

DOI: 10.20103/j.stxb.202406271493

徐淑升, 杨云锋, 孙庆杨, 陈绵润. NbS 理念下低成本大规模开展海洋生态修复项目的研究. 生态学报, 2025, 45(19): - .

Xu S S, Yang Y F, Sun Q Y, Chen M R. Research of low-cost and large-scale marine ecological restoration projects based on the concept of Nature-based solutions (NbS). Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(19): - .

NbS 理念下低成本大规模开展海洋生态修复项目的研究

徐淑升¹, 杨云锋², 孙庆杨^{1,*}, 陈绵润¹

¹ 自然资源部南海发展研究院(自然资源部南海遥感技术应用中心), 广州 510300

² 清华大学深圳国际研究生院, 深圳 518055

摘要: 如何正确处理好自然恢复和人工修复的关系, 是全球范围内生态治理的重大议题, 随着以往海洋生态修复的短板日益显露, 探索低成本大规模的海洋生态修复自然解决方案重要性日益凸显。本论文通过国内外研究成果、案例资料分析比对, 结合实地调研, 对当前国内外海洋生态修复面临的问题和原因进行分析, 发现当前国内外海洋生态修复项目短板包括: 项目所在地集中在海岸带, 普遍面临修复成本高、规模小、类型少、效果不理想、人为干预多等问题。以往解决这些问题理念是加强资金投入、提高短期内工程施工效率, 本文认为应克服工程思维, 基于 NbS 理念, 树立全球视野, 注重长时间序列的成本规模核算, 发展新的效果评估和项目管理模式, 延长生态修复项目实施时间, 开展长期监测, 加大公众参与, 加强新科技应用。

关键词: 基于自然的解决方案(NbS); 生态修复; 自然恢复; 成本; 规模

Research of low-cost and large-scale marine ecological restoration projects based on the concept of Nature-based solutions (NbS)

XU Shusheng¹, YANG Yunfeng², SUN Qingyang^{1,*}, CHEN Mianrun¹

¹ South China Sea Development Research Institute, Ministry of Natural Resources (Remote Sensing Technology Application Center of South China Sea, MNR), Guangzhou 510300, China

² Tsinghua Shenzhen International Graduate School, Shenzhen 518055, China

Abstract: Properly dealing the relationship between natural and artificial restoration is a crucial issue in global ecological governance. With the shortcomings of previous marine ecological restoration efforts becoming increasingly evident, the significance of exploring low-cost, large-scale natural-based solutions for marine ecological restoration has grown exponentially. This paper conducted a comparative analysis of research findings and case studies both domestically and internationally, identified the problems in marine ecological restoration, and delved into their root causes. The study concluded that most marine ecological restoration projects around the world are concentrated in coastal areas and commonly encounter challenges such as high costs, limited scale, a narrow range of project types, unsatisfactory results, and excessive human interference. In the past, the conventional approach to addressing these issues has been to increase capital investment and speed up the project's progress. However, this paper argued that ecological restoration project managers should surpass traditional engineering mindsets. Instead, the managers should establish a global perspective grounded in the NbS (Nature-based Solutions) concept, adopt a long-term cost accounting approach, develop innovative methods for

基金项目: 南海局科技发展基金项目(24YD01); 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海)创新团队项目(311021004)和自主项目(SML2021SP308); 自然资源部海洋生态保护与修复重点实验室/福建省海洋生态保护与修复重点实验室开放基金课题(EPR2023010); 自然资源部海洋环境探测技术与应用重点实验室自主设立课题(MESTA-2022-D003)

收稿日期: 2024-06-27; 网络出版日期: 2025-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: sun_qyang@163.com

assessing and managing project effectiveness, extend project timelines, conduct long-term ecological monitoring, boost public participation, and promote the application of new technologies.

Key Words: Nature-based solutions; ecological restoration; natural restoration; cost; scale

如何正确处理好自然恢复和人工修复的关系,是习近平总书记指出的新征程上推进生态文明建设要正确处理五大关系之一^[1]。NbS(基于自然的解决方案, Nature-based Solutions)是当前国际各国学者和政府管理人员比较认可的方案,2016年IUCN(世界自然保护联盟, International Union for Conservation of Nature)首次将NbS定义为“保护、可持续管理和恢复自然的和被改变的生态系统的行动,能有效和适应性地应对社会挑战,同时提供人类福祉和生物多样性效益”。2020年IUCN发布了《NbS全球标准》,包含8大准则与28项细化指标,旨在借助自然力量,运用以生态系统为核心的方法,化解气候变化、防灾减灾、粮食安全、水资源短缺、环境污染、生态系统退化、生物多样性加速丧失等生态挑战,总结了在大尺度上发挥NbS潜力和作用的实践成果,推动其成为解决全球生态问题的方案^[2]。2022年美国发布了促进NbS实施的路线图^[3],同年,德国发布了《德国NbS应对气候和生物多样性行动计划(试行)》^[4]。而我国,早在党的“十八大”就已指出了“以自然恢复为主”的方针,“二十大”又进一步阐述了“处理好自然恢复和人工修复的关系”,这与NbS理念吻合^[5]。

