2019, 42(10): 207-216.
- [2] GAIN I E, BREWTON R A, ROBILLARD M M, et al. Macrofauna using intertidal oyster reef varies in relation to position within the estuarine habitat mosaic [J]. Marine Biology, 2017, 164(1): 1-16.
- [3] 黄小平, 江志坚, 张景平, 等. 全球海草的中文命名[J]. 海洋学报, 2018, 40(4): 127-133.
- [4] SHORT F, CARRUTHERS T, DENNISON W, et al. Global seagrass distribution and diversity: a bioregional model [J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2007, 350(1-2): 3-20.
- [5] BRODIE G, HOLLAND E, RAMON N, et al. Seagrasses and seagrass habitats in Pacific small island developing states: Potential loss of benefits via human disturbance and climate change[J]. Marine Pollution Bulletin, 2020, 160: 25-36.
- [6] 王锁民, 崔彦农, 刘金祥, 等. 海草及海草场生态系统研究进展[J]. 草业学报, 2016, 25(11): 149-159.
- [7] WAYCOTT M, DUARTE C M, CARRUTHERS T J, et al. Accelerating loss of seagrasses across the globe threatens coastal ecosystems

- tems[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2009, 106(30): 12377–12381.
- [8] HANCE H F. Florae Hongkongensis supplementum. a compendious supplement to Mr. Benthams description of the plants of the Island of Hongkong[J]. Botanical Journal of the Linnean Society, 1872, 66(13): 95–144.
- [9] SETCHELL W A. Geographic elements of the marine flora of the North Pacific Ocean [J]. The American Naturalist, 1935, 69(725): 560–577.
- [10] 杨宗岱, 吴宝铃. 中国海草场的分布、生产力及其结构与功能的初步探讨[J]. 生态学报, 1981, 1(1): 84–89.
- [11] ZHOU Y, LIU X, LIU B, et al. Unusual pattern in characteristics of the Eelgrass *Zostera marina* L. in a shallow lagoon (Swan Lake), north China: Implications on the importance of seagrass conservation[J]. Aquatic Botany, 2015, 120: 178–184.
- [12] 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[J]. 植物学通报, 2002(2): 184–193.
- [13] ZHANG X, LIN H, SONG X, et al. A unique meadow of the marine angiosperm *Zostera japonica*, covering a large area in the turbid intertidal Yellow River Delta, China[J]. Science of the Total Environment, 2019, 686: 118–130.
- [14] XU S C, XU S, ZHANG X M. Sonar and in situ surveys of *Eelgrass* distribution, reproductive effort, and sexual recruitment contribution in a eutrophic bay with intensive human activities: Implication for seagrass conservation[J]. Marine Pollution Bulletin, 2020, 161: 11–24.
- [15] JIANG Z, LIU S, ZHANG J, et al. Newly discovered seagrass beds and their potential for blue carbon in the coastal seas of Hainan Island, South China Sea [J]. Marine Pollution Bulletin, 2017, 125 (1–2): 513–521.
- [16] JIANG Z, CUI L, LIU S, et al. Historical changes in seagrass beds in a rapidly urbanizing area of Guangdong Province: Implications for conservation and management[J]. Global Ecology and Conservation, 2020, 22: 74–98.
- [17] BERKSTROM C, JORGENSEN T L, HELLSTROM M. Ecological connectivity and niche differentiation between two closely related fish species in the mangrove-seagrass-coral reef continuum[J]. Marine Ecology Progress Series, 2013, 477: 201–215.
- [18] MADDEN C J, RUDNICK D T, MCDONALD A A, et al. Ecological indicators for assessing and communicating seagrass status and trends in Florida Bay[J]. Ecological Indicators, 2009, 9: S68–S82.
- [19] CALIZZA E, COSTANTINI M L, CAREDDU G, et al. Effect of habitat degradation on competition, carrying capacity, and species assemblage stability [J]. Ecology and Evolution, 2017, 7(15): 5784–5796.
- [20] KENWORTHY W J, HALL M O, HAMMERSTROM K K, et al. Restoration of tropical seagrass beds using wild bird fertilization and sediment regrading[J]. Ecological Engineering, 2018, 112: 72–81.
- [21] 赵牧秋, 王慧, 王帅, 等. 施铁对泰来草幼苗生长及环境铁含量的影响[J]. 海南热带海洋学院学报, 2020, 27(5): 49–55.
- [22] STATTON J, GUSTIN-CRAIG S, DIXON K W, et al. Edge effects along a seagrass margin result in an increased grazing risk on *Posidonia australis* transplants[J]. Plos One, 2015, 10(10): 665–680.
