

滨海湿地生态修复若干问题探讨

陈彬^{1,2}, 俞炜炜^{1,2}, 陈光程^{1,2}, 郑新庆^{1,2}, 黄海萍^{1,2}, 胡文佳^{1,2}, 马志远^{1,2}

(1. 自然资源部第三海洋研究所, 福建 厦门 361005; 2. 福建省海洋生态保护与修复重点实验室, 福建 厦门 361005)

摘要:滨海湿地是地球上生产力最高、生物多样性最丰富的生态系统之一,然而由于强烈的人为活动,滨海湿地遭到严重破坏甚至丧失。滨海湿地退化是世界各国普遍面临的问题,退化滨海湿地生态系统的修复也已成为国际上生态研究的热点。本文在分析国内外研究进展的基础上,从生态退化诊断、修复目标、修复措施、修复监测、修复成效评估等几个关键问题对滨海湿地生态修复进行了探讨。滨海湿地生态退化诊断主要采用参照系统对比法,即选取退化生态系统干扰前、邻近未受干扰或干扰小、或参考多方面资料而构造的假设生态系统等作为参照进行对比;生态修复最终目标不是简单地恢复生态系统的结构和功能,更重要的是建立一个能自我维持、自我调控或在较少人为辅助下能健康运行的滨海湿地生态系统;生态修复途径包括自然恢复、人工促进生态修复和生态重建,只有在自然恢复不能实现的情况下,才考虑采取人工促进生态修复或生态重建;生态修复监测参数包括结构参数和功能参数,监测覆盖施工前、施工期和施工后全过程;滨海湿地生态修复成效评估需同时考虑生态结构、生态功能及生态服务。目前,我国滨海湿地生态修复尚存在退化机制及恢复机理认识不足;滨海湿地生态修复技术储备不足,关键技术不能满足需求;修复的区域空间尺度较小,系统性和完整性不足,缺乏国家和区域生态修复规划;滨海湿地生态修复后期管理、监测、成效评估不足。为此建议:①注重滨海湿地恢复生态学的基础理论研究;②强调滨海湿地生态修复的系统性、综合性和完整性,推动整体规划、区域统筹、系统修复;③加强典型滨海湿地的生态修复关键技术研发,如红树林生态系统功能恢复和提升技术,海草、盐沼植物等种苗人工繁殖和种植技术,珊瑚有性繁殖技术和珊瑚礁生态系统功能恢复技术等;④注重滨海湿地生态修复的后期管理及公众参与。

关键词:海洋环境科学;生态修复;滨海湿地;退化诊断;目标;监测;成效评估

DOI: 10.3969/J. ISSN. 2095-4972. 2019. 04. 002

中图分类号: P76

文献标识码: A

文章编号: 2095-4972(2019)04-0464-10

滨海湿地是陆地生态系统与海洋生态系统的交错过渡地带,被认为是生产力最高、生物多样性最丰富的生态系统之一,为人类提供防止风暴和海岸侵蚀、供水产品、净化水体和生物多样性维护等重要生态系统功能服务^[1-3]。然而,由于沿海地区人口的急剧增长和社会经济的快速发展,自然资源掠夺性开发日益加剧,滨海湿地已成为全球受威胁最为严重的自然生态系统之一^[4]。据统计,全球约有50%的盐沼、35%的红树林和29%的海草由于环境压力和人类干扰而丧失或退化^[5]。退化滨海湿地生态系统的恢复也由此成为全球关注的热点。

自20世纪90年代,湿地恢复与重建一直成为

国际上生态研究的“热点”^[6]。我国滨海湿地生态系统的修复也已日益得到广泛重视,在《中华人民共和国海洋环境保护法》《全国生态保护与建设规划》《海洋生态文明建设实施方案》等法律、政策、规划各方面都得到了相应的体现。近年来,我国沿海各地纷纷开展滨海湿地生态修复工作^[7],尤其是2010年中央分成海域使用金返还生态修复项目和2016年“蓝色海湾”整治行动的实施,我国滨海湿地生态修复规模和数量均急剧增长。为此,迫切需要总结国内外滨海湿地生态修复的经验,完善我国滨海湿地生态修复方法体系,为沿海地区开展滨海湿地生态修复研究与实践提供科学技术支撑,以提高

收稿日期: 2019-08-15

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFC0506105); 国家重点基础研究发展计划(973计划)资助项目(2015CB452905)

作者简介: 陈彬(1970—),男,研究员; E-mail: chenbin@tio.org.cn

生态修复成效。滨海湿地生态修复是一项系统工程,涉及了生态退化诊断、修复目标确定、生态修复措施、生态修复监测、生态修复成效评估等内容,本文重点从以上几个关键问题对滨海湿地生态修复进行论述。

1 国内外滨海湿地生态修复现状与趋势

1.1 国外滨海湿地生态修复现状与趋势

国际上,滨海湿地生态修复的研究与实践至今已较长的历史,尤其自 21 世纪以后,滨海湿地生态修复得到迅速发展,生态修复的对象、内容、尺度、范围都不断延伸。滨海湿地生态修复对象逐渐多元化,已涵盖了盐沼^[8]、红树林^[9-10]、珊瑚礁^[11]、海草床^[12-13]等所有滨海湿地生境类型。在空间尺度上,滨海湿地生态修复大体经历了两个阶段:一是 20 世纪 90 年代中期以前,主要以单个生境、群落或物种、或局部小尺度的修复为主;二是 20 世纪 90 年代中期以后,统筹规划滨海湿地生态修复的重要性开始逐渐得到重视^[14],国家、区域等不同尺度的滨海湿地生态修复规划日益增多,以美国、欧洲等发达国家为主的区域性或大尺度的滨海湿地生态修复项目大量涌现^[15-16]。滨海湿地生态修复的内容由传统的生态修复技术措施研究转向生态修复的系统化研究,涵盖了生态退化诊断、生态修复目标确定、生态修复技术措施、生态修复管理、生态修复监测、生态修复成效评估等内容^[17-19]。