海洋生态修复是一种解决生态挑战的方法,相对于“宏观”的自然力量,试图用“微观”的人力解决局部生态问题,在全球各国普遍重视保护海洋环境的背景下,不少国家开展了不同类型的海洋生态修复项目。然而,无论国内还是国外,现有和已有的海洋生态修复项目多集中在与人类生活联系比较紧密的沿海地区,类型集中在河口、海湾、砂质岸线、红树林和滩涂湿地等,与陆地生态修复项目相比,面临的难题更多^[6-7]。同时,世界各国提出的环境目标使得海洋生态修复更加迫在眉睫,2015年联合国在保护和恢复海洋生态方面提出了可持续管理保护海洋和沿海生态系统的17个目标^[8],2021年“联合国生态系统恢复十年”行动计划提出应对生物多样性丧失、气候破坏和污染加剧的三重环境威胁^[9]。党的“二十大”报告明确要提升生态系统多样性、稳定性、持续性^[10]。能否最终实现这些宏大目标,仅靠当前的海洋生态修复是不够的。

因此,研究是否能通过低成本、大面积、低干扰的人工介入,促进海洋和沿海生态系统自然演替为更健康的生态系统,对提升我国海洋生态系统多样性、稳定性、持续性以及促进我国由全球环境治理参与者到引领者的重大转变,具有重要意义。本文尝试以海洋生态修复为例,通过国内外研究成果和案例资料对比,找出目前海洋生态修复的主要问题与原因,结合收集到的国内外新技术新方法,提出降低人为干预、低成本大规模开展海洋生态修复建议与启示,为我国海洋生态系统的修复与科学管理提供参考。

1 国内外典型案例

基于国外学者研究文献资料, UNEP(联合国环境规划署, United Nations Environment Programme)等机构发布的信息,以及国内海洋生态修复项目研究资料,参考IUCN发布的NbS标准,选取体现应对生态环境退化与生物多样性丧失等方面效益的同时,还能体现气候变化和适应、经济和社会发展、人类健康、粮食安全、水安全等协同效益的项目,采用对比分析的方法,发现有潜力的新技术,总结有启发的新思路。

1.1 国外典型案例

国外典型案例美国旧金山湾滨海湿地修复^[11]、澳大利亚阿德莱德海草床修复^[12]、荷兰的“沙引擎”、美国的切萨皮克湾海岛生态修复^[13]等(表1),这些典型案例的共同点包括:

尊重自然。例如,有保留地清除互花米草,在发现互花米草是濒危鸟类重要栖息地后,暂时保留濒危鸟类分布区的互花米草,待本土种恢复后,再清除互花米草;在海岸带保护修复时,尽量少建人工硬质工程,尽量多保留和形成自然海岸;在潮间带栖息地恢复时,尽量使用本地材料,例如树枝、疏浚泥等。

注重公众参与。例如,政府相关部门、非政府组织、当地社区的部分人员一同开展工作,并引导志愿者加

入;通过社交媒体宣传等方式,增进公众对生态修复项目的了解;把享受海滩生态服务的利益相关者,例如游客、散步者、海上运动者等,与研究海滩的科学家组成协作群体,共同开展生态修复。

表 1 国外海洋生态修复案例

Table 1 Overseas cases of marine ecological restoration

时间 Time	地点 Location	修复项目 Ecological restoration projects	解决的问题 Problems solved	措施 Measures	经验启示 Experiences and enlightenments
1990 年	美国旧金山湾	滨海湿地修复	湿地开发、环境污染、气候变化、外来入侵物种等威胁	补充沉积物,对下沉和侵蚀的海岸线修复、建生态人工岛;建立保护联盟;利用生态补偿、土地役权等新理念管理;互花米草入侵防控	平衡协调利益相关方,运用湿地缓解银行的理念,寻求与金融工具干预措施合作并相互补充 总经费的很大一部分用于科研和监测项目投入,因此所开展的保护管理、湿地恢复工程有着坚实的科研基础 待土著的加州米草恢复后再进行清除等
2018 年	澳大利亚阿德莱德	海草床修复	船只系泊导致海草退化	移植海草床碎片,并在移植区附近自然恢复,消除威胁因素,将港口附近原系泊点升级,减少对海草床的破坏。	与公众和科学家合作,考虑了人工干预区域内部和周围的社区互动 精准修复(在船只系泊造成的损伤处修复) 消除或改进生态损伤问题等
2016 年	荷兰	补沙	入海口运沙量逐渐减少	利用潮汐、波浪、风力补沙,使沙滩沿着海岸自然伸展和加固,自然恢复植被	项目验收 6 年后仍持续发挥效益,补沙范围由 2 公里持续扩展至 5 公里,发挥综合效益的时间可能超预期为社区居民提供了游憩空间等
2021 年	美国切萨皮克湾	恢复栖息地、增强海岸带韧性	海平面上升导致该岛面积从近 193hm ² 减少至 31hm ²	该岛的栖息地总面积增加一倍	修复工程优先考虑使用当地已有材料,例如树枝、石头和疏浚物提高了防灾减灾能力,增加了气候变化的适应性