- [23] SMITH T M, JENKINS G R, HUTCHINSON N. Seagrass edge effects on fish assemblages in deep and shallow habitats[J]. Estuarine Coastal and Shelf Science, 2012, 115: 291–299.
- [24] CARROLL J M, FURMAN B T, TETTELBAACH S T, et al. Balancing the edge effects budget: bay scallop settlement and loss along a seagrass edge[J]. Ecology, 2012, 93(7): 1637–1647.
- [25] DOUGLASS J G, PAPERNO R, REYIER E A, et al. Fish and seagrass communities vary across a marine reserve boundary, but seasonal variation in small fish abundance overshadows top-down effects of large consumer exclosures[J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2018, 507: 39–52.
- [26] MCMAHON K M, EVANS R D, van DIJK K, et al. Disturbance is an important driver of clonal richness in tropical seagrasses[J]. Frontiers in Plant Science, 2017, 8: 2026–2041.
- [27] MARTIN B C, GLEESON D, STATTON J, et al. Low light availability alters root exudation and reduces putative beneficial microorganisms in seagrass roots[J]. Frontiers in Microbiology, 2018, 8: 2667–2682.
- [28] BULMER R H, TOWNSEND M, DRYLIE T, et al. Elevated turbidity and the nutrient removal capacity of seagrass[J]. Frontiers in Marine Science, 2018, 5: 462–470.
- [29] LEUSCHNER C, ULRICH R. CO₂ gas exchange of two intertidal seagrass species, *Zostera marina* L. and *Zostera noltii* Hornem., during emersion[J]. Aquatic Botany, 1993, 1(45): 53–62.
- [30] KIM J B, PARK J, JUNG C, et al. Distributional range extension of the seagrass *Halophila nipponica* into coastal waters off the Korean peninsula[J]. Aquatic Botany, 2008, 90(3): 269–272.
- [31] 夏优, 生西玲, 孙田力, 等. 高温对鳗草氧化损伤和抗氧化系统的影响[J]. 海洋湖沼通报, 2021, 43(5): 136–142.
- [32] GARCÍA R, HOLMER M, DUARTE C M, et al. Global warming enhances sulphide stress in a key seagrass species (NW Mediterranean)[J]. Global Change Biology, 2013, 19(12): 3629–3639.
- [33] BALESTRI E, LARDICCI C. Effects of sediment fertilization and burial on *Cymodocea nodosa* transplants; implications for seagrass restoration under a changing climate[J]. Restoration Ecology, 2014, 22(2): 240–247.
- [34] STATTON J, KENDRICK G A, DIXON K W, et al. Inorganic nutrient supplements constrain restoration potential of seedlings of the seagrass, *Posidonia australis*[J]. Restoration Ecology, 2014, 22 (2): 196–203.
- [35] MEYSICK L, YSEBAERT T, JANSSEN A, et al. Context-dependent community facilitation in seagrass meadows along a hydrodynamic stress gradient[J]. Journal of Sea Research, 2019, 150: 8–23.
- [36] CARUS J, ARNDT C, SCHROEDER B, et al. Using artificial seagrass for promoting positive feedback mechanisms in seagrass res-

- toration[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2021, 8: 993–999.
- [37] GOVERS W S. Surviving in changing seascapes: sediment dynamics as bottleneck for long-term seagrass presence [J]. *Ecosystems*, 2016, 2(19): 296–310.
- [38] KOCH E W, AILSTOCK M S, BOOTH D M, et al. The role of currents and waves in the dispersal of submersed angiosperm seeds and seedlings[J]. *Restoration Ecology*, 2010, 4(18): 584–595.
- [39] HOLMER M, BONDGAARD E J. Photosynthetic and growth response of Eelgrass to low oxygen and high sulfide concentrations during hypoxic events[J]. *Aquatic Botany*, 2001, 70(1): 29–38.
- [40] LEE K, DUNTON K H. Diurnal changes in pore water sulfide concentrations in the seagrass *Thalassia testudinum* beds: the effects of seagrasses on sulfide dynamics[J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2000, 255(2): 201–214.
- [41] 蔚枝沁, 邓泓, 吴可为, 等. 海南优势海草营养元素的含量及其影响因素研究[J]. *华东师范大学学报(自然科学版)*, 2012(4): 131–141.
- [42] MATOS M K, DE SOUZA B K, DE L M, et al. Oil spill + COVID-19: A disastrous year for Brazilian seagrass conservation[J]. *Science of the Total Environment*, 2021: 764–795.
- [43] 陈玉. 光照和波浪对孔石莼和矮大叶藻氮营养盐吸收的影响[D]. 济南: 山东大学, 2016.