1.2 国内滨海湿地生态修复现状与趋势

我国滨海湿地生态修复研究与实践最多的是红树林修复,而珊瑚礁、海草床、盐沼等类型的修复较国际起步较晚。我国规模化的红树林生态修复实践可追溯到 20 世纪 50 年代,早期红树林湿地修复仅停留在植被恢复的水平上,重点关注育苗技术和宜林地的选择;21 世纪后,红树林土壤环境^[20]、底栖动物群落^[21]、微生物群落^[22]等特征的恢复开展了一定的研究,生态系统的凋落物生产力、物质循环等生态过程和功能也受到关注^[23]。我国珊瑚礁修复技术的研究始于 20 世纪 90 年代末的珊瑚移植实验,直至 2008 年以后逐渐开展珊瑚繁殖与人工培育的技术研究^[24-25],涠洲岛、海南岛周边、徐闻等地已开展了珊瑚礁生态修复实践。相比红树林,目前海草床生态修复学科的发展仍处于起步阶段,大多集中于对海草床资源分布、生态现状和退化原因的探讨^[26],以及海草植被修复技术的研究^[27]。总体而言,我国滨海湿地的生态修复主要还集中于单个项目或局部区域、湿地植被及珊瑚的人工修复技术等,

生态修复监测和效果评估也日益增多,综合、系统的区域尺度滨海湿地生态修复逐渐获得越来越多的关注。

2 滨海湿地生态退化诊断

2.1 退化干扰识别

导致生态系统退化的因素有很多,凡是干扰系统内各组成成分及其生态学过程的因素都可能引起系统退化^[28]。根据生态系统的干扰动因,干扰可分为自然干扰和人为干扰,其中人为干扰是当前生态系统退化的主导因素。滨海湿地生态系统的干扰因素主要包括:围海造陆、围垦筑堤、疏浚等工程建设,如港口、农业、围垦养殖;污染,包括陆源和海上污染,如工业污水排放、养殖污染等;渔业资源过度利用,如渔业捕捞;台风、海啸等自然灾害性破坏;海岸植被砍伐或破坏;采砂;外来物种入侵;全球气候变化等等^[8,29]。这些干扰因素或单一或多种、或强或弱、或间断或持续地干扰生态系统^[28],生态系统退化及其恢复在很大程度上取决于干扰的类型、强度、持续时间和频度^[30]。

2.2 参照系统选取

退化生态系统是相对未退化或退化前的原生态系统而言,是一个相对的概念,因此,需要选取参照系统作为生态修复的模版或目标,为生态退化诊断、生态修复目标制定、生态修复过程监测、生态修复成效评估等提供参照^[9,31]。参照系统有两种类型^[32]:一种是与修复区现有生态特征类似的参照系统,即作为退化生态系统的参照,用于反映生态系统的潜在恢复能力及其速率;另一种是与修复区的理想目标状态类似的参照系统,即作为目标生态系统的参照,用于反映生态修复的过程及其成效。

理论上,历史的、干扰前或退化前的原生态系统是最佳的目标参照系统,但由于普遍存在对退化前或干扰前生态系统的结构、功能及过程等的认识不足,选取原生态系统作为参照的难度很大。为此,目标参照系统的选取主要考虑^[9,32-34]:历史自然的残留区域,或自然恢复区域;邻近未退化、或退化程度较轻的区域;根据拟修复区或邻近区域的历史和现有生态系统信息,整合构造的假设生态系统。目标参照系统的选取应充分考虑与拟修复生态系统的相似性,主要包括^[35]:气象和水文特征相似,如淡水输入、潮汐等;主要的生物群落相似性,如海岸植被、海洋植物、海洋动物等;土壤和沉积环境特征相似;功能相似性;历史或潜在的人类活动和干扰相似等等。选取参照系统所考虑的相似特征应具有针对性,不

同区域、不同生态系统类型或不同生态修复目标不尽相同。

2.3 退化程度诊断

退化生态系统是一种“病态”的生态系统,生态退化诊断是生态修复途径及其措施制定的基础。退化生态系统是个相对的概念,因此,退化诊断主要采用参照系统类比法,即通过对比退化生态系统干扰前后、或退化生态系统与目标参照系统的生态状况诊断生态系统的退化程度。

生态系统退化程度的诊断需要采取科学的、合理的诊断途径^[36]。理论上,退化的生态系统在生态系统的组成、结构、功能、过程等方面均有所表现,因此,滨海湿地生态系统退化诊断途径可包括:生境途径,如土壤、水质、水文;生物途径,如湿地植被、底栖生物、滨海湿地鸟类;生态系统功能途径,如湿地植被生产力、固碳量;生态系统服务途径,如海产品供给量;景观生态途径,如关键景观类型面积、景观破碎度。根据诊断途径及其筛选的诊断指标数量,诊断方法可分为单途径单因子诊断法、单途径多因子诊断法、多途径综合诊断法^[36]。与单途径单因子、单途径多因子相比,多途径综合诊断相对复杂,但诊断结果通常更接近实际情况,更能反映退化情况。

3 滨海湿地生态修复目标的确定

生态修复目标一直是恢复生态学领域倍受关注的热点问题。早期许多学者在生态修复的定义中对生态修复目标进行了大体的、笼统的描述。Jordan等(1990)提出生态修复是对整个生态群落的重建^[37]。1992年,美国国家科学研究委员会(NRC)提出生态修复是将一个生态系统恢复至与干扰前最接近的状态^[38]。Cairns(1995)认为,生态修复目的是要将生态系统恢复至初始的结构和功能条件,即使修复后的各要素及组成可能与初始状态存在显著差异,但至少应能被公众社会感觉到并确认恢复至可用的程度^[39]。

随着研究的深入,许多学者或国际组织对生态修复的目标进一步细化,生态修复目标逐渐明朗。Hobbs(1996)指出,恢复退化生态系统的目标包括建立合理的组成(种类丰富度和多度)、结构(植被和土壤的垂直结构)、格局(生态系统组分的水平分布)、异质性(各组分由多个变量组成)和功能(如水、能量、物质流动等基本生态过程)^[40]。2004年,国际生态恢复学会(SER)指出,生态修复是一个旨在加速恢复生态系统的健康(功能过程)、完整性(物种组成和群落结构)和持续性(对干扰的抵抗和

