

海洋生态系统修复研究进展

王丽荣, 于红兵, 李翠田, 孙 妮

(中国科学院南海海洋研究所海洋环境工程中心, 广东 广州 510301)

摘要:海洋生态系统是最具价值的人类资源之一,为沿海更多人们所依赖,尤其是具有极高生物多样性和生产力、为海洋生物提供产卵和养育的场所、保护海岸以防受到海浪和飓风侵蚀的红树林生态系统、珊瑚礁生态系统和海草床生态系统。但由于近年来经济的发展和人类活动的影响,这些生态系统都遭受到不同程度的退化,因此海洋生态系统的修复非常必要。回顾了红树林、珊瑚礁和海草床这3种典型且脆弱海洋生态系统的特点,生态修复的研究内容、方法及存在的问题,并在此基础上提出三者可通用的且更为系统的海洋生态系统修复模式和措施,未来能将三者的修复进行综合考虑,以为其他类似的海洋生态系统的修复提供借鉴。

关键词:海洋生物学; 海洋生态系统; 生态修复; 红树林; 珊瑚礁; 海草床

DOI:10.3969/J. ISSN. 2095-4972. 2018. 03. 017

中图分类号:P735

文献标识码:A

文章编号:2095-4972(2018)03-0435-12

海洋生态系统是最具价值的人类资源之一,为人类和其他物种提供多样的服务^[1]。其中和人们关系密切的海洋生态系统主要分布在沿海区,包括河口生态系统、沿岸和内湾生态系统等。作为海洋生态系统典型的却非常敏感脆弱的3个生态系统,红树林生态系统、珊瑚礁生态系统和海草床生态系统,它们具有相似的却非常高的服务价值,如极高的生物多样性和生产力、为海洋生物提供产卵和养育的场所、保护海岸以防受到海浪和飓风侵蚀等^[2]。因为能直接为当地居民提供主要的食物来源以及建筑材料,这些海洋生态系统深为当地居民所依赖。以前由于受当时人口数量、生活水平以及生产力发展水平的限制,人们对海洋生态系统的索取是有限和适度的,并没有对其造成过度的损害。但是,近半个世纪以来,随着经济的飞速发展和人口的快速增长,城市化和城市建设带来的对海洋生态系统的直接围垦和占用、不合理的旅游休闲活动、对海洋资源的过度开发利用、未经处理的污染物排放入海以及极端气候天气增多等诸多因素导致了世界范围的海洋生态系统都发生不同程度的退化,尤其是在人口稠密的沿海地区和经济增长迅猛的发展中国家情况更为严重。目前来讲,全球至少35%的红树林、30%的珊瑚

礁和29%的海草床已消失或退化^[3]。中国情况同样严重,1956年我国约有红树林40 000~42 000 hm²,由于20世纪70、80年代的围海造田和围垦养殖,1986年锐减为21 283 hm²,到90年代初仅剩15 122 hm²^[4-6]。自1950年,我国珊瑚礁面积减少了80%^[7],其中,海南三亚鹿回头岸礁覆盖率从1960年的80%~90%下降为2009年的12%^[8]。海草床生态系统的衰退也很严重,但由于缺乏连续的监测数据,无法准确推测出我国海草床退化的面积和速度,但一些区域的海草床的退化还是很明显,如广西北海市合浦英罗港附近的海草床,面积由1994年的267 hm²减少到2001年的0.1 hm²,面临完全消失的危险^[9]。

随着海洋生态系统的不断退化,各国政府、科学家、海洋组织和公益团体等开始更多关注海洋生态系统的保护、修复和可持续利用^[10-11],其中,生态修复已被更多的运用到海洋生态系统的保护中^[12]。我国自21世纪初以来,各级政府部门和科研机构加强对红树林、珊瑚礁和海草床生态系统的保护研究,通过对破坏行为的有效管理和多项人工移植技术的引用,一些地区的海洋生态系统的退化趋势得到了基本的遏制^[13]。2013年我国红树林的面积为24 578

收稿日期:2017-09-30

基金项目:国家重大科学研究计划资助项目(2013CB956102);国家自然科学基金资助项目(41776128)

作者简介:王丽荣(1972—),女,博士;E-mail:lrwang@scsio.ac.cn

通讯作者:于红兵(1964—),男,研究员;E-mail:HBVU@scsio.ac.cn

hm²^[14],比 20 世纪 90 年代初增长了 62.5%;珊瑚礁受损的情况有所好转,一些区域的珊瑚礁覆盖率也有所上升,例如,海南万宁大洲岛活珊瑚覆盖率从 2007 年的 19.34%^[15] 上升到目前的 28.5%^[16],而海南三亚蜈支洲部分海域活造礁石珊瑚礁覆盖率达 80%^[17].海草床的恢复工作也在积极开展中,在广西合浦儒艮国家级自然保护区约 32hm² 的生境保护恢复喜盐藻,3 个月后恢复区的海草覆盖度由 1% 提高到 2%^[18].

红树林、珊瑚礁和海草床这 3 类海洋生态系统的生态恢复已有较多研究成果,但均是作为单独、不同的海洋生态系统分别进行的研究,事实上,红树林、珊瑚礁和海草床通常地理位置上相邻,三者紧密、动态的联结在一起,其相互关系十分复杂,如物种迁徙、营养循环以及广泛环境的物理影响等^[19].因此本研究试图从这些研究中分析、寻找这 3 类典型海洋生态系统的一些共性,即生态系统的生长、分布、环境条件、功能服务、所受影响、生态修复和保护的研究内容等方面具有一定的共同点,这将为我们综合研究这 3 类海洋生态系统的修复提供新的思路,并希望在此基础上提出更具操作性和更为有效

的海洋生态修复措施.

1 3 类海洋生态系统的特点

红树林、珊瑚礁和海草床这 3 类海洋生态系统分布在沿海,和人类生存息息相关(表 1).红树林生长在热带亚热带隐蔽海岸的潮间带,由于处于海陆交界的敏感区域,易受自然和人为活动的干扰.由于其较高的初级生产力,红树林栖息和繁育了很多重要的经济动物,并且能通过自身的净化作用有效处理多种污水^[20];珊瑚礁多位于大陆架和岛架上,在全世界约 110 个国家的热带、亚热带海岸沿线有分布.珊瑚礁与周围海水物质交换活跃,并频繁受到海水或陆源物质的影响,尽管珊瑚礁生态系统具有极高的初级生产力和生物多样性,但它仍是个较脆弱的生态系统,容易受外界环境的影响而导致衰退甚至消亡^[21];海草床通常位于浅海和河口水域,生产力高,对海岸带区域有重要作用,并为海洋生物提供重要的食物来源和栖息环境,而且参与到全球的碳、氮和磷循环.然而海草床也属于较为脆弱的海洋生态系统,对外界条件的要求较高^[22-23].