- [44] 蓝锦毅. 儒艮保护区及周边海草床(2010–2017年)调查研究[J]. *中国科技信息*, 2018(22): 88–89.
- [45] 杨晨玲. 广西滨海湿地退化及其原因分析[D]. 桂林: 广西师范大学, 2014.
- [46] MISHRA A K, NARAYANA S, APTE D. Loss of Dugong grass [*Halophila ovalis* (R. Brown)] population structure due to habitat disturbance in an island ecosystem[J]. *Indian Journal of Geo-Marine Sciences*, 2021, 50(2): 115–121.
- [47] Cottam C. The Eelgrass situation on the American Pacific Coast[J]. *Rhodora*, 1939, 41(487): 257–260.
- [48] COTTAM C A. Eelgrass status and environmental relations[J]. *The Journal of Wildlife Management*, 1954, 18(4): 449–460.
- [49] KATWIJK M M, THORHAUG A, MARB N, et al. Global analysis of seagrass restoration: the importance of large-scale planting[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2016, 53: 567–578.
- [50] DOLCH T, BUSCHBAUM C, REISE K. Persisting intertidal seagrass beds in the northern Wadden Sea since the 1930s[J]. *Journal of Sea Research*, 2013, 82: 134–141.
- [51] BARILLÉ L, ROBIN M, HARIN N, et al. Increase in seagrass distribution at Bourgneuf Bay (France) detected by spatial remote sensing[J]. *Aquatic Botany*, 2009, 92(3): 185–194.
- [52] GREENING H, JANICKI A. Toward reversal of eutrophic conditions in a subtropical estuary: water quality and seagrass response to nitrogen loading reductions in tampa bay, florida, USA[J]. *Environmental Management*, 2006, 38(2): 163–178.
- [53] JE P H, HEE P T, YOON K H, et al. Assessment of restoration success in a transplanted seagrass bed based on isotopic niche metrics[J]. *Ecological Engineering*, 2021: 166–172.
- [54] MATHESON F E, REED J, SANTOS V M D, et al. Seagrass rehabilitation: successful transplants and evaluation of methods at different spatial scales[J]. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 2017, 51(1): 96–109.
- [55] LUIGI S A, FRANCESCA F, FABRIZIO A, et al. Environmental engineering techniques to restore degraded *Posidonia oceanica* meadows[J]. *Meadows Water*, 2021(13): 661–670.
- [56] REYNOLDS L K, WAYCOTT M, MCGLATHERY K J, et al. Ecosystem services returned through seagrass restoration[J]. *Restoration Ecology*, 2016, 24(5): 583–588.
- [57] MASAKAZU H, MASAOKI S. Genetic effects of Eelgrass restoration efforts by fishers' seeding to recover seagrass beds as an important natural capital for coastal ecosystem services[J]. *Population Ecology*, 2021, 63(1): 92–101.
- [58] ORTH R J, LEFCHECK J S, MCGLATHERY K S, et al. Restoration of seagrass habitat leads to rapid recovery of coastal ecosystem services[J]. *Science Advances*, 2020, 6(41): 40–49.
- [59] SINCLAIR E A, SHERMAN C D, MATTHEWS A, et al. Advances in approaches to seagrass restoration in Australia[J]. *Ecological Management & Restoration*, 2021, 22(1): 10–21.
- [60] PAN J, JIANG X, LI X, et al. An effective method for collecting and storing seeds from *Zostera marina* (Eelgrass) in the Yellow Sea, China[J]. *Restoration Ecology*, 2014, 22(6): 716–722.
- [61] 邱广龙, 范航清, 周浩郎, 等. 广西潮间带海草的移植恢复[J]. *海洋科学*, 2014, 38(6): 24–30.
- [62] 陈石泉, 蔡泽富, 沈捷, 等. 海南高隆湾海草床修复成效及影响因素[J]. *应用海洋学学报*, 2021, 40(1): 65–73.
- [63] ZHOU Y, LIU P, LIU B, et al. Restoring Eelgrass (*Zostera marina* L.) habitats using a simple and effective transplanting technique[J]. *Plos One*, 2014, 9(4): 92–98.
- [64] LACAP CDA V J R R. Propagule dispersal of the SE Asian seagrasses *Enhalus acoroides* and *Thalassia hemprichii*[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2002, 235: 75–80.
- [65] GLASBY T M, TAYLOR S L, HOUSEFIELD G P. Factors influencing the growth of seagrass seedlings: A case study of *Posidonia australis*[J]. *Aquatic Botany*, 2015, 120: 251–259.
- [66] KOWALSKI J L, DEYO E H R. Flowering and seed production in the subtropical seagrass, *Halodule wrightii* (shoal grass) [J]. *Botanica Marina*, 2016, 59(2/3): 193–199.