恢复力)的有目的性行为,并提出修复生态系统达到健康应具备的属性包括:与参照区具相似的物种多样性和群落结构;原生物种的出现;生态区域内出现使生态系统长期稳定必需的功能群体;具有一定的环境承载能力,能够容纳人口增长;正常生态机能的恢复;景观上能与周围地貌地形融合;消除生态系统潜在的威胁;具有一定的自然灾害的抵御能力;具有可持续发展能力^[41]。Ruiz-Jaen等(2005)指出,生态修复最终目标不是简单地恢复生态系统结构和功能,更重要的是要建立一个能自我维持、或在较少人工辅助下能健康运行的生态系统^[42]。2016年,国际生态恢复学会(SER)在出版的《生态恢复实践的国际标准》中指出,生态系统的全面恢复是指所有关键的生态系统属性类别的现状或状况均接近参照系统的水平,其重要的标准是生态系统显示出自我组织的状态并处于实现全面恢复的轨迹上^[31]。此外,许多研究和实践表明,成功生态修复项目离不开社会的有力支持及广泛的公众参与^[43-44],因此,有学者提出生态修复项目的目标尽可能结合社会需求,以得到社会公众的支持,否则生态修复难以长期维持^[44-45]。

尽管许多学者从不同角度对生态修复目标进行了论述,仍然没有统一的定论,但目前普遍得到认可的是以参照系统为模版来确定目标^[31]。滨海湿地生态修复目标的确定方法可采用单个或多个参照系统的类比法,生态修复目标内容则以关键的生态结构、生态功能及生态服务为核心,兼顾社会需求。滨海湿地是一个复杂的生态系统,每个生态修复项目或工程的目标不尽相同,应因地制宜确定生态修复目标。

4 滨海湿地生态修复措施

4.1 生态修复模式

通常地,生态系统的修复遵循两个途径^[46]:当生态系统受损不超过负荷且是可逆的情况下,压力和干扰消除后,恢复可以在自然过程中发生;当生态系统受损超负荷且发生不可逆变化时,仅依靠自然难以或不可能使系统恢复至初始状态,需要借助人为干扰措施,才能使其发生逆转。因此,根据生态系统的退化程度及其生态系统恢复的途径,生态修复可划分为自然恢复、人工促进生态修复和生态重建3种模式。

4.1.1 自然恢复 在生态系统受损未超过负荷、轻度退化的情况下,当退化因素消除后,退化生态系统可以在自然过程中逐渐得到恢复。自然恢复是最简

单的生态修复模式,即去除、减缓、控制或者更改某种关键或特定的干扰,使生态系统沿着自身正常的生态过程或演替方向发展而逐渐恢复。生态系统的自然恢复需取决于生态系统自身特性,如可恢复力、适应性及弹性等^[47]。

4.1.2 人工促进生态修复 当生态系统受损超过负荷并发生不可逆,局部或部分生态结构和功能出现退化,即便生态系统退化因素消除,也无法实现自然恢复。在这种情况下,生态系统受到较严重的干扰,但生态系统的生境、生物群落结构、生态功能等未遭到完全的毁灭性破坏,可以依靠生态系统的自我恢复能力,借助生物、物理、化学等一定的人工干扰措施,使生态系统退化发生逆转。

4.1.3 生态重建 生态系统受损程度超过负荷,生态结构和功能完全退化或破坏,需采取人为干扰的措施重建新生态系统的过程,包括重建某区域历史上曾没有的生态系统的过程。

尽管恢复生态学强调对受损生态系统进行修复,但恢复生态学更强调尊重自然规律,注重自然生态系统的保护。因此,只有在自然恢复不能实现的情况下,才考虑人工辅助的生态修复措施^[31,48]。

4.2 生态修复技术措施

生态修复的技术措施是在确定生态修复模式的基础上,因地制宜地提出更具体的、更具操作性的生态修复技术方案。拟修复生态系统所处的区域自然和社会环境、受到的干扰类型、持续时间和强度、生态退化的关键因子和限制条件等多方面的差异,不同生态修复项目所采取的措施也不尽相同。从生态系统的组成成分角度看,滨海湿地生态修复主要包括非生物系统和生物系统的恢复。例如, Elliott 等(2016)将生态修复项目分为两种类型^[49]:水动力的功能(生态水文)和生境结构修复,从而让生态得以发展;当物理条件足够充分用于持续的生态发展时,生物物种的重新引入、补充或重新种植等。从滨海湿地生态修复的对象来看,目前主要集中在红树林、盐沼湿地、海草床和珊瑚礁等典型滨海湿地生态系统,以下将分别给予阐述。

4.2.1 红树林生态系统修复 长期以来,稳定和提 高红树林植被覆盖是红树林生态修复的主要目标之一,也是红树林修复的重要内容。因此,无论在国内还是国外,针对红树林修复的研究和实践较多地集中于红树林的人工种植^[50],主要涉及了红树林湿地水动力和沉积环境修复、宜林地的选择、树种选择和搭配、红树林育苗、红树林栽培等关键技术的研究^[51]。此外,在人类活动和全球变化的驱动下,红

树林生态系统退化的问题逐渐凸显,互花米草(*Spartina alterniflora*)入侵、环境污染、病虫害、岸线侵蚀等问题威胁着红树林的保护和健康,不同退化类型湿地的退化机制及其修复仍是红树林生态修复研究的一个重要内容。