1.2 国内典型案例的启示

2010 年来,我国以海域使用金返还的形式也支持了多个海洋生态修复项目,2016 年起国家支持沿海开展的规模更大的“蓝色海湾”项目^[14],2018 年实施的渤海综合治理攻坚战^[15],2019 年起实施的海岸带保护修复工程^[16],2020 年香港实施的牡蛎礁恢复项目等^[17]。此外,还有地方资金支持的海洋生态修复项目^[18](表 2),这些典型案例的共同点包括:

发挥制度优势。注重自上而下的生态修复理念贯彻,从顶层设计上就树立山水林田湖草海生命共同体的理念,以及长时间序列开展生态修复的决心。

以人为本。充分考虑到生态修复项目所在地人口、资源、环境的压力水平,在保护自然、维持生态安全底线的前提下,努力平衡居民生活水平提高、生态环境保护对资源需求的矛盾,形成更稳定的人与自然和谐共生的解决方案^[19]。

2 国内外海洋生态修复面临的问题

尽管国内外的海洋生态修复出现了一些典型案例,但是仍面临人为干预多、NbS 理念贯彻少、成本高、投资高、风险大、存活率偏低等问题。

2.1 修复成本高

当前海洋生态修复成本普遍比内陆淡水生态系统、热带雨林、温带森林、灌木林生、草地高 10—400 倍^[6],

Elisa Bayraktarov 2016 年对全球 954 项海洋生态修复项目的研究表明:全球珊瑚礁、海草、红树林、盐沼、牡蛎礁生态修复项目成本的中位数为 80 000USD/hm²,平均数更是高达 1 600 000USD/hm²(换算成 2010 年价格),该成本只是直接实施成本,如果计算项目运营成本,实际总成本可能还要高出 2—4 倍^[6]。海洋生态修复项目成本在全球各国间有较大差异,发展中国家总的恢复成本要便宜得多^[10],发达国家例如澳大利亚、欧洲和美国成本高,但是大多数海洋生态修复项目又是在这些成本高的国家实施的。

表 2 国内海洋生态修复典型案例
Table 2 Domestic cases of marine ecological restoration

时间 Time	地点 Location	修复项目 Ecological restoration projects	解决的问题 Problems solved	措施 Measures	经验启示 Experiences and enlightenments
1988 年起 From 1988	厦门	滨海湿地修复、海湾水动力恢复、流域污染防治	海平面上升使得风暴潮灾害加剧,城市排水排污降低、原生红树林面积下降,海堤限制海水水体交换、泥沙淤积等	破堤建桥、退垦还海,加强采砂管理,防治流域污水、恢复河流自然形态,种植红树林,营造白鹭栖息	加强顶层设计,吸引社会资本参与,开展大规模、多尺度、长时间序列的生态保护、修复和管理 城市生态改善促进招商引资、旅游开发、社区居民体育锻炼、社会和谐等综合效益
2016 年	浙江省温州市	海岸带和海岛海域生态修复	岸线侵蚀、海域污染、景观破碎化	沙滩整治和修复、沿海生态景观廊道建设,陆源污染物和近岸固废防控	加强巡查执法 吸引民营企业,探索民营资本参与生态修复的模式 为社区居民提供更健康的环境

我国实施中央资金支持的海洋生态修复项目是从 2010 年开始,晚于欧美等发达国家,但是发展迅速。早期的资金来源是中央分成的海域使用金和海岛保护专项资金,即将一部分收取的海域使用金进行生态修复,之后转变为由中央财政资金支持,此外,地方也投入了大量资金用于海洋生态修复^[20]。与国际相比,我国的海洋生态修复成本低于发达国家。以珊瑚礁为例,珊瑚礁被公认为最昂贵的海洋生态修复系统类型^[21],换算成 2010 年美元计算,发达国家珊瑚礁修复成本平均数为 12 125 179USD/hm²,发展中国家 377 104USD/hm²^[6-7]。