表 1 红树林、珊瑚礁和海草床生态系统的特点
Tab.1 Characteristics of mangrove ecosystem, coral reef ecosystem and seagrass bed ecosystem

项目		生态系统特点		
		红树林	珊瑚礁	海草床
生长范围		分布于热带和亚热带海域潮间带,某些耐寒树种可以延伸到暖温带。多在港湾、河口、海岸沙坝或岛屿的背风侧、珊瑚礁坪后部、潟湖以及与优势风向平行的岸线等地生长	暖水珊瑚主要集中在热带、高光照、低营养、清澈的水下 50 m 以上的浅水海域;冷水珊瑚生长在海面以下 30 ~ 1 000 m 的水域	分布在温带和热带海岸浅海或滨海河口区,多数在 20 m 以浅海域,最大分布深度为水下 90 m
分布地区		海南、广西、广东、福建、台湾、香港、澳门(浙江为人工引种)	海南、广东、广西、香港、台湾	广东、广西、海南、福建、香港、台湾、山东、河北、天津、辽宁
环境条件	温度	最低月平均气温不低于 12℃(引种到浙江的秋茄(<i>Kandelia candel</i>)能适应最低月均温小于 11℃)	暖水珊瑚的生长温度为 18 ~ 30℃,最适宜温度为 23 ~ 27℃;冷水珊瑚的生长温度为 3 ~ 14℃	海草对温度的适应范围是很大的,低至零下,但在 25 ~ 30℃ 时显示最大饱和光强的光合作用
	盐度	可在相当大盐度范围内生长(0 ~ 90)	造礁珊瑚正常生长的海水盐度为 27 ~ 40,34 ~ 37 左右最适宜造礁珊瑚的生存	盐度范围较广,但海草生长最适合的海水盐度在 30 左右
潮汐		主要分布在平均海平面以上与正规半日潮型的大潮平均高潮位之间的潮滩面	回归潮平均低潮位以上无珊瑚生长	潮汐通过改变温度、光照、水动力而对海草的生产力产生影响
波浪		海岸波能指数 $W < 7.0 \times 10^3$ 适宜红树林生长	适宜的波浪驱动水体加速可促进珊瑚生长,但波浪作用强烈和较弱处少有珊瑚	波浪影响海草叶片所能接收到的光照度和底质沉积物的组成,最终影响海草床的生产力

续表 1

项目		生态系统特点		
		红树林	珊瑚礁	海草床
功能服务	供给服务	提供木材和薪材;为许多海生和陆生生物提供栖息地	提供渔业、水族贸易、药用原材料、栖息地等	为海水养殖和家畜养殖提供饲料;加工为编织、隔音及保温材料;提炼药物等;提供栖息地
	调节服务	抗风消浪、造陆护堤	对海岸带的物理保护、形成珊瑚砂、促进红树林和海草床的生长	护堤减灾功能
	支持性服务	固定二氧化碳和释放氧气;降解污染物:过滤陆地径流和内陆带来的有机物质和污染物,包括吸收重金属和营养盐;防治病虫害	碳循环、氮固定、废物同化	促进大气中的二氧化碳向海水扩散;净化水质,即可以调节水体中的悬浮物、溶解氧、叶绿素、重金属和营养盐
	社会和文化	科学研究、文化教育、旅游、社区服务和环境监测等	休闲旅游、科学教育和文化认同	科学研究和文化教育
所受影响	人类活动	砍伐满足木材和薪材需求;毁林建设养殖塘;围垦造陆;生活污水及工业废水排放造成的水污染	沿海城市建设对珊瑚礁的掩埋;采挖珊瑚礁用于建筑材料;海水养殖;挖螺;生活和生产污水造成的水质变差;移除的石油或用于清洗的清洗剂;发电厂的热流;过度捕捞珊瑚的天敌;旅游活动	海岸地区的城镇化使开垦土地、港口建设等活动增多,使海水浊度增加;拖网挖螺;捕鱼业和海水养殖使海草生长率降低;船舶、水下电缆和管道会遮蔽海草,影响光照;生产废水和生活污水增加海水的浑浊度和营养物质富集
	自然压力	全球气候变暖可造成红树林种类组成的变化;海平面升高超过红树林底质的沉积速率时,红树林受到胁迫;降水方式的变化引起土壤或水的盐度改变而对红树林产生影响	火山爆发;风暴潮;重要的厄尔尼诺事件;天敌海星种群的爆发	海底火山喷发、地震、风暴潮和超大风浪会破坏海草床;海平面上升降低海底可利用光;全球气候变暖影响海草的新陈代谢;大气中二氧化碳提高引起海草生物量的增加;生物入侵等

注:表中内容据文献[24-30]整理

2 海洋生态系统修复概念

海洋生态系统修复是指协助受损的生态系统进行恢复的过程,即利用其自身的修复能力,并配以必要的人工辅助措施,使衰退的海洋生态系统恢复到原来或与接近原来状态的结构和功能. 即通过减少环境压力、重新引进目标种、移除侵入种或重建人工生境,让海洋生态系统得以重建^[31].

从海洋生态系统修复的内容来讲,可以分为生境修复和生物修复. 生境修复是指采取水文修复、沉积学修复和化学修复等有效措施,对受损的生境进行恢复与重建,使退化状态得到遏制并改善;生物修复是通过采取自然或人工措施恢复和重建受损的一种或多种生物^[32-33].

从海洋生态系统修复的方法上可将其分为主动修复、被动修复和创建^[34]. 主动修复需要人们通过控制和干预来修复、再建或促进群落结构和海洋生态系统过程,如重新塑造自然形态、通过水控制设施

来重塑水流通道、土壤移植和人工移植植被等. 被动修复方法是指减少导致海洋生态系统退化或损害的影响因子,使受损生态系统在自然条件下修复到一个健康的状态^[35],如重点在加强生态水文过程来重建海洋生态系统自我修复的水文地貌^[36]. 创建指的是在某地建造一个之前从未出现的海洋生态系统的过程.

从海洋生态系统修复中人工措施的实施程度上,可将其分为自然生态修复、人工促进生态修复和生态重建. 自然生态修复是指采取相应的措施减少和消除人为和环境压力,遏制海洋生态系统的退化,使其得以自然恢复. 人工促进生态修复是指通过判断生态系统自我修复能力的水平,来选择实施必要的物理、化学、生物等人工干扰措施,以使海洋生态系统得以恢复. 而当海洋生态系统受损严重至完全退化甚至丧失时,则采用必要措施重新建立生态系统,这个过程被称为生态重建. 生态重建还包括在一些没有某些生态系统的区域建立新的生态系统^[37].

因此,海洋生态系统修复是受损海洋生态系统修复和提高的过程,通过多种措施的系统修复,受损海洋生态系统的群落组成及其结构由简单恢复到复杂、生态功能则由单一功能恢复到多功能.海洋生态系统修复的目的不是仅对某个受损物种的简单恢复,而是整合资源,从海洋生态系统的结构、功能、生物多样性和持续性以及与邻近海洋生态系统的共通性等多方面进行有效的修复.海洋生态系统修复过程注重生态系统的自然调节、恢复和演化,尽量降低人工干扰程度,使受损海洋生态系统得以最大程度的恢复.