4.2.2 珊瑚礁生态系统修复 目前,珊瑚礁生态修复的主要手段包括珊瑚的繁殖技术、珊瑚移植、底质改良以及人工礁技术等。无性繁殖技术门槛低,是目前被广泛用于造礁珊瑚断枝的规模化培育,其中最典型的是野外原位的珊瑚农场(coral farming 或 coral gardening),这是过去数十年被广泛使用的珊瑚礁的生态修复技术^[52-53]。底质改良是通过人工礁体投放以及其它基底稳固技术,提供珊瑚幼虫附着以及珊瑚移植的空间^[54-55],某些特定的人工礁材质(例如活性金属)还能在小范围内促进特定离子(HCO_3^-)的富集^[56],以促进珊瑚的生长。此外,近年来,有研究者开始利用“杂交”技术培育新一代具有较强对抗环境变化的珊瑚幼体^[57-60],杂交或变异后代的拥有更高的热耐受应激反应基因^[57-58]。通过环境因子控制培育突变和杂交产生的珊瑚幼虫,筛选更适应极端环境的珊瑚基因,进行可遗传性繁育,可以提高了珊瑚抗白化的潜力^[59]。Oppen 等(2015)将更热海区的珊瑚幼虫补充至相对低温的海区,使两个区域的珊瑚精卵杂交,可以有效地提升了新生珊瑚的耐受高温的能力^[60]。通过杂交、培育基因突变体等手段改变珊瑚及其共生功能体(包括共生虫黄藻、共生菌群等)的基因型,增加珊瑚对环境胁迫的耐受能力等技术目前还处于实验室试验和验证阶段,但是未来的研究方向。

4.2.3 海草床生态系统修复 海草床生态系统恢复的主要措施有自然恢复法、移植法和播种法^[61]。自然恢复海草床需要很长时间,虽然节约大量的人力和物力成本,但是海草衰退的速度远远超过自然恢复的速度^[61],因此移植法和播种法仍是海草床生态系统修复的主要方法。目前移植法是可行性比较高的恢复方法,是指在适宜生长的海域直接移植海草苗或者成熟的植株。播种法是利用种子来恢复和重建海草床,这不但可以提高海草床的遗传多样性,同时海草种子具有体积小易于运输,而且收集种子对原海草床造成的危害较小,因此利用种子进行海草床修复逐步发展成为海草床生态修复的新途径和重要手段。

4.2.4 盐沼湿地生态系统修复 国际上,许多国家都经历过滨海盐沼湿地的开发、利用、开垦、破坏、直至部分恢复阶段,盐沼湿地生态修复的研究与实践

已有很长的历史,已有不少大尺度的区域盐沼生态修复项目,如美国的特拉华湾海岸、旧金山湾、切萨皮克湾等。盐沼湿地修复措施重点关注了盐沼湿地水文和沉积环境的修复^[62-63]、盐沼湿地植被恢复^[64]。与国际相比,我国盐沼湿地生态修复的研究尚处于起步阶段,研究主要集中于盐沼湿地生态系统恢复与重建、湿地污染生物修复技术、湿地入侵物种(尤其是互花米草)的去除和防控技术等。其中滨海湿地生态修复的选址是决定生态修复成败的关键因素,尤其对于滨海湿地水文条件和植被的恢复来说更为重要。因此,在制定滨海湿地生态修复计划时,需要对拟修复区域进行充分调查与研究,科学选址,因地制宜采取生态修复技术措施。

5 滨海湿地生态修复监测

滨海湿地生态修复监测分为监测计划制定、监测计划实施和数据与成果公开共享 3 个阶段。滨海湿地生态修复监测对生态修复成功与否起着至关重要的作用,但往往为生态修复实践中所忽略^[65]。生态修复监测计划的制定是整个生态修复监测实施的基础,监测计划制定的过程包括以下步骤和内容^[32]:分析生态修复项目的目标,包括总体目标和阶段具体目标;收集类似生态修复项目的监测信息;分析和描述项目区的生境类型;识别这些生境类型的结构和功能特征;收集历史数据;确定参照点;选取参数;确定监测点;确定监测时间及频率;确定监测方法。

5.1 监测参数

生态修复监测参数是指用于监测和评价反映生态修复过程和成效相关的生态系统参数^[65]。早期生态修复监测集中于生态结构的监测,而当前已从结构的监测向过程和功能监测的重心转变。生态修复监测需要满足生态修复演替过程、成效评估的需求,故监测参数不能太少。通常,滨海湿地生态系统的恢复需要经历以下一个或多个过程:物理条件的重建、土壤和水环境的化学调节、生物调控(包括重新引入缺乏的本土动植物)。因此,滨海湿地生态修复监测至少需包括物理、化学和生物 3 个方面的参数^[66]。

5.2 监测点位

生态修复区和参照区均需要设置监测点。监测点的数量因生态修复的类型、规模、监测参数等因素而异,同时还要考虑项目的经费因素。由于生态修复区周边很大范围的人类活动都可能对生态修复区构成干扰,因此,生态修复监测的空间范围不能局限

于生态修复区内,还需覆盖生态修复区的周边区域。

5.3 监测时间

滨海湿地生态修复是一个动态过程,生态修复监测的持续时间是一个存在争议的话题。有研究表明,沿海海洋和河口生态系统的原生物组成完全恢复至少需要 15 ~ 25 a,而恢复其多样性则需要更长的时间^[48],这意味着滨海湿地生态修复必须进行长期监测,才能判断修复过程中生态系统的演替方向、生态修复成功与否。理论上,生态修复监测至少需持续至生态系统变化最大结束,直至进入生态系统稳定动态变化的时期;许多研究证明,大多数的水生系统至少需 5 a 才能达到稳定期^[67]。此外,生态修复监测持续的时间与生态修复目标密切相关。

5.4 监测季节

海洋生物群落、越境湿地鸟类、水文格局等滨海湿地生态系统的结构和功能会随着时间的改变而改变。因此,具有季节变化的监测参数需考虑监测采样的季节因素,尽可能在适宜季节采样。

5.5 监测频次

生态修复监测的频次随着生态修复时间的推进而逐渐降低。一般地,生态修复实施后的 2 ~ 3 a 需每年进行监测,此后,每隔几年进行监测直至达到预期的长期的生态修复成功标准^[68]。生态修复工程刚结束的 1 ~ 2 a 内的监测集中于结构特征、物理-化学特征及其他生境参数;生态修复工程结束后 2 ~ 4 a 的监测重心从初期的结构特征转为结构和功能特征参数相结合;当生态修复项目目标完成时,或是生态系统已向即定的轨迹实现结构和功能目标时,监测频次可减少至每年 1 次或多年 1 次。