海洋的水文、水环境、气象、底质条件等影响因素复杂多样,再加上技术不成熟、成功率低等因素,均导致了成本高。此外,成本高另一个值得深思的原因是全球范围内资源和难易程度不匹配。最适合进行海洋生态修复的地区可能是经济不发达的发展中国家和地区,但是这些国家和地区往往缺乏资金和技术,发达国家有资金有技术,却可能选择在成本高的本国开展生态修复,其本国所在地修复适宜度可能比不上需要开展生态修复的发展中国家。发展中国家在开展生态修复项目的同时,还可以做慈善公益、社区扶贫,并能产生更多效益,如果换算成平价购买力,发展中国家海洋生态修复成本比发达国家低 200 倍^[6]。例如,印度尼西亚拥有世界最大的珊瑚礁生态系统、最高的珊瑚礁生物多样性和最多的特有种,但是,该国也是人均收入最低的国家之一,海洋生态修复资金匮乏,然而发达国家的生态修复资金没有优先投向这些生态修复成本低、收益高的国家,这种不均衡拉高了全球珊瑚礁生态修复成本。

2.2 修复效果不理想

当前国际上海洋生态修复的成功率多以修复对象的存活率评估,存活率低代表效果不理想,而且不同海洋生态修复类型效果差距较大。全球 5 种常见海洋生态修复类型的存活率中位数从高到低依次是:盐沼 64.8%、珊瑚礁 64.5%、牡蛎礁 56.2%、红树林 51.3%、海草 30.8%^[6]。一些修复困难地区成活率更低,例如,日本在冲之鸟礁等海域通过无性繁殖移植了超过 30 万个珊瑚群,4 年后存活率大多低于 20%,导致其在短短十年内丧失了 400hm²珊瑚礁的填海造地辩护权^[22]。由于生态修复监测数据多来源于生态修复后的 1—2 年内评估数据,而且更多来源于成功修复的案例,失败的案例没有被统计,这可能导致实际修复成功率数据比研究人员计算出的数据更低。与其他国家一样,中国同样存在这些问题,对一些不常见的海洋生态系统类型的修复,例如某地麒麟菜生态修复存活率低于 20%。

对修复成功率低的原因分析发现:一是不同海洋生态系统类型修复差异大,例如,海草修复成功率低,而珊瑚礁和盐沼相对较高,这与修复的难度有关系,海草的种子获取、萌发、固着、养护等环节都比较困难;二是修复技术差异,例如,移植成年珊瑚枝比移种珊瑚幼虫或卵的成功率更高;三是选址不当、随机事件或人为干扰,例如红树林种植高程不够、台风、污染等^[6]。

2.3 修复规模小

海洋生态修复规模小,修复的规模与退化规模不匹配。大多数海岸带生态系统修复不超过 10hm²,而需要修复的规模则为 10—1 000 000 hm²。即使是全世界所有海洋生态类型修复规模最大的红树林,其修复面积仍赶不上退化面积。而且,海洋生态修复项目大部分集中在海岸带地区^[6],更大范围的海洋极少有生态修复。这不能充分发挥海洋对调节地球生态具有的巨大优势,例如碳汇潜力巨大、生态服务功能影响深远等。

海洋生态修复长期面临规模小难题的直接原因是成本高、效果不理想、投资风险大等^[7]。

2.4 修复类型少

对比 IUCN 公布的海洋生态系统类型,已有的海洋生态系统修复类型仅占总类型的 40%(表 3)。涉及较

表 3 IUCN 发布的与海洋有关的生态系统类型目录表

Table 3 List of marine related ecosystem types published by IUCN

一级分类 Level-1 classification	二级分类 Level-2 classification	三级分类 Level-3 classification	当前是否有该项生态修复类型 If this type of ecological restoration has been implemented
淡水-海洋 Freshwater-marine	半封闭过渡水域	沿海深水入口	无
		永久开放的河岸河口和海湾	有
大洋 Marine	海洋大陆架	间歇性封闭和开放的湖泊和泻湖	有
		海草床	有
		海藻场	有
		透光的珊瑚礁	有
		牡蛎礁	有
		光线有限的海洋动物聚集区	有
		潮下基岩岸线	无
		潮下沙质岸线	有
		潮下淤泥质岸线	有
		上升流	无
	远洋海域	表层海水	无
		中层海水	无
		深海海水	无
		极深海海水	无
		海冰	无
		大陆坡和海岛坡	无
	深海海底	海洋峡谷	无
		深海平原	无
		海底山脉、山脊和高原	无
		深水生物海床	无
		深渊的大洋沟槽	无
		基于化学合成的生态系统	无
	人工海洋系统	水下人工构筑物	有
		人工海水养殖场	有
海洋-陆地 Marine-terrestrial	海岸带生态系统	基岩海岸	无
		淤泥质海岸	有
		沙质海岸	有
		碎石和卵石海岸	有
	潮上带生态系统	海岸灌木和草地	有
	人工岸线	人工岸线	有
海洋-淡水-陆地 Marine-freshwater-terrestrial	咸淡水交汇的潮汐生态系统	沿海河流三角洲	无
		潮间带森林和灌木丛(例如红树林)	有
		滨海盐沼和芦苇(例如盐沼)	有