3 海洋生态系统修复研究概况

3.1 国外海洋生态系统修复研究

海洋生态系统修复的研究起步较晚,但也开展了大量的修复工作与实践.目前海洋生态系统修复研究涉及的类型不断增多,修复的内容也更加丰富.生态修复研究更注重大尺度的生态修复,如加利福尼亚 South 湾、佛罗里达湿地、Louisiana 滨海湿地等修复项目,这些项目涉及领域更广,对目标设定、修复技术、监测评估等方面等整个修复过程进行系统研究^[37].此外,对海洋生态修复的方法研究也更为丰富,Michael 等(2016)注重生态水文学在受损河口修复生态工程中的作用,描述了在欧洲、澳洲、亚洲、南非和北美等地的生态工程修复项目中生态水文学原理的应用^[38],Richard 等(2011)根据新西兰 Poor Knights 岛海洋保护区当地居民的生态经验建立海洋生态修复的基准等^[39].

3.1.1 红树林生态系统修复研究 红树林的种植、管理和维持其可持续产量的采伐早在 19 世纪的马来西亚、菲律宾和越南就开展了.但近年来随着受损红树林的增多和红树林面积的衰减,红树林生态修复才受到关注.之后,红树林的修复逐渐被认定是红树林保护的一个潜在工具^[40],而修复研究工作也更为细致.Roy 等(2005)回顾了生态工程在红树林管理和修复中的作用,指出评价现有的红树林生态系统的水文状态的重要性,并以此作为保护现有红树林并进行有效生态修复的基础^[41].Callaway(2001)列出了 7 个步骤来对加利福尼亚红树林的水文和地貌进行修复^[42].Lewis(2006)介绍了红树林生态系统修复成功的关键^[41].Mahardhika 等(2015)对 West java 的 Sedari village 的红树林生态修复工程的监测、评价和规划做了研究,并建议每月对幼苗进行一次监测,并以此评估和规划种植新的幼苗^[43].Chu 等(2015)研究利用乔木篱笆作为软工程对越南

Kien Giang 的红树林进行生态修复^[44].Nguyen 等(2016)和 Arturo 等(2017)从社区认识、居民参与、环境教育等角度来监测红树林的修复状况^[45-46].Jonathan(2017)研究了大型底栖生物群落的生态功能对红树林修复的意义^[47].相比于珊瑚礁和海草床生态系统,红树林的野外研究工作更容易进行,因而对红树林生态系统修复研究开展的最早,研究的时间最久,成果也更多.

①红树林修复的目的,红树林生态系统的修复不仅是种植或重建红树使达到一个看上去满意的成活率,而应是受损红树林生态结构和功能的修复,即红树林生态修复应达到积极促进自然结构和功能的恢复,并保持可持续的目标.这为生态修复工作的具体开展设定了框架,如:备选地的生态环境是否能维持红树林的生长?种植的红树林的种类是否多样?栖息于红树林的食物链和食物网的建立是否可持续等等.同样,这也为生态修复的监测和评价因子的确定定好了方向.

②水文条件,设计一个成功的红树林修复项目最为重要的就是确定现存自然的红树林植物群落(即参照地点)的正常的水文状态,包括水深、潮水淹没的时间和频率.由于每个红树种都有适合自己的不同的底质高度,因此涉及底质的斜坡、地形和沉积物性质格外重要,潮位、淹没区、淡水的可达性、暴露在强浪和强流的程度等决定了种植的红树林幼苗是否能够抵御外界环境的干扰^[48].潮汐淹没带来的流、浪和沉积物输送对控制红树林幼苗的定居有关键作用,因而模拟自然的弯曲的潮汐通道的重建对于一个成功的生态修复项目也是非常重要的.

③生态工程,红树林生态系统修复多需要采取生态工程的措施,而生态工程是运用生态水文学原理来改变和达到红树林生态系统修复的目标,是生态、经济和人类安全的“三赢”的保障,在具体的修复项目中,水文模型、生态和工程要三者结合^[49].生态工程从设计上包括 2 种类型:一是设计自然的状态来产生特定需求的生态位,其反过来会促进生态和生境的发展,促使红树林幼苗的定居;二是移植红树林幼苗,反过来创造生境,或让物种来改变生境,从而加强物理和生物的联系.通常我们更重视前者.

生态工程从措施上包括“硬工程”和“软工程”2 个方面来,前者包括永久的物理工程,如混凝土的防波堤;而后者则利用暂时的设施,如用竹子保护红树林幼苗或用篱笆促进防浪堤后淤泥沉积等^[50].

④红树林移植,红树林移植方法通常有胚轴插值、直接移植、无性繁殖和人工育苗(即红树林园

艺)等,而它们对应的材料主要来自3个方面:从野生红树林收集繁殖体,而这些繁殖体多为成熟且易从母体树上掉落的;从野生红树林收集幼苗并在育苗场生产1 a;将0.5~1.0 m的红树林直接移植。而在移植过程中注重间苗或是剪枝的方法对于红树林的成功种植也很重要。

红树林是否需要移植需要分别对待,即前提是自然的幼苗补充是否发生,因此会相应的有3种措施:虽有部分受损但水文条件好的红树林,或全部受损但临近有红树林且水文条件好的地方,不需要进行人工移植;水文条件好,但红树林全部受损且近处没有红树林的地区,需要人工移植;水文条件一般的地方,需要人工移植。

⑤监测评估,红树林监测内容很多,包括幼苗的密度、覆盖率、幼苗的存活或死亡、树木的高度和直径、种类组成等参数,新的红树林生态系统的动物、植物的结构组成,以及修复区与未受干扰的红树林生态系统的生物或非生物的特点,如土壤pH值水平、有机物容量、水分含量等的对比^[51]。通常每个月进行一次监测,而监测结果每半年进行评估,这样可以及时提出反馈,为修复项目的下一步工作提供参考。

⑥社区参与的管理,这里指当地社区居民和政府机构、科学家以及其他红树林利益相关者一同参与到红树林生态修复中来,对多年来该区红树林的变化情况进行了解,对红树林生态修复区的选址、修复所需采取的树种等一系列工作提供建议,并积极参与修复的监测和评估工作。

3.1.2 珊瑚礁生态系统修复研究 珊瑚礁生态系统修复研究主要集中在生境修复、生物修复和监测评估等几个方面。Edwards等(2007)回顾了以往的研究工作^[32],从物理修复、生物修复、修复成本等方面总结了珊瑚礁生态修复的概念、技术和指导原则,并给出了5个有代表性的生态修复工程的案例,如French Polynesia的Bora Bora采砂作业导致珊瑚礁受损的生态修复和珊瑚园艺的创建、La Reunion Island的Saint Leu受热带气旋影响的岸礁修复、Mayotte的Longoni harbour珊瑚移植、Fiji受白化事件影响的珊瑚礁的修复以及New Caledonia的Gorao Nickel Harbour珊瑚移植,分析了生态修复目标、方法、监测调查、成本、吸取的教训等,为其他项目的开展提供借鉴。Meaghan等(2011)通过珊瑚园艺方法对加勒比鹿角珊瑚(*Acropora*)进行生态修复^[52],Baruch(2015)在珊瑚园艺概念的基础上提出可交易的生态修复方法^[53],Nami等(2015)提出了利用生