6 滨海湿地生态修复成效评估

生态修复成效评估是生态修复的重要内容,如何判断生态修复是否成功一直是学者关注的热点。2004 年,国际生态恢复学会(SER)提出了包括物种多样性、环境承载力、可持续发展能力等 9 个方面的生态修复评估标准^[41];Ruiz-Jaen 等(2005)^[42,69]认为,尽管 SER 列出的 9 项标准为评判生态修复是否成功提供很好框架,但由于监测人力、物力有限,监测所有的特征不切合实际,并提出可通过植被结构、多样性和生态过程反映生态修复的过程和生态系统的自我维持能力;Elliott 等(2007)基于 SER 的生态修复目标和成效评估标准,提出了涵盖生态结构和功能的 12 个海岸生境恢复的目标和标准^[47]。Duan(2008)提出湿地固碳潜力可以作为评价湿地生态修复成效的一个指标,并认为由于湿地是比较脆弱

的生态系统,经过生态修复的湿地其固碳潜力需要几年的时间才能达到正常水平^[70]。Tong等(2007)认为与生态系统结构、功能相比,为人类带来的服务、福利可能更为重要,尤其对城市湿地而言,他尝试着将生态系统结构和功能与它的服务和价值相联系,并将结果应用于恢复规划的目标设定、结构设计及其成功的界定^[71]。Jones等(2010)在洛约拉海滩恢复成效进行评估时,除了景观、环境、生态层次外,还考虑了社会(公众的接受度和评价)、经济(成本-收益)层次^[72]。Frisk(2011)构建了Ecopath with Ecosim模型代表生态系统的所有主要组成成份,定量评估了德拉华湾盐沼湿地恢复对系统生产力的影响^[73]。黄海萍等(2015)从环境质量、生物群落和景观格局3个方面选取相应指标,构建了一套系统的评估滨海湿地生态修复成效的指标体系,并对厦门五缘湾的生态修复成效进行了评估^[34]。

目前,对滨海湿地生态修复的成效评估的焦点逐步从生态结构向生态功能和生态服务转变。例如,在美国联邦政府的湿地保护和恢复项目中,生态系统服务货币化估算研究正逐渐引起重视^[74-76],一方面是为了对联联邦政府在上个十年里投入数十亿美元用于生态修复作出解释^[77],另一方面这些研究结合传统的经济学模型将生态系统服务货币化,为分析项目有效性和不同项目类型间的政策权衡提供信息^[74]。但总体来说,当前滨海湿地生态修复成效评估主要集中于生态结构和生态功能,而对于生态服务定量的评估研究还较少^[78]。

7 讨论与展望

滨海湿地生态修复是协助一个已经退化、受损、破坏的生态系统恢复的过程^[31,41],旨在建立一个能自我维持或在较少人工辅助下能健康运行的滨海湿地生态系统^[7,31]。尽管恢复生态学强调对受损生态系统进行修复,但恢复生态学更强调尊重自然规律,注重对原生境的保护,注重生态系统的自然恢复^[79]。当自然生态系统的丧失速度远远高于退化生态系统的恢复,对现存生境或生态系统的保护是滨海湿地生态系统保护最有效的措施,也是生态修复成功的关键因素之一。对于退化程度较轻的生态系统,优先考虑采取管理措施以消除退化压力的被动恢复途径,促进生态系统的自然恢复,只有在自然恢复不能实现的条件下,才采取人工辅助措施^[43]。

我国是一个海洋大国。近些年来,我国沿海各地纷纷开展滨海湿地生态修复研究与实践,滨海湿地生态修复已日益得到广泛的重视,我国滨

海湿地生态修复理论与技术也得到迅速发展。但与国际相比,我国滨海湿地生态修复工作起步较晚,也相对薄弱,其主要体现在:滨海湿地生态退化机制及其恢复机理认识不足;修复空间尺度较小、时间尺度较短,系统性和完整性不足,缺乏国家和区域生态修复规划;缺乏成熟可推广应用的滨海湿地生态修复技术,许多关键技术亟待突破;滨海湿地生态修复后期管理、跟踪监测和成效评估不足等。为此建议:

(1)注重滨海湿地恢复生态学的基础理论研究。恢复生态学是一门新学科,尤其是海洋和滨海湿地恢复生态学理论的研究更为薄弱。因此,滨海湿地生态系统的结构和功能退化机理、群落恢复生态适宜性原理、生态系统恢复及生物群落演替过程等相关理论将会是滨海湿地恢复生态学研究的重点之一。

(2)推进基于生态系统的滨海湿地生态修复研究与实践。在空间尺度上,建议加强国家和区域滨海湿地生态修复规划,推进从小尺度的局部、某生境、某物种或某生态类型的恢复转向大尺度的景观或区域的生态修复的实践。同时,由于滨海湿地是陆地生态系统与海洋生态系统的交错过渡地带,滨海湿地同时受到陆地和海域的共同作用,滨海湿地生态修复并非仅局限于海域范围,应将沿岸陆域和海域作为一个综合单元进行整体考虑。

(3)强调滨海湿地生态修复的系统性和完整性。滨海湿地生态修复是一项系统工作,应涵盖生态退化诊断、生态修复目标确定、生态修复措施实施、生态修复后期管护、生态修复监测、成效评估等内容,应重视参照系统在生态修复中的作用,同时在恢复过程中加强退化滨海湿地生态系统功能及其服务的研究,以利于更科学指导滨海湿地生态修复行动,提高滨海湿地生态修复成效。

(4)加强典型滨海湿地的生态修复关键技术的研发。重点解决红树林生态系统功能恢复和提升,海草、盐沼植物等种苗人工繁殖和种植,珊瑚有性繁殖和珊瑚礁生态系统功能恢复等关键技术,逐步提升滨海湿地生态修复技术能力。

(5)注重生态修复的管理措施及公众参与。生态修复管理是任何生态修复项目所必需的,不仅能消除、减缓或控制滨海湿地生态系统的退化压力,促进生态系统的自然恢复,而且有助于维持恢复生态系统处于较好的状态。此外,在恢复过程中需要不同利益相关者之间的合作与理解,需要当地政府、科学工作者、民众等多方面积极参与。