依据 IUCN 发布的全球生态系统类型目录

多的修复类型是二级分类海洋大陆架、海岸带、微咸潮下的海草床、透光的珊瑚礁、牡蛎礁、沙质海岸、红树林、盐沼。主要缺失的类型是二级分类的河口、潮下带、远洋海域、深海海底等,原因可能是这些生态系统能够对海岸带居民提供直接的生态服务,有较明显的价值,而且离人类活动区域较近,大部分位于领海以内,受人类活动影响较大,因此沿海国政府更重视。远洋、深海等生态系统,人类对其了解有限,尚不具备对其进行生态修复的能力。例如,一些远洋生态系统,物质交换贫乏,浮游植物生长受限,生物量显著偏低,被称为“海洋荒漠”,全球气候危机又使其面积扩大,人类经历几千年的科技进化才具备了部分陆地荒漠生态修复的能力,然而面对海洋荒漠时却没有有效的修复技术。

2.5 人为干预多

人为干预对修复失败的影响较大^[6],主要包括选址不当、人为干扰等因素。不合适的水文、波浪和水流能量、沉积、底质、高程、温度等复杂条件对人为选址提出了很高的技术要求,人工设计可能无法准确计算和预测这些条件。因此,历史上自然存在的生态系统才是更适合的修复方案指导。人为干预的另一个误区是设定刚性的项目目标和工程量值,当前项目目标多为人类定义的状态,而非自然发育的最终状态,由于难以计算影响生态系统发育的所有因素,人类定义的项目目标可能是理想化的,由此推出的工程量指标可能是无意义的(例如土方量、种植或移植株数、面积)。此外,项目实施后,有可能会反复出现人为干扰,影响恢复。

人为干预多的原因可能是没有贯彻 NbS 的理念,或者没有 NbS 理念的实施方法,例如没有更好的项目目标设定、竣工验收、考核评估的方法,只能使用工程目标计算成本,以满足投资方验收要求。

3 海洋生态修复面临问题的原因分析

前文所述修复成本高、类型少、规模小等问题,可能是在发展理念、技术应用、公众参与方面需要改进,由于生态修复涉及学科广,本文从跨学科的角度,讨论分析解决问题的思路,并提出建议。

3.1 发展理念方面

扩大投资固然能促进海洋生态修复扩大规模,但是,海洋生态修复的成功率与投资成本之间的正相关不明显,与之对比,陆地生态修复的成功率与投资的正相关性就比较明显^[11],原因在于陆地生态系统修复经验更丰富,可因地制宜选择的修复技术更多,因此投资时可以选择成功率高的修复技术,投资风险相对较小。然而,由于海洋的复杂性更高,海岸带生态系统常被海水淹没,受到波浪能和其他环境条件大幅波动的频率高,海洋生物在进化树上的层级较低、耐受性较差(例如珊瑚是无脊椎动物,对环境耐受性有限),可供海洋生态修复的投资者选择的技术不多。因此,短期内过于强调投资规模可能并不能达到与资金规模相匹配的效果。

当前国际的海洋生态修复项目大多数以工程或研究的方式设计,项目持续时间不超过一到两年,期限短,不利于后期评估,而完全修复可能需要几十年到几个世纪。例如,红树林至少需要 20—25 年才能成林。用一般的建设工程理念设计生态修复项目是不合适的,设计理念和验收时效亟待改进。国内一些生态修复项目也存在工程思维,并未贯彻基于自然的解决方案(NbS),人工修复的意愿和手段过于强烈,生态修复项目短期内在较小的范围内大规模人工干预,不利于资金利用率和生态修复效果提高,而且一旦财政资金支持减弱,之后的海洋生态修复可能不能持续。分析原因,可能是当前还没有一种适合生态修复项目这种长时间、大规模、低干预、系统性复杂项目的设计、管理、考核办法,对于“功在当下、利在千秋”的长期项目,缺乏除精神奖励以外的科学客观考核指标,只能参照建设工程项目,这并不合适。除了要考虑长期考核指标外,短期内的经济发展也需要考虑,注重生态修复短期效益与长期效益相结合,有助于降低生态修复成本,提高效益。例如,建立珊瑚繁殖车间、红树林苗圃基地等相关配套设施,能够发展经济,降低生态修复成本,提高成功率。