态旅游来进行珊瑚移植促进珊瑚礁的生态修复^[54]。相对于红树林和海草床生态系统,由于水下工作的限制条件多,珊瑚礁生态系统修复费用最高。

①生境修复,生境修复包括2部分的内容:一是减少外界压力,使珊瑚礁生态系统能处于自然的恢复状态,如减少过度捕捞、减少工程带来的泥沙、减少休闲旅游者的对珊瑚的直接破坏、减少长棘海星(*Acanthaster planci*)等捕食珊瑚虫的天敌、减少覆盖珊瑚礁的藻类等等^[55];

二是建造人工礁体,人工礁是通过建立一个稳定、抵抗风浪、提供庇护所的岩体结构,促使珊瑚幼体的附着、生长和繁殖^[56]。一般使用天然礁岩、混凝土块和陶瓷块并按照特定的设计来建造人工礁体,这又包括2个方面,一是受损部分的珊瑚礁体的修复,一个是在珊瑚礁区或珊瑚礁附近的地方重建新的人工礁体。

②生物修复,生物修复包括珊瑚移植和珊瑚园艺养殖两个方面。珊瑚移植,就是把珊瑚或其部分通过移植到受损区域,优化退化区的物种组成和结构。如,将整个珊瑚、珊瑚片或珊瑚幼虫移植到相应的退化区域^[57-58],这包括有性繁殖和无性繁殖。

珊瑚园艺养殖,是指在特定的海区对珊瑚断片或幼虫进行培养,待珊瑚生长到一定的大小时,再将其移植到退化的珊瑚礁区^[59],虽然提出的时间不久,但也在加勒比海、红海、新加坡、菲律宾、日本等都开展了珊瑚园艺养殖的生态修复^[60]。

③监测评估,对珊瑚礁生态系统修复的系统监测很重要,可以使人们从过去的好的或错误实践中学到更多,否则既无法评估修复是否成功或有效,也不能采取所需的管理措施。通常每隔2~4周对活珊瑚覆盖面积以及生物多样性的变化进行监测,为下一步生态修复提供建议,另外对环境的监测也同样重要,这样的监测活动将一直持续下去^[61-62]。

3.1.3 海草床生态系统修复研究 海草床生态系统修复的目的是提高海草的覆盖度、增加海草床面积以及恢复栖息于海草床物种多样性等,通常采用2种方式,一是改造受损的海草床生态系统使其恢复到原有的结构和功能状态;二是建造新的海草床^[18,63]。海草床的生态修复是一个复杂的过程,受光照、水温、盐度和底质等因素的影响。自上世纪40年代,就有海草床修复的活动^[64],但直到20世纪末,海草床的生态修复研究和实践工作才开始系统展开^[65],其中美国学者对大叶藻(*Zostera marina*)海草床的生态修复研究较多^[66]。大尺度修复成功的例子也有,如在佛罗里达Biscayne湾,在59.6 hm²的种

植面积中有 48.0 hm² 存活并迅速蔓延,动物的快速定居也有发现^[67]. 由于一些海草种类对某些特定类型的污染显示忍耐,因此可以在修复项目中作为“先锋物种”进行补充. 海草床移植的优点是不用担心会对获取植物的母体有长期的损害. 在菲律宾西北的 Bolinao,所有受损前存在的物种在 2a 内都重新定居回到修复区^[68]. 海草床生态系统修复包括海草床修复区的选择、生境修复和移植修复.

①海草床修复区选择,海草床修复区的选择要满足 4 个条件:该区域历史上是否有海草床;该地的水深是否和附近自然海草床的相似;是否受人类影响而退化;该人类影响是否能够去除^[69]. 通常,这些区域的自然条件是浅水、地势有缓坡和庇护区.

②生境修复,由于海草床受污染造成的损害所占比例较大,因而减少富营养化和改变水文是修复海草生境的关键. 另外,水质、流速、浪、暴露在空气中、沉积物特性以及铵盐负载量等因素是海草修复成功必须关注的因子,同时还要注意海草光需求的空间变化^[70-71].

③移植修复,这包括 2 个方面:一是种植种子来修复海草床,这种方法的优点是会影响受损海草种群的遗传多样性,而且修复成本较低. 但缺点是海草种子的采集、处理和保存不易,成苗率较低. 其中面临的最大问题是种子的成苗率太低,一般在 10% 以下^[72].

二是移栽人工栽培的海草幼苗进行海草床修复. Tanner 等(2010)做了试验,以试图比较移植园艺场培育的海草幼苗与移植自然条件下生长的幼苗的成活率,发现人工培养的 26 000 余株海草幼苗在生长上具有一定优势,成活率和株高都明显高于自然环境下生长的植株^[73].

3.2 国内海洋生态系统修复研究

中国的海洋生态系统修复工作开始于 20 世纪 50 年代,主要集中在近海海岸上,有研究把中国海洋生态修复的历程分为 3 个阶段^[74]:第一阶段是 1980 年前,这一时期的海洋生态系统修复工作较为简单,为小区域的红树林种植项目;第二阶段是 80 年代初到 90 年代末这个时期,主要是一些红树林项目和海水水体修复项目;第三阶段是从本世纪开始的,这一时期海洋生态修复涉及的范围更广,包括红树林、珊瑚礁、海草床、沙质海滩等,涉及的区域也更大,研究的内容也更丰富,如 Li 等(2014)以海州湾国家海洋公园为例提出了生态修复分区的方法^[75]. 目前,红树林生态系统开展的时间最长,范围也最

广,生态修复的研究成果较多. 珊瑚礁生态系统的修复工作主要在海南三亚和永兴岛、广东徐闻和大亚湾有开展,而海草床的生态修复主要在广西和山东半岛有开展.

3.2.1 红树林生态系统修复研究 我国红树林的修复工作始于 20 世纪 50、60 年代,如福建省同安县 1961 年曾种植造红树林 824 hm²,但是 5a 后只有 31.2% 成活下来;浙江省温州在 1958 ~ 1966 年期间曾引种红树林 533 hm²,最终成活率仅为 1.6%^[76]. 我国已先后建立了 36 个国家级省级县级红树林保护区,主要分布在福建、广东、广西和海南省,并在大部分红树林保护区开展了生态修复工作,红树林种植的成活率为 57%^[77]. 目前,我国红树林生态修复的研究侧重种植技术,对宜林地的选择、树种的选择与引种以及栽培技术的研究较多^[78]. 但对红树林修复过程中生态结构和功能恢复的研究较少,如红树植物的物种多样性、种群间的竞争、生物之间的动态变化以及生态系统之间的能量流动和污染物累积方面的研究不足^[6],对红树林修复效果做定量评价的研究也刚起步^[79].