- [67] 韩厚伟, 江鑫, 潘金华, 等. 海草种子特性与海草床修复[J]. *植物生态学报*, 2012, 36(8): 909–917.
- [68] TURNER T. Facilitation as a successional mechanism in a rocky intertidal community[J]. *The American Naturalist*, 1983, 121(5): 729–738.
- [69] CALVIN M. The longevity of seagrass seeds [J]. *Aquatic Botany*, 1991, 40(2): 195–198.
- [70] XU S, ZHOU Y, WANG P, et al. Salinity and temperature significantly influence seed germination, seedling establishment, and seedling growth of eelgrass *Zostera marina* L.[J]. *PeerJ*, 2016, 4: 77–97.

- [71] WANG M, WANG Y, GUO X, et al. Reproductive properties of *Zostera marina* and effects of sediment type and burial depth on seed germination and seedling establishment[J]. Aquatic Botany, 2016, 134: 68–74.
- [72] 王明, 郭馨, 唐学玺, 等. 大叶藻种子萌发环境条件研究[J]. 海洋与湖沼, 2016, 47(3): 540–548.
- [73] 于硕, 张景平, 崔黎军, 等. 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.
- [74] XIE K, LI Z, LI C, et al. A low-cost and effective seeding technique using protective core for restoration of *Zostera marina* habitats[J]. Aquatic Ecosystem Health & Management, 2020, 23(3): 341–349.
- [75] MARION S R, ORTH R J. Innovative techniques for large-scale seagrass restoration using *Zostera marina* (Eelgrass) seeds[J]. Restoration Ecology, 2010, 18(4): 514–526.
- [76] IRLANDI E A, ORLANDO B A, AMBROSE W G. Influence of seagrass habitat patch size on growth and survival of juvenile bay scallops, *Argopecten irradians concentricus* (Say)[J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 1999, 235(1): 21–43.
- [77] THORHAUG A. Large-scale seagrass restoration in a damaged estuary[J]. Marine Pollution Bulletin, 1987, 18(8): 442–446.
- [78] CAMPBELL M L. Burial duration and frequency influences resilience of differing propagule types in a subtidal seagrass, *Posidonia australis*[J]. Plos One, 2016, 11(8): 11–21.
- [79] WEST R J, JACOBS N E, ROBERTS D E. Experimental transplanting of seagrasses in Botany Bay, Australia[J]. Marine Pollution Bulletin, 1990, 21(4): 197–203.
- [80] SHORT F T, KOPP B, J G. Seagrass ecology and estuarine mitigation: a low-cost method for Eelgrass restoration[J]. Fisheries Science, 2002, 68(2): 1759–1762.
- [81] PHILLIPS R C. Preliminary observations on transplanting and a phenological index of seagrasses[J]. Aquatic Botany, 1976, 2: 93–101.
- [82] 赵牧秋, 王慧, 王帅, 等. 三亚周边海域泰来草形态、生长特征及其与环境营养元素含量的关系[J]. 海南热带海洋学院学报, 2020, 27(2): 27–34.
- [83] FERDIE M, FOURQUREAN J W. Responses of seagrass communities to fertilization along a gradient of relative availability of nitrogen and phosphorus in a carbonate environment[J]. Limnology and Oceanography, 2004, 49(6): 2082–2094.
- [84] HAN Q, SOISSONS L M, LIU D, et al. Individual and population indicators of *Zostera japonica* respond quickly to experimental addition of sediment-nutrient and organic matter[J]. Marine Pollution Bulletin, 2017, 114(1): 201–209.
- [85] 张沛东, 吴晓晓, 徐强, 等. 外源植物生长素对鳗草植株促生长作用的研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2016, 46(11): 99–107.
- [86] ZARRANZ M E, GONZÁLEZ-HENRÍQUEZ N, GARCÍA-JIMÉNEZ P, et al. Restoration of *Cymodocea nodosa* (Uchria) Ascherson seagrass meadows through seed propagation: seed storage and influences of plant hormones and mineral nutrients on seedling growth in vitro[J]. Botanica Marina, 2010, 53(5): 439–448.
- [87] GOODMAN J L, MOORE K A, DENNISON W C. Photosynthetic responses of Eelgrass (*Zostera marina* L.) to light and sediment sulfide in a shallow barrier island lagoon[J]. Aquatic Botany, 1995, 50(1): 37–47.
- [88] STACY Z Y, Gittman R K, Donaher S, et al. Inclusion of intra and interspecific facilitation expands the theoretical framework for seagrass restoration[J]. Frontiers in Marine Science, 2021(8): 64–73.

(本文编辑: 袁泽轶)