参考文献:

- [1] ALONGI D M. Mangrove forests: resilience, protection from tsunamis, and responses to global climate change[J]. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 2008, 76(1): 1-13.
- [2] COSTANZA R O, PÉREZ-MAQUEO O, MARTINEZ M L, et al. The value of coastal wetlands for hurricane protection[J]. *Ambio*, 2008, 37: 241-248.
- [3] NEWTON A, CARRUTHERS T J B, ICELY J. The coastal syndromes and hotspots on the coast[J]. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 2012, 96: 39-47.
- [4] LOTZE H K. Depletion, degradation, and recovery potential of estuaries and coastal seas[J]. *Science*, 2006, 312(5781): 1806-1809.
- [5] VALIELA I, KINNEY E, PEACOCK E, et al. Global losses of mangroves and salt marshes[M]//DUARTE C M. Global loss of coastal habitats: rates, causes and consequences. Bilbao: Fundación BBVA, 2009: 107-142.
- [6] ZEDLER J B, KERCHER S. Wetland resources: status, trends, ecosystem services, and restorability[J]. *Annual Review of Environment and Resources*, 2005, 15(30): 39-74.
- [7] 陈彬, 俞炜炜. 海洋生态恢复理论与实践[M]. 北京: 海洋出版社, 2012.
- [8] SCOTTWARREN R, FELL P E, ROZSA R, et al. Salt marsh restoration in Connecticut: 20 years of science and management[J]. *Restoration Ecology*, 2002, 10(3): 497-513.
- [9] LEWIS R R. Ecological engineering for successful management and restoration of mangrove forests[J]. *Ecological Engineering*, 2005, 24(4): 403-418.
- [10] KAMALI B, HASHIM R. Mangrove restoration without planting[J]. *Ecological Engineering*, 2011, 37(2): 387-391.
- [11] VAN OPPEN M J H, GATES R D, BLACKALL L L, et al. Shifting paradigms in restoration of the world's coral reefs[J]. *Global Change Biology*, 2017, 23(9): 3437-3448.
- [12] 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.
- [13] VAN 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(2): 567-578.
- [14] Restore America's Estuaries, National Oceanic and Atmospheric Administration. A national strategy to restore coastal and estuarine habitat[R]. Arlington: Restore America's Estuaries, 2002.
- [15] SIMENSTAD C, REED D, FORD M. When is restoration not?: incorporating landscape-scale processes to restore self-sustaining ecosystems in coastal wetland restoration[J]. *Ecological Engineering*, 2006, 26(1): 27-39.
- [16] WEISHAR L L, TEAL J M, HINKLE R. Designing large-scale wetland restoration for Delaware Bay[J]. *Ecological Engineering*, 2005, 25(3): 231-239.
- [17] THOM R M. Adaptive management of coastal ecosystem restoration projects[J]. *Ecological Engineering*, 2000, 15(3): 365-372.
- [18] SHORT F T. Developing success criteria for restored eelgrass, salt marsh and mud flat habitats[J]. *Ecological Engineering*, 2000, 15(3): 239-252.
- [19] NECKLES H A, DIONNE M, BURDICK D M, et al. A monitoring protocol to assess tidal restoration of salt marshes on local and regional scales[J]. *Restoration Ecology*, 2002, 10(3): 556-563.
- [20] 韩维栋, 凌大炯, 李燕, 等. 人工无瓣海桑林的土壤动态研究[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2003, 27(2): 49-54.
- [21] 唐以杰, 方展强, 钟燕婷, 等. 不同生态恢复阶段无瓣海桑人工林湿地中大型底栖动物群落的演替[J]. *生态学报*, 2012, 32(10): 3160-3169.
- [22] 殷萌清, 冯建祥, 黄小芳, 等. 天然及人工红树林土壤微生物群落结构分析[J]. *生态科学*, 2017, 36(5): 1-10.
- [23] YE Y, CHEN Y P, CHEN G C. Litter production and litter elemental composition in two rehabilitated *Kandelia obovata* mangrove forests in Jiulongjiang Estuary, China[J]. *Marine Environmental Research*, 2013, 83(2): 63-72.
- [24] JIANG L, SUN Y F, ZHANG Y Y, et al. Impact of diurnal temperature fluctuations on larval settlement and growth of the reef coral *Pocillopora damicornis*[J]. *Biogeosciences*, 2017, 14: 5741-5752.
- [25] ZHENG X, LI Y, CHEN S, et al. Effects of calcium ion concentration on calcification rates of six stony corals: a mesocosm study[J]. *Aquaculture*, 2018, 497: 246-252.
- [26] 王道儒, 吴钟解, 陈春华, 等. 海南岛海草资源分布现状及存在威胁[J]. *海洋环境科学*, 2012, 31(1): 34-38.