3.2.2 珊瑚礁生态系统修复研究 我国对珊瑚礁生态系统修复的重视比较晚,珊瑚礁保护区的建立也是始于上个世纪末和本世纪初,建有海南三亚和广东徐闻珊瑚礁国家级自然保护区、福建东山珊瑚礁海洋自然保护区和广西涠洲岛珊瑚礁国家级海洋公园. 最早的珊瑚礁生态修复的实验是陈刚等(1995)在三亚进行的造礁石珊瑚的移植^[80],之后自 2003 年起在广东大亚湾进行了 4 次大规模的珊瑚礁移植工作,2011 年在西沙赵述岛海域投放人工礁基并开展珊瑚移植实验^[81],目前,在三亚、西沙和南沙的修复实验工作也在展开,主要的修复方法是移植、珊瑚幼虫补充和人工礁建造.

3.2.3 海草床生态系统修复研究 海草床在我国沿海有分布,海草床的移植始于 1989 年,即通过移植大叶藻到养殖塘来净化水质进而提高水产品产量. 但直到近几年才开始更多的海草床修复研究,修复面积不到 30 hm². 第一个海草床修复项目是 2007 年在山东威海,移植 10 000 株大叶藻来修复 3.4 hm² 的海草床^[75],之后海草移植修复项目在山东、广东、广西和海南均有开展.

虽然我国海洋生态系统修复工作已开展近 70a,开展的修复项目也逐年增多,但由于对修复项目的系统监测很少,而且修复需要的时间尺度可能是几十年,所以从长的时间范围来讲我们并不清楚所做的修复工作是否成功^[82].

4 海洋生态系统修复存在的问题及展望

4.1 海洋生态系统修复存在的问题

尽管海洋生态系统修复工作涉及的类型越来越多,内容也越来越丰富,但世界范围内的海洋生态系统退化并没有得到根本的遏制,这除了因为人类活动带来的压力不能彻底根除,还由于海洋生态系统修复的成功率不高,这又存在以下几方面的问题:

(1)对海洋生态系统功能的了解不足,对一些重要的科学问题,如海洋生态系统退化的原因、指标系统和诊断、动态模型和预测、成功的标准和模型等不够了解。

(2)海洋生态系统修复多以人工修复为主,生态系统自我修复不足;或是以生态系统结构修复为主,生态系统功能的修复不足。

(3)多数的生态修复工程关注生物的修复,缺乏受损生态系统机制和生态水文过程的系统研究,特别是对大尺度的水文和生物相关性研究较少。

(4)生态修复研究大多停留在小范围、局部区域的特定生物群落或物种的修复,缺乏大尺度的、系统的生态修复研究。红树林、珊瑚礁和海草床多是单独的修复,三者之间的协同修复研究还较少。

(5)生态修复的监测、评估和管理等方面的研究相对较少,缺乏系统的评价指标,缺乏多尺度的、长期的监测和评价来连续的监测受损生态系统。另外,对生态修复的管理做的较少,很多修复项目做完就没有任何后续的管理,因而这些修复的效果也多是不佳的。

此外,生态修复地点和参照生态系统的选取不合适、选取了适合其他类型或其他区域生态系统却不适合本区域的修复技术或方法也会导致修复工作的失败。

4.2 海洋生态系统修复过程

海洋生态系统修复工作是个复杂的工作,根据分析红树林、珊瑚礁和海草床生态系统的修复研究工作,本研究提出了具有共性的和一定可操作性的生态修复过程。

(1)海洋生态修复目标和修复规划的确定,修复目标的确定很重要,生态修复的最终目标是使受损生态系统恢复到拥有自我组织、自我维持,并能面对外界干扰做到自我调节的自然生态系统,但如果短期目标就是把一个受损地区恢复到原始的未开发的状态或拥有自然的结构和功能,那么失败的可能性很大,因而需要做好生态修复规划,分期安排好需要达到的目标,即某个阶段只是修复生态系统某些

特点、修复某些自然功能、达到某些服务价值,那么成功机会就会大很多。当然由于一个受损的海洋生态系统修复的时间较长,因此,这样的修复目标和长期规划的设定是动态的,需要根据修复进行状况随时调整。通常这样的生态修复规划要涉及国家、地方和社区3个层面上来做。

(2)修复地点的选择,生态修复地点的选择对于修复能否成功非常重要,这又包括几个方面:外在压力、参照生态系统和水文条件的选择。

一是外来压力的评估,即欲修复地点历史上是否有过此类海洋生态系统?该处是否和附近未受干扰的生态系统有相似的环境条件?受损生态系统的退化原因是什么,是自然因素还是人为因素?是否还有潜在的压力存在?这些因素带来的压力是否可以消除?因为只有外在的压力消除,受损生态系统的自然修复才可以进行,受损群落的次级演替才可能发生。

二是选择适合的同类型的参照海洋生态系统,选择附近未受干扰的自然生态系统,调查其地形、水文和盐度等环境因素,以及生物种类、组成和多样性等生物指标,这将为修复地点的生态修复提供参照。

三是水文条件是否满足,如果受损地区已经建设了不可拆除或更改的基础设施,该处的水文条件已经不可能通过修复达到允许生态系统修复自然发生的状态,那么此处是不适宜作为修复点。如果水文条件目前虽然达不到,但通过生态水文修复到正常状态,那么可以选择作为修复点。

这种修复地点的选择也可以理解在整个地区生态修复工作中,先选择其中一部分最为合适的地点作为修复的试点。

修复地点的选择非常重要,例如一些红树林修复工程没有考虑受损红树林为什么没有发生自然恢复就立即开始种植红树林,即在压力因素评估前就开始投入种植红树林幼苗或试图在之前没有生长过红树林的地区种植红树林,这就容易导致生态修复项目的失败。

(3)海洋生态修复措施的选择,海洋生态修复注重的是自然修复,只有在自然修复很难达到或较慢达到时,才会选用辅助的生态修复措施,即水文修复和生物修复2个方面:

水文修复:由于水文控制着目标生物(如红树植物、珊瑚或是海草)的分布、成功定居和生长,因此首先要明确修复地点的水文模式;其次要对应所选作参照的典型海洋生态系统,相应地来对地形、基底或坡度以及潮汐通道等进行修复,使其恢复到接