3.2 技术应用方面

技术发展方向问题。以珊瑚礁为例,当前对珊瑚礁生态修复侧重于小规模和实验性的技术发展,而不是研究已有方法能在哪些区域低成本、大规模、高成功率地应用,这不利于大规模开展珊瑚礁生态修复。原因可能是当前缺乏地区乃至全球的海洋生态修复整体规划布局。

海洋生态修复评估技术不完善。陆地生态系统评估方法复杂,包括生物多样性数据、植被结构、生态过程等,而当前海洋生态修复评估简单,重要指标是修复对象的短期存活率。我国海洋生态修复一般要求竣工后 1 年内验收,验收后要求 3 年管护。例如,海南珊瑚礁验收时间是移植后 1 年内,1 年内做 3 次监测,要求存活率 75%;广东红树林验收时间是种植后 1 年内,2—3 年开展成效评价,要求 3 年成活率在滩涂区 $\geq 60\%$,退塘区 $\geq 70\%$ ^[23]。原因是工程验收需要,以及海洋生态修复评估数据难以获得,例如生物多样性数据、植被结构、生态过程等^[24]。

近年来一些海洋生态修复相关的新技术值得关注,这些技术或是借助自然动力,或是在降低成本方面有潜力。例如美国将疏浚泥用于海岸带湿地建设和生态修复工程、荷兰的“沙引擎”等案例^[25—26],美国马里兰州 2008 年起利用巴尔的摩港的疏浚泥,建造了 80% 的低滩湿地和 20% 的高滩湿地,并加以一定的肥料种植盐沼植物,形成稳定生态系统,修复后人工维护少,成本低;荷兰 2011—2016 年定点投放大量沙源,任由自然动力大规模输沙至大范围海滩,提高补沙功效,降低成本,减少对人为的干扰,效果比原本每 5 年一次填沙补沙工程更稳固。微地形改造是另一种有前景的技术,通过微地形改造,促进水文条件改变、减小潮波能量影响、改进基质,例如山东东营通过对沿海滩涂微地形改造,从远海到近岸采用机械与人工撒播相结合,修复盐沼和滩涂^[27]。无人设备可以在小区域、通行困难地区快速获取数据、提高修复效率,降低成本,例如,监测滩涂湿地入侵种互花米草、监测林木株数密度等^[28—29],精确评估修复效果。珊瑚有性繁殖技术可以解决珊瑚礁修复种源问题并提高生物多样性,例如基于 NbS 理念在涠洲岛海域开展的受损珊瑚礁有性繁殖修复,解决了受损珊瑚礁生态系统恢复自我维持繁殖种群的关键问题,并避免无性移植修复可能造成的遗传结构单一,以及外来物种对土著物种的影响及对珊瑚移植来源地的破坏^[30—31]。

3.3 公众参与方面

发达国家在本国及发展中国家开展的海洋生态修复项目比较注重公众参与和社区效益。例如欧盟支持的在印尼开展的红树林修复,与当地社区减贫相结合,达到生态和社会的综合效益。国内这方面还有差距,这可能与国内沿海相对内陆经济较发达有关。

4 建议

基于发现的问题和分析,以及获得的资料和启迪,本文对低成本大规模开展生态修复,提出了相关建议。

4.1 全程贯彻“自然恢复为主、人工修复为辅”理念设计项目,解决修复理念的问题

树立地球生命共同体的理念,实现由全球环境治理参与者到引领的重大转变。海洋生态修复应走出国门,不单纯以完成国内任务为目标,而是以修复全球范围内受损海洋生态系统为目标,并遵循有所为,有所不为的原则,如一些生态修复项目在贫穷国家投资可能效果更好,可考虑以一定的援助资金形式开展面向东南亚或南亚等地区的红树林、珊瑚礁等生态修复项目,发展碳汇增汇,为国内企业争取国际碳汇增汇认证,并帮助减轻当地贫困,扩大中国影响力。当然,在开展生态援助项目的同时,还需关注受援助国家可能面临的腐败和欺诈等问题,以增强投资抗风险能力。

生态修复中应当更多依靠自然恢复的驱动力而非人工为主的干预,如发展大规模海岸带微地形改造。例如,借鉴美国、荷兰开展生态修复的经验,在河口外围构筑大规模潜堤,通过河口水沙自然驱动力,加快河口地形的自然演化速度,逐渐形成适合红树林或盐沼、海草床自然生长的地形,通过观测自然演化的生态系统类型,设计开展何种类型生态修复,通过低人工干预后交给自然演替,实现低成本大规模的目的。