- [27] 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.
- [28] 包维楷, 陈庆恒. 生态系统退化的过程及其特点[J]. 生态学杂志, 1999(2): 36-42.
- [29] JIANG T T, PAN J F, PU X M, et al. Current status of coastal wetlands in China: degradation, restoration, and future management[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2015, 164: 265-275.
- [30] DUARTE C M, BORJA A, CARSTENSEN J, et al. Paradigms in the recovery of estuarine and coastal ecosystems[J]. *Estuaries and Coasts*, 2015, 38(4): 1 202-1 212.
- [31] MCDONALD T, GANN G D, JONSON J, et al. International standards for the practice of ecological restoration-including principles and key concepts[R]. Washington, D. C.: Society for Ecological Restoration, 2016: 7-39.
- [32] THAYER G W, MCTIGUE T A, BELLMER R J, et al. Science-based restoration monitoring of coastal habitats volume one: a framework for monitoring plans under the estuaries and clean waters act of 2000 (Public Law 160-457)[M]. Maryland: Silver Spring, 2003: 1-35.
- [33] BALAGUER L, ESCUDERO, ADRIÁN, et al. The historical reference in restoration ecology: re-defining a cornerstone concept[J]. *Biological Conservation*, 2014, 176: 12-20.
- [34] 黄海萍, 陈彬, 俞炜炜, 等. 厦门五缘湾滨海湿地生态恢复成效评估[J]. 应用海洋学学报, 2015, 34(4): 501-508.
- [35] NECKLES H A, DIONNE M, BURDICK D M, et al. A monitoring protocol to assess tidal restoration of salt marshes on local and regional scales[J]. *Restoration Ecology*, 2002, 10(3): 8.
- [36] 杜晓军, 高贤明, 马克平. 生态系统退化程度诊断: 生态恢复的基础与前提[J]. 植物生态学报, 2003, 27(5): 700-708.
- [37] JORDAN W R, GILPIN M E, ABER J D. Restoration ecology: a synthetic approach to ecological research[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.
- [38] National Research Council. Restoration of aquatic ecosystem: science, technology, and public policy[M]. Washington, D. C.: National Academy Press, 1992.
- [39] CAIRNS J J. Encyclopedia of environmental biology[J]. *Restoration Ecology*, 1995, 3: 223-235.
- [40] HOBBS R J, NORTON D A. Towards a conceptual framework for restoration ecology[J]. *Restoration Ecology*, 1996, 4(2): 18.
- [41] Society For Ecological Restoration International Science & Policy Working Group. The SER international primer on ecological restoration[R]. Tuscon: Society for Ecological Restoration International, 2004: 2-15.
- [42] RUIZ-JAEN M C, AIDE T M. Restoration success: how is it being measured?[J]. *Restoration Ecology*, 2005, 13(3): 569-577.
- [43] CAIRNS J J. Setting ecological restoration goals for technical feasibility and scientific validity[J]. *Ecological Engineering*, 2000, 15(3): 171-180.
- [44] JELLINEK S, WILSON K A, HAGGER V, et al. Integrating diverse social and ecological motivations to achieve landscape restoration[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2019, 56: 246-252.
- [45] LIPSKY R S, RYAN C M. Nearshore restoration in Puget Sound: understanding stakeholder values and potential coalitions [J]. *Coastal Management*, 2011, 39: 577-597.
- [46] PLATT R B. Conference summary[C]//CAIRNS J J, DICKSON K L, HERRICKS E E. Recovery and restoration of damaged ecosystems. Charlottesville: University Press of Virginia, 1977: 526-531.
- [47] ELLIOTT M, BURDON D, HEMINGWAY K L, et al. Estuarine, coastal and marine ecosystem restoration: confusing management and science-A revision of concepts[J]. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 2007, 74(3): 349-366.
- [48] BORJA A, DAUER D M, ELLIOTT M, et al. Medium- and long-term recovery of estuarine and coastal ecosystems: patterns, rates and restoration effectiveness[J]. *Estuaries and Coasts*, 2010, 33(6): 1 249-1 260.
- [49] ELLIOTT M, MANDER L, MAZIK K, et al. Ecoengineering with ecohydrology: successes and failures in estuarine restoration [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2016, 176: 12-35.
- [50] BARNUEVO A, ASAEDA T, SANJAYA K, et al. Drawbacks of mangrove rehabilitation schemes: lessons learned from the large-scale mangrove plantations[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2017, 198: 432-437.
- [51] LEWIS R R, BROWN B M, FLYNN L L. Methods and criteria for successful mangrove forest rehabilitation[C]// PERILLO G M E, WOLANSKI E, CAHOON D R, et al. Coastal wetlands: an integrated and ecosystem approach. Amsterdam: Elsevier, 2018: 863-887.
- [52] RINKEVICH B. The coral gardening concept and use of underwater nurseries: lessons learned from silvics and silviculture

- [M]// PRECHT W F. Coral Reef Restoration Handbook. Boca Raton, London, New York: CRC Press, 2006: 291-302.
- [53] DELBEEK J C. Coral farming: past, present and future trends[J]. *Aquarium Sciences and Conservation*, 2001, 3(1/2/3): 171-181.
- [54] ABELSON A. Artificial reefs vs coral transplantation as restoration tools for mitigating coral reef deterioration: benefits, concerns, and proposed guidelines[J]. *Bulletin of Marine Science*, 2006, 78(1): 151-159.
- [55] SPIELER R E, GILLIAM D S, SHERMAN R L. Artificial substrate and coral reef restoration: what do we need to know to know what we need[J]. *Bulletin of Marine Science*, 2001, 69(2): 1 013-1 030.
- [56] 李元超, 吴世儒, 吴钟解, 等. 一种提高造礁石珊瑚生长速度的方法和装置: CN 201610013044.7[P]. 2016-01-08.
- [57] BARSHIS D J, LADNER J T, OLIVER T A, et al. Genomic basis for coral resilience to climate change[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110(4): 1 387-1 392.
- [58] THOMAS C D. Translocation of species, climate change, and the end of trying to recreate past ecological communities[J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2011, 26(5): 216-221.
- [59] PALUMBI S R, BARSHIS D J, TRAYLOR-KNOWLES N, et al. Mechanisms of reef coral resistance to future climate change [J]. *Science*, 2014, 344(6 186): 895-898.
- [60] OPPEN M J, OLIVER J K, PUTNAM H M, et al. Building coral reef resilience through assisted evolution[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, 112(8): 2 307-2 313.
- [61] MEEHAN A J, WEST R J. Recovery times for a damaged *Posidonia australis* bed in south eastern Australia[J]. *Aquatic Botany*, 2000, 67(2): 161-167.
- [62] DIEFENDERFER H L, SINKS I A, ZIMMERMAN S A, et al. Designing topographic heterogeneity for tidal wetland restoration [J]. *Ecological Engineering*, 2018, 123: 212-225.
- [63] PROOSDIJ D V, LUNDHOLM J, NEATT N, et al. Ecological re-engineering of a freshwater impoundment for salt marsh restoration in a hypertidal system[J]. *Ecological Engineering*, 2010, 36(10): 1 314-1 332.
- [64] MORZARIA-LUNA H N, ZEDLER J B. Does seed availability limit plant establishment during salt marsh restoration? [J]. *Estuaries & Coasts*, 2007, 30(1): 12-25.
- [65] DIEFENDERFER H L, THOM R M, ADKINS J E. Systematic approach to coastal ecosystem restoration[R]. Washington, D. C. : National Oceanic and Atmospheric Administration Coastal Services Center, 2003: 1-54.
- [66] National Research Council. Ecological dynamics on yellowstone's northern range[M]. Washington, D. C. : The National Academies Press, 2002.
- [67] WELLER M W. Use of two waterbird guilds as evaluation tools for the Kissimmee river restoration[J]. *Restoration Ecology*, 1995, 3(3): 211-224.
- [68] NECKLES H A, DIONNE M, BURDICK D M, et al. A monitoring protocol to assess tidal restoration of salt marshes on local and regional scales[J]. *Restoration Ecology*, 2002, 10(3): 556-563.
- [69] RUIZ-JAÉN M C, AIDE T M. Vegetation structure, species diversity, and ecosystem processes as measures of restoration success[J]. *Forest Ecology and Management*, 2005, 218(1/2/3): 159-173.
- [70] DUAN X N, WANG X K, FEI L, et al. Primary evaluation of carbon sequestration potential of wetlands in China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(2): 463-469.
- [71] TONG C, FEAGIN R A, LU J, et al. Ecosystem service values and restoration in the urban Sanyang wetland of Wenzhou, China[J]. *Ecological Engineering*, 2007, 29(3): 249-258.
- [72] JONES K, PAN X, GARZA A, et al. Multi-level assessment of ecological coastal restoration in South Texas[J]. *Ecological Engineering*, 2010, 36(4): 435-440.
- [73] FRISK M G, MILLER T J, LATOUR R J, et al. Assessing biomass gains from marsh restoration in Delaware Bay using Eco-path with Ecosim[J]. *Ecological Modelling*, 2011, 222(1): 190-200.
- [74] CAFFEY R H, WANG H, DANIEL R P. Trajectory economics: assessing the flow of ecosystem services from coastal restoration[J]. *Ecological Economics*, 2014, 100: 74-84.
- [75] BARBIER E B. Valuing ecosystem services for coastal wetland protection and restoration: progress and challenges[J]. *Resources*, 2013, 2(3): 213-230.
- [76] CULLINANE-THOMAS C M, SKRABIS K E, GASCOIGNE W. Ecosystem restoration[R]// The Department of the Interior. The Department of the Interior's economic contributions, FY2011. Reston, VA: U. S. Department of the Interior, 2012: 58-92.