近自然的状态,如阻碍或限制水动力的堤坝或围堰的拆除、人工直线水道的弯曲处理等。

生物修复:进行生物修复前要了解修复地点的目标生物种类的个体生态学,尤其是繁殖、繁殖体分布和幼苗定居,这对于开展生物移植很关键,生物修复同样需要考虑物种的选择。

当然,水文修复和生物修复如何进行、何时进行也是有条件的。通常,在一个生态修复项目中,水文修复和生物修复并不是都必须进行,如果该修复地点通过外部压力的消除就可以进行水文和生物的自然恢复,即自然的幼体可以进来补充,或是次级演替可以发生,那么水文修复和生物修复都可以不用进行;如果修复地点通过进行水文修复能够吸引自然繁殖体或幼虫、幼苗来定居,且可以持续地恢复到自然的群落组成,那么生物修复可以不进行;如果在水文修复后,在自然补充仍然满足不了成功定居的幼苗或幼虫的数量、稳定率、生长率或覆盖率的目标前提下,才可以考虑移植,即利用实际的繁殖体、收集的幼体或培育的幼体帮助自然恢复;而对于重建一个新的生态系统,水文修复和生物修复一般都需要进行。

(4)监测、评价与反馈,对修复地点进行连续的监测可以为管理者和决策者提供有价值的信息以对受损生态系统的修复状态进行诊断和评估。当然,这个监测包含了整个修复过程,包括修复开始前、修复中以及修复结束。除了传统的监测方法,可利用遥感、地理信息系统和全球定位系统等动态监测技术为海洋生态修复评价提供新的技术支持^[83]。

设定合适的评价指标对于判别生态修复是否成功非常重要。评价指标包括生态方面、经济方面和社会方面。生态方面的指标从3个尺度来看,即群落、生态系统和景观,具体指标包括环境和生物因子;经济指标是指从修复的海洋生态系统带来的服务价值是否为当地人带来经济收益;而社会指标则是指由此带来的当地归属感和社会满意度等。

反馈则是在现有修复工作的监测和评估基础上,决定下一步修复工作如何开展的重要环节。

(5)海洋生态修复管理,海洋生态修复管理的目的是要达到生态、经济和社会的“三赢”状态。现在比较普遍的是以下3种管理方式,而三者又是相通的:

基于生态系统的管理是海洋生态修复管理的主流,这种管理方式是针对资源环境的管理,具有先进的管理理念,其目的是为了维护海洋生态系统的持

续健康和发展,强调从海洋生态系统整体出发,多学科参与,多部门合作,以实现海洋资源开发与生态保护的协调发展。

基于社区的生态管理概念则是重视社区公众的参与,联合了政府和社会、科学和决策者、公共的和私人利益相关者来参与到生态修复的设计、实施、监测、评估和保证法律支持的全面管理中来,它是一个动态的、连续的、重复的过程。

适应性管理是海洋生态修复中另一种常见的管理模式,广泛应用于海洋生境修复和生物资源养护实践中,其管理目标是解决海洋生态修复过程中出现的一些无法预测或不确定发生的事件。该模式包括实施备选的修复计划、对受损生态系统中的部分区域实施实验研究、对受损系统和参考系统的对比研究以及对整个海洋生态系统修复的有效性进行评估等^[30]。

4.3 展望

红树林、珊瑚礁和海草床这3类海洋生态系统的分布区域既接近而又相互独立,其独具特色的生态位和环境特征使他们在功能上又相互依存,因此生态修复的内容和措施虽有不同,但更多的是相似。由于这3类海洋生态系统所处的海陆交界带属于生态脆弱带或生态敏感带,它们对人类活动产生的影响快速响应,表现为显著的时空波动,因此这又为它们的生态修复工作带来更大的难度,修复效果具有更多的波动性。

目前,海洋生态系统修复的工作和研究虽然越来越多,但仍未成熟,很多方面需要更详细的工作,除了涉猎修复生态系统的结构和功能的研究,还应涉及修复生态系统的能量流和物质流的研究等等。而对于红树林、珊瑚礁和海草床这3类相互依存、共生共栖的典型海洋生态系统,在进行修复工作时应将三者作为一个整体来综合考虑,即充分利用它们为各种所栖生物提供栖息地的互补优势和如何促进营养物质在三者之间的流动。同样,这也能够解决不同海洋生态系统得到的关注度不同的问题,如海草床生态系统的修复项目及研究工作是最少的,而红树林生态系统则得到更多的修复工作,因此三者协同修复的工作更能将其做到平衡。

海洋生态系统修复是个耗时的工程,因此需要足够的时间和耐心来看待受损生态系统的生态修复过程。

参考文献:

- [1] GUAN M L, ZHENG T, YOU X Y. Ecological rehabilitation prediction of enhanced key-food-web offshore restoration technique