延长生态修复项目时间。一些生态系统类型如果干扰因素消失,可能会自己恢复,无需人类修复。例如珊瑚礁退化地区,如果水文条件合适,只需人工提供自然繁殖体,15—30 年内就会发生自然演替。因此,要延长生态修复项目时间,并开展长期监测。

海洋生态修复设计要更关注规模、成本和效益。设计、评估海洋生态修复项目应更关注规模、生态系统服务功能、社会经济效益。例如,海岸带生态修复最终目标是提供长期的生态产品和服务;沙滩修复绩效指标设

定时,除长度和补沙量外,还要有多年稳定状态下沙滩面积。

4.2 大力发展海洋生态修复科研,解决成本、效果、规模问题

以生态系统分布特征而不是行政边界开展生态修复布局规划,开展周边沿海国乃至全球的海洋生态修复整体研究,在此基础上整体规划全国的海洋生态修复。搞清受损原因,按修复成本、修复效益、修复规模等因素排序,分区分类分时,对轻微受损至严重受损的区域实施生物资源、栖息环境修复。

开展多种生态类型共同修复技术研究。例如,在多米尼加,人们尝试将红树林、珊瑚礁共同修复,在水下部分布置促进珊瑚礁成长的附着基,附着基的上部有淤泥,种红树,这种多用途的修复设计思路值得研究。

开展深远海海洋生态修复探索。面积广大的“海洋荒漠”可能在提高生物量、促进海洋渔业资源恢复、提高应对全球气候变化能力方面有重要作用。在营养跃层的适合水深处,放置促进营养物流动和生物固着的设施,提高生物量和生物多样性。

鼓励发展海洋生态修复新技术的试点应用,评估修复成本、效果,即使大量的小规模创新失败,也可以为接下来的海洋生态修复技术进步积累经验,可能比效果不佳的大规模修复项目更有意义。

4.3 通过加大公众参与,解决修复成本、效果问题

社区和志愿者的参与对降低生态修复项目成本有重要作用。如果缺乏足够的公众参与,即使短期降低了海洋生态修复成本,也可能是以当地公众增加生活成本为代价的。因此,生态修复要与发展经济项目相结合,让社区和公众多参与,及时把知识和技术在科学家、社区成员和行政管理机构之间互相传递,有助于决策者和科学家及时从生态修复失败中吸取教训,有助于公众在生态修复中获得利益,激发公众呵护生态环境的内生动力和能力。

参考文献 (References):

- [1] 孙金龙, 黄润秋. 全面推进美丽中国建设 加快推进人与自然和谐共生的现代化. 中国生态文明, 2024(1): 6-8.
- [2] 何璆. IUCN 制定首个基于自然的解决方案全球标准. 中国林业产业, 2021(7): 72-73.
- [3] Alaina D Kinol, Johan Arango-Quiroga, Laura Kuhl. Opportunities for nature-based solutions to contribute to climate-resilient development pathways. *Current Opinion in Environmental Sustainability*. 2023(62):101297.
- [4] 孙雨芹, 罗明, 曾楠, 张琰. 德国基于自然的解决方案行动计划概述和启示. 中国土地, 2023(5): 54-57.
- [5] 盛连喜. 生态环境修复重在尊重自然友善辅助——关于处理好自然恢复与人工修复关系的几点思考. 中国生态文明, 2023(3): 41-43.
- [6] Bayraktarov E, Saunders M I, Abdullah S, Mills M, Beher J, Possingham H P, Mumby P J, Lovelock C E. The cost and feasibility of marine coastal restoration. *Ecological Applications*, 2016, 26(4): 1055-1074.
- [7] Saunders M I, Doropoulos C, Bayraktarov E, Babcock R C, Gorman D, Eger A M, Vozzo M L, Gillies C L, Vanderklift M A, Steven A D L, Bustamante R H, Silliman B R. Bright spots in coastal marine ecosystem restoration. *Current Biology*, 2020, 30(24): R1500-R1510.
- [8] Hák, Tomáš, Svatava Janoušková, Bedřich Moldan. Sustainable Development Goals: A need for relevant indicators. *Ecological indicators*. 2016 (60): 565-573.
- [9] 王浩, 欧阳德龙, 徐飞. 联合国生态系统恢复十年指导原则与实践标准研究进展[J]. 环境科学与管理, 2024, 49(08): 10-15.
- [10] DE Groot R S, Blignaut J, VAN DER Ploeg S, Aronson J, Elmqvist T, Farley J. Benefits of investing in ecosystem restoration. *Conservation Biology*, 2013, 27(6): 1286-1293.
- [11] 张明祥, 鲍达明, 王玉玉, 刘宇. 美国旧金山湾滨海湿地保护与管理的经验及启示. 湿地科学与管理, 2015, 11(1): 24-28.
- [12] Elizabeth A. Sinclair, Craig D. H. Sherman, John Statton, Craig Copeland, Andrew Matthews, Michelle Waycott, Kor-Jent van Dijk, Adriana Vergés, Lana Kajlich, Ian M. McLeod, Gary A. Kendrick. Advances in approaches to seagrass restoration in Australia. *Ecological Management & Restoration*. 2021(1): 10-21.
- [13] 景观中国. NbS 最佳实践-帕森斯岛生态保护与更新计划. 2023-08-16 来源: 景观中国网. (2023-08). [2024-8-14]. <http://www.landscape.cn/article/67950.html>.
- [14] 龚虹波, 陈金阳, 李加林. 海湾环境治理绩效的驱动路径——基于 17 个蓝色海湾整治网络的模糊集定性比较分析[J]. 中国行政管理, 2024, 40(10): 106-117.
- [15] 赵博, 张盼, 于永海, 孙家文, 王平, 张连杰, 张广帅. 渤海海洋生态修复现状、不足及建议. 海洋环境科学, 2021, 40(6): 975-980.
- [16] 浙江省自然资源厅海洋预警预报处. 浙江省海岸带保护修复工程取得重大成果. 浙江国土资源, 2022(7): 10.