- [77] Mather Economics. Measuring the economic benefits of America's everglades restoration; an economic evaluation of ecosystem services affiliated with the world's largest ecosystem restoration project[R]. Roswell: Mather Economics, 2010.
- [78] VIEIRA D S L, MARK E, ROBERT G S. Ecosystem services assessment at Steart Peninsula, Somerset, UK[J]. Ecosystem Services, 2014, 10: 19-34.
- [79] YOUNG T P. Restoration ecology and conservation biology[J]. Biological Conservation, 2000, 92(1): 73-83.

Coastal wetland restoration: an overview

CHEN Bin^{1,2}, YU Wei-wei^{1,2}, CHEN Guang-cheng^{1,2}, ZHENG Xin-qing^{1,2},
HUANG Hai-ping^{1,2}, HU Wen-jia^{1,2}, MA Zhi-yuan^{1,2}

(1. Third Institute of Oceanography, MNR, Xiamen 361005, China;

2. Fujian Provincial Key Laboratory of Marine Ecological Conservation and Restoration, Xiamen 361005, China)

Abstract: Coastal wetlands are among the most productive and biodiverse ecosystems on the earth. However, they have been seriously degraded or even lost due to intensive anthropogenic activities. The degradation of coastal wetlands is a worldwide common issue and the ecological restoration of coastal wetlands has become a global hotspot for ecologists. Based on the current knowledge at home and abroad, this paper overviews the progress in ecological restoration of coastal wetlands, focusing on key issues including ecosystem degradation diagnosis, restoration goal, restoration measures, monitoring and effectiveness evaluation of the restoration. The degradation diagnosis of coastal wetlands is generally based on the comparison of a targeted ecosystem or a reference ecosystem, which can be the pre-disturbed status, adjacent undisturbed or slightly disturbed ecosystem, or a hypothetical ecosystem derived from multi-information. The ultimate goal of ecological restoration is to establish a self-sustainable and self-regulatory ecosystem with or without limited artificial intervention, rather than to simply restore the structure and function of ecosystem. Ecological restoration includes natural restoration, artificial restoration and ecological reconstruction, while artificial restoration or ecological reconstruction should only be considered when natural restoration can not be achieved. Monitoring of an ecological restoration should cover the structure and functions of the ecosystem, and it should be carried out before, during and after activities undertaken. Recovery of ecosystem structure, ecosystem functions and services should also be taken into account to evaluate the effectiveness of an ecological restoration project. In China, mechanisms on the ecosystem degradation and restoration of coastal wetlands are not adequately recognized. The technologies and methods are not soundly developed to be applicable for the ecological restoration. The spatial scale is usually small and in lack of systematicity and the integrity of the space and there is also a lack of comprehensive planning on national or regional scale. The post-restoration management, monitoring and success evaluation of ecological restorations should also be enhanced. Therefore, we suppose the following considerations to promote the future ecological restoration in China: ① to pay attention to the fundamental researches of restoration ecology of coastal wetlands. ② to highlight the systematicity, comprehensiveness and integrity of coastal wetland restoration, and promote overall planning, regional coordination and systematic restoration. ③ to facilitate researches and developments of restoration technologies, such as restoration and improvement technologies of ecosystem functions of mangrove wetlands, artificial reproduction, nursery and planting technologies of seagrass and salt marsh plants, and coral sexual reproduction and reef functional restoration technologies. ④ to pay more attention to the management measures and public participation in coastal wetland ecological restoration.

Key words: marine environment and science; ecological restoration; coastal wetlands; degradation assessment; restoration goal; monitoring; effectiveness evaluation

DOI: 10.3969/J. ISSN.2095-4972.2019.04.002