- by wall roughening[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2016,128:1-9.
- [2] SANDILYAN S,KATHIRESAN K. Mangroves as bioshield: an undisputable fact[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2015, 103:94-96.
- [3] REY BENAYAS J M, NEWTON A C, DIAZ A, et al. Enhancement of biodiversity and ecosystem services by ecological restoration: a meta-analysis[J]. *Science*, 2009, 325(5 944):1 121-1 124.
- [4] 范航清. 红树林海岸环保卫士[M]. 南宁:广西科学技术出版社,2000.
- [5] 郑德璋,李玫,郑松发,等. 中国红树林恢复和发展研究进展[J]. *林业与环境科学*, 2003, 19(1):10-14.
- [6] 彭逸生,周炎武,陈桂珠. 红树林湿地恢复研究进展[J]. *生态学报*, 2008, 28(2):786-797.
- [7] QIU J. Chinese survey reveals widespread coastal pollution: massive declines in coral reefs, mangrove swamps and wetlands [J]. *Nature*, 2012,6:3.
- [8] 余克服. 南海珊瑚礁及其对全新世环境变化的记录与响应[J]. *中国科学(地球科学)*, 2012,42(8):1 160-1 172.
- [9] 郑凤英,邱广龙,范航清,等. 中国海草的多样性、分布及保护[J]. *生物多样性*, 2013, 21(5):517-526.
- [10] DAILY G C. Restoring value to the world's degraded lands[J]. *Science*, 1995, 269(5 222):350-354.
- [11] BAYRAKTAROV E, SAUNDERS M I, ABDULLAH S, et al. The cost and feasibility of marine coastal restoration[J]. *Ecological Applications: a publication of the Ecological Society of America*, 2016, 26(4):1 055.
- [12] WILCOX D A, WHILLANS T H. Techniques for restoration of disturbed coastal wetlands of the Great Lakes[J]. *Wetlands*, 1999, 19(4): 835-857.
- [13] HE Q, BERTNESS M D, BRUNO J F, et al. Economic development and coastal ecosystem change in China[J]. *Scientific Reports*, 2014,4(5 995):1-9.
- [14] 吴培强,张杰,马毅,等. 近 20 年来我国红树林资源变化遥感监测与分析[J]. *海洋科学进展*, 2013,31(3):406-414.
- [15] 吴钟解,李成攀,陈敏,等. 大洲岛国家级自然保护区海洋资源调查及其管理保护机制探讨[J]. *海洋开发与管理*, 2012, 29:97-100.
- [16] 周红英,姚雪梅,黎李,等. 海南岛周边海域造礁石珊瑚的群落结构及其分布[J]. *生物多样性*, 2017,25(10): 1 123-1 130.
- [17] 吴钟解,陈石泉,陈敏,等. 海南岛造礁石珊瑚资源初步调查与分析[J]. *海洋湖沼通报*, 2013(2):44-50.
- [18] 吴瑞,王道儒. 海南省海草床现状和生态系统修复与重建[J]. *海洋开发与管理*, 2013, 30(6):69-72.
- [19] 宋晖,汤坤贤,林河山,等. 红树林、海草床和珊瑚礁三大典型海洋生态系统功能关联性研究及展望[J]. *海洋开发与管理*, 2014, 31(10):88-92.
- [20] 叶勇,翁劲,卢昌义,等. 红树林生物多样性恢复[J]. *生态学报*, 2006, 26(4):1 241-1 250.
- [21] 牛文涛,刘玉新,林荣澄. 珊瑚礁生态系统健康评价方法的研究进展[J]. *海洋学研究*, 2009,27(4):77-85.
- [22] 韩秋影,施平. 海草生态学研究进展[J]. *生态学报*, 2008, 28(11):5 561-5 570.
- [23] 黄小平,黄良民. 中国南海海草研究[M]. 广州:广东经济出版社,2007.
- [24] DEN H C. The seagrasses of the world[M]. Amsterdam:North Holland Publication, 1970:234-275.
- [25] 张乔民,隋淑珍,张叶春,等. 红树林宜林海洋环境指标研究[J]. *生态学报*, 2001, 21(9):1 428-1 438.
- [26] 张乔民,余克服,施祺. 华南珊瑚礁的海岸生物地貌过程[J]. *海洋地质动态*, 2003, 19(11):1-4.
- [27] WAYCOTT M, LONGSTAFF B J, MELLORS J. Seagrass population dynamics and water quality in the Great Barrier Reef region: a review and future research directions[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2005, 51:343-350.
- [28] 李森,范航清,邱广龙,等. 海草生产力研究进展[J]. *海洋环境科学*, 2011, 30(1):143-147.
- [29] 何海军,温家声,张锦炜. 海南红树林湿地生态系统服务价值评估[J]. *生态经济*, 2015,292(4):145-149.
- [30] 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.
- [31] BARBIER E B, KOCH E W, SILLIMAN B R, et al. Coastal ecosystem-based management with nonlinear ecological function sand values[J]. *Science*, 2008, 319 (5 861):321-323.
- [32] EDWARDS A J, GOMEZ E D. Reef restoration concepts & guidelines: making sensible management choices in the face of uncertainty[M]. St Lucia: The Coral Reef Targeted Research & Capacity Building for Management Programme, 2007:1-38.
- [33] 张立斌,杨红生. 海洋生境修复和生物资源养护原理与技术研究进展及展望[J]. *生命科学*, 2012, 24(9): 1 062-1 069.
- [34] SIMENSTAD C, REED D, FORD M. When is restoration not? Incorporating landscape-scale processes to restore self-sustaining ecosystems in coastal wet-land restoration[J]. *Ecological Engineering*, 2006, 26(1):27-39.
- [35] WAGNER K I, GALLAGHER S K, HAYES M, et al. Wetland restoration in the new millennium: do research efforts match

- opportunities? [J]. *Restoration Ecology*, 2010, 16(3):367-372.
- [36] JARZEMSKY R D, BURCHELL M R, EVANS R O. The impact of manipulating surface topography on the hydrologic restoration of a forested coastal wetland[J]. *Ecological Engineering*, 2013, 58(10):35-43.
- [37] 姜欢欢, 温国义, 周艳荣, 等. 我国海洋生态修复现状、存在的问题及展望[J]. *海洋开发与管理*, 2013, 30(1):35-38.
- [38] ELLIOTT M, MANDER L, MAZIK K, et al. Ecoengineering with Ecohydrology: Successes and failures in estuarine restoration [J]. *Estuarine Coastal & Shelf Science*, 2016, 176:12-35.
- [39] TAYLOR R B, MORRISON M A, SHEARS N T. Establishing baselines for recovery in a marine reserve (Poor Knights Islands, New Zealand) using local ecological knowledge[J]. *Biological Conservation*, 2011, 144(12):3 038-3 046.
- [40] KALY U L, JONES G P. Mangrove restoration: a potential tool for coastal management in tropical developing countries[J]. *AMBIO*, 1998, 27(8):656-661.
- [41] LEWIS R R. 5 steps to successful ecological restoration of mangrove[M]. Yogyakarta: Mangrove Action Project, 2006:1-49.
- [42] CALLAWAY J C. Hydrology and substrate[C]// Zedler J B. Handbook for restoring tidal wetlands. Boca Raton: CRC Press, 2001: 89-117.
- [43] NUSANTARA M A, HUTOMO M, PURNAMA H. Evaluation and of mangrove restoration programs in Sedari Village of Kerawang District, West Java: contribution of PHE-ONWJ Coastal Development Programs[J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2015, 23:207-214.
- [44] CHU V C, BROWN S, TO H H, et al. Using Melaleuca fences as soft coastal engineering for mangrove restoration in Kien Giang, Vietnam[J]. *Ecological Engineering*, 2015, 81:256-265.
- [45] NGUYEN T P, TAM N V, LE P Q, et al. Community perspectives on an internationally funded mangrove restoration project: Kien Giang province, Vietnam[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2016, 119:146-154.
- [46] ZALDÍVAR-JIMÉNEZ A, LADRÓN-DE-GUEVARA-PORRAS P, PÉREZ-CEBALLOS R, et al. US-Mexico joint gulf of Mexico large marine ecosystem based assessment and management: Experience in community involvement and mangrove wetland restoration in Términos lagoon, Mexico[J]. *Environmental Development*, 2017, 22:206-213.
- [47] LEUNG J Y, CHEUNG N K. Can mangrove plantation enhance the functional diversity of macrobenthic community in polluted mangroves? [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2017, 116:454-461.
- [48] COSTA P, DÓREA A, MARIANO-NETO E, et al. Are there general spatial patterns of mangrove structure and composition along estuarine salinity gradients in Todos os Santos Bay? [J]. *Estuarine Coastal & Shelf Science*, 2015, 166(2): 83-91.
- [49] FLORES-DE-SANTIAGO F, SERRANO D, FLORES-VERDUGO F, et al. Application of a simple and effective method for mangrove afforestation in semiarid regions combining nonlinear models and constructed platforms[J]. *Ecological Engineering*, 2017, 103: 244-255.
- [50] LEWIS R R. Ecological engineering for successful management and restoration of mangrove forests[J]. *Ecological Engineering*, 2005, 24(4):403-418.
- [51] DAS S. Ecological restoration and livelihood: contribution of planted mangroves as nursery and habitat for artisanal and commercial fishery[J]. *World Development*, 2017, 94:492-502.
- [52] JOHNSON M E, LUSTIC C, BARTELS E, et al. Caribbean *Acropora* restoration guide: best practices for propagation and population enhancement[J]. *Photonics Technology Letters IEEE*, 2011, 13(4):305-307.
- [53] RINKEVICH B. Novel tradable instruments in the conservation of coral reefs, based on the coral gardening concept for reef restoration[J]. *Journal of Environmental Management*, 2015, 162:199-205.
- [54] OKUBO N, ONUMA A. An economic and ecological consideration of commercial coral transplantation to restore the marine ecosystem in Okinawa, Japan[J]. *Ecosystem Services*, 2015, 11:39-44.
- [55] YEEMIN T, SUTTHACHEEP M, PETTONGMA R. Coral reef restoration projects in Thailand[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2006, 49(9):562-575.
- [56] KOTB M M A. Coral colonization and fish assemblage on an artificial reef off Hurghada, Red Sea, Egypt[J]. *Egyptian Journal of Aquatic Biology and Fisheries*, 2013, 17(4):71-81.
- [57] SHAISH L, LEVY G, KATZIR G, et al. Employing a highly fragmented, weedy coral species in reef restoration[J]. *Ecological Engineering*, 2010, 36(10):1 424-1 432.
- [58] GUEST J R, BARIA M V, GOMEZ E D, et al. Closing the circle: Is it feasible to rehabilitate reefs with sexually propagated corals? [J]. *Coral Reefs*, 2013, 33(1):45-55.
- [59] POLIDORO B, CARPENTER K. Dynamics of coral reef recovery[J]. *Science*, 2013, 340(6 128):34-35.