- [17] Lau S C Y, Thomas M, Hancock B, Russell B D. Restoration potential of Asian oysters on heavily developed coastlines. *Restoration Ecology*, 2020, 28(6): 1643-1653.
- [18] 范冰雄, 李杨帆, 张雪婷, 李艺. 海岸带区域陆海统筹生态安全研究. *生态学报*, 2023, 43(3): 962-972.
- [19] 吴一凡, 艾瑶, 郑忠禄, 庄敏, 丁振华. 厦门四个红树林湿地修复工程成效评估. *生态学杂志*, 2023, 42(10): 2419-2424.
- [20] 徐淑升, 严淑青, 谢素美, 贾后磊. 海洋生态修复项目监管的现状、问题与建议. *海洋开发与管理*, 2022, 39(10): 86-90.
- [21] 李元超, 黄晖, 董志军, 练健生, 周国伟. 珊瑚礁生态修复研究进展. *生态学报*, 2008, 28(10): 5047-5054.
- [22] 蔡榕硕, 郭海峡, ABD-ELGAWAD Amro, 牛文涛. 全球变化背景下暖水珊瑚礁生态系统的适应性及修复研究. *应用海洋学学报*, 2021, 40(1): 12-25.
- [23] DB44/T 2410—2023. 红树林生态修复工程评价技术规程[S]. 广州: 广东省市场监督管理局, 2023.
- [24] 林雪萍, 李昌达, 姜德刚, 刘建辉, 黄博, 吾娟佳. 蓝色海湾评估体系构建及初步应用研究——以温州市洞头区为例. *海洋开发与管理*, 2020, 37(5): 46-51.
- [25] Rebelo C, Rodrigues A M, Tenedório J A. Dasymetric mapping using UAV high resolution 3D data within urban areas. *Remote Sensing*, 2019, 11(14): 1716.
- [26] 黄华梅, 高杨, 王银霞, 娄全胜, 谢健. 疏浚泥用于滨海湿地生态工程现状及在我国应用潜力. *生态学报*, 2012, 32(8): 2571-2580.
- [27] 袁秀, 孙燕燕, 王计平, 于莉莉. 基于水鸟栖息地恢复的黄河三角洲水资源综合利用策略[J]. *资源科学*, 2020, 42(01): 104-114.
- [28] 周在明, 杨燕明, 陈本清. 基于无人机遥感监测滩涂湿地入侵种互花米草植被覆盖度. *应用生态学报*, 2016, 27(12): 3920-3926.
- [29] 彭仲韬, 金光泽, 刘志理. 小兴安岭三种槭树叶性状随植株大小和林冠条件的变异. *植物生态学报*, 2024, 48(6): 730-743.
- [30] Amro Abd-Elgawad, Rongshuo Cai, Ahmed Hellal, Mohamed Eltabakh, Haixia Guo, Hala Mohamed F, Changan Xu, Mohamed Abou-Zaid. Implementing a transformative approach to the coral reefs' recovery phase[J]. *Science of The Total Environment*, 2023, 879: 163038.
- [31] Mohamed H F, Abd-Elgawad A, Cai R S, Luo Z H, Pie L L, Xu C G. Microbial community shift on artificial biological reef structures (ABRs) deployed in the South China Sea. *Scientific Reports*, 2023, 13(1): 3456.