- [60] 覃祯俊, 余克服, 王英辉. 珊瑚礁生态修复的理论与实践[J]. 热带地理, 2016, 36(1):80-86.
- [61] ZHAO Q, BAI J, HUANG L, et al. A review of methodologies and success indicators for coastal wetland restoration[J]. Ecological Indicators, 2016, 60:442-452.
- [62] FLOWER J, ORTIZ J C, CHOLLETT I, et al. Interpreting coral reef monitoring data: A guide for improved management decisions[J]. Ecological Indicators, 2017, 72:848-869.
- [63] FONSECA M S. Restoring seagrass systems in the United States[C]// Thayer G W. Restoring the Nation's Marine Environment. College Park: Maryland Sea Grant College, 1992:79-110.
- [64] ADDY C E. Eelgrass planting guide[J]. Maryland Conservation, 1947, 24:16-17.
- [65] 潘金华, 江鑫, 赛珊, 等. 海草场生态系统及其修复研究进展[J]. 生态学报, 2012, 32(19):6 223-6 232.
- [66] ORTH R J, LUCENBACH M L, MARION S R, et al. Seagrass recovery in the Delmarva Coastal Bays, USA[J]. Aquatic Botany, 2006, 84(1):26-36.
- [67] THORHAUG A. Large-scale seagrass restoration in a damaged estuary[J]. Marine Pollution Bulletin, 1987, 16(2):55-62.
- [68] ROLLON R N, STEVENINCK E D D R V, VIERSEN W V, et al. Contrasting recolonization strategies in multi-species seagrass meadows[J]. Marine Pollution Bulletin, 1998, 37(8/12):450-459.
- [69] HOTALING-HAGAN A, SWETT R, ELLIS L R, et al. A spatial model to improve site selection for seagrass restoration in shallow boating environments[J]. Journal of Environmental Management, 2017, 186(s1):42-54.
- [70] KATWIJK M M V, BOS A R, JONGE V N D, et al. Guidelines for seagrass restoration: importance of habitat selection and donor population, spreading of risks, and ecosystem engineering effects[J]. Marine Pollution Bulletin, 2009, 58(2):179-88.
- [71] FONSECA M S, JULIUS B E, KENWORTHY W J. Integrating biology and economics in seagrass restoration: How much is enough and why? [J]. Ecological Engineering, 2000, 15(4):227-237.
- [72] 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.
- [73] TANNER C E, PARHAM T. Growing *Zostera marina* (eel-grass) from seeds in land-based culture systems for use in restoration projects[J]. Restoration Ecology, 2010, 18:527-537.
- [74] LIU Z, CUI B, HE Q. Shifting paradigms in coastal restoration: Six decades'lessons from China[J]. Science of the Total Environment, 2016, 566/567:205-214.
- [75] LI F, XU M, LIU Q, et al. Ecological restoration zoning for a marine protected area: a case study of Haizhouwan National Marine Park, China[J]. Ocean & Coastal Management, 2014, 98(9):158-166.
- [76] LIN P, FU Q. Environmental ecology and economic utilization of mangroves in China[M]. Beijing: Berlin Heidelberg CHEP & Springer Verlag, 2000: 29-39.
- [77] CHEN L Z, WANG W Q, ZHANG Y H, et al. Recent progresses in mangrove conservation, restoration and research in China [J]. Journal of Plant Ecology, 2009, 2(2):45-54.
- [78] 王友绍. 红树林生态系统评价与修复技术[M]. 北京:科学出版社, 2013.
- [79] 冯建祥, 朱小山, 宁存鑫, 等. 红树林种植-养殖耦合湿地生态修复效果评价[J]. 中国环境科学, 2017, 37(7):2 662-2 673.
- [80] 陈刚, 熊仕林, 谢菊娘. 三亚水域造礁石珊瑚移植实验研究[J]. 热带海洋, 1995, 14(3):51-57.
- [81] 李元超, 兰建新, 郑新庆, 等. 西沙赵述岛海域珊瑚礁生态修复效果的初步评估[J]. 应用海洋学学报, 2014, 33(3):348-353.
- [82] MA D, ZHANG L, FANG Q, et al. The cumulative effects assessment of a coastal ecological restoration project in China: An integrated perspective[J]. Marine Pollution Bulletin, 2017, 118(1/2):254-260.
- [83] JONES K, LANTHIER Y, VOET P V D, et al. Monitoring and assessment of wetlands using Earth Observation: the Globe Wetland project[J]. Journal of Environmental Management, 2009, 90:2 154-2 169.

Progress in marine ecosystem restoration

WANG Li-rong, YU Hong-bing, LI Cui-tian, SUN Ni

(Marine Environment Engineering Center, South China Sea Institute of Oceanology, CAS, Guangzhou 510301)

Abstract: Marine ecosystem is one of the most valuable resources and relied by more and more coastal residents. Mangrove, coral reef and seagrass bed, in particularly, have high biodiversity and productivity, provide places for spawning and breeding and protect coast from wind and wave erosion. Along with economic development and human being's activity, these marine ecosystems have been destroyed and then the restoration is needed. In this paper, the characteristics of the 3 marine ecosystems are introduced. Eco-restoration contents, methods and problems of these 3 typical and fragile ecosystems are also reviewed. At last, an universal restoration model and measures are proposed and summarized. The restoration should be considered consistently in the future. This method can be used as reference for the restoration of similar marine ecosystems in other areas.

Key words: marine biology; marine ecosystem; ecological restoration; mangrove; coral reef; seagrass bed

DOI:10.3969/J. ISSN. 2095-4972. 2018. 03. 017

(责任编辑:杜俊民)