

Doi: 10.11840/j.issn.1001-6392.2021.06.001

# 典型海洋生态系统生态修复成效评估 研究进展与展望

吴霖<sup>1</sup>, 欧阳玉蓉<sup>1,2,3</sup>, 吴耀建<sup>1,2,3</sup>, 蔡灵<sup>1</sup>, 戴娟娟<sup>1</sup>

(1. 自然资源部第三海洋研究所, 福建 厦门 361005; 2. 自然资源部海洋生态保护与修复重点实验室, 福建 厦门 361005; 3. 福建省海洋生态保护与修复重点实验室, 福建 厦门 361005)

**摘要:** 近年来, 海洋生态系统生态修复成效评估研究日益受到关注。本文梳理了国内外在红树林、珊瑚礁、海草床、盐沼湿地等四类典型海洋生态系统生态修复成效评估指标和评估方法方面的研究进展。结果表明, 典型海洋生态系统在进行生态修复成效评估时, 基于修复目标和修复方法, 评估指标选取虽各有侧重, 但主要包括生物和生境状况两个方面。多数生态修复项目的监测、评估都是在短期内进行的, 缺乏长期、连续性监测, 社会和经济相关指标的研究还相对较为缺乏。成效评估方法目前还没有比较清晰、全面的分类。实际应用的评估方法较为单一, 对海洋生态系统服务价值揭示不够全面。建议未来应立足生态系统过程, 加强各典型海洋生态系统生态修复中长期成效评估, 开展基于生态修复方式的成效评估, 以及社会经济文化效益评估等方面的研究。本文通过对成效评估指标和方法的梳理, 以期更好地为典型海洋生态系统生态修复成效评估的理论和实践研究提供参考。

**关键词:** 海洋生态修复; 成效评估; 海洋生态系统; 评估方法; 评估指标

中图分类号: P735; X170.60

文献标识码: A

文章编号: 1001-6932(2021)06-0601-08

## Progress and prospects of research on evaluation of ecological restoration effectiveness of typical marine ecosystem

WU Lin<sup>1</sup>, OUYANG Yurong<sup>1,2,3</sup>, WU Yaojian<sup>1,2,3</sup>, CAI Ling<sup>1</sup>, DAI Juanjuan<sup>1</sup>

(1. Third Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Xiamen 361005, China; 2. Key Laboratory of Marine Ecological Conservation and Restoration, Ministry of Natural Resources, Xiamen 361005, China; 3. Fujian Provincial Key Laboratory of Marine Ecological Conservation and Restoration, Xiamen 361005, China)

**Abstract:** The evaluation of the effectiveness of ecological restoration of marine ecosystems have received increasing attention in recent years. This paper reviews the domestic and foreign research progresses in the evaluation indicators and methods of ecological restoration of four typical marine ecosystems, including mangroves, coral reefs, seagrass beds, and salt marshes. Results show that when evaluating the effectiveness of ecological restoration in typical marine ecosystems, based on restoration goals and methods, although the selection of evaluation indicators has its own focus, it mainly includes two aspects: biological and habitat conditions. The monitoring and evaluation process of most ecological restoration projects are carried out in a short period of time. Long-term, continuous monitoring researches on social and economic indicators are still relatively lacking. There is currently no clear and comprehensive classification of effectiveness evaluation methods. The evaluation methods in actual application are relatively limited, unable to comprehensively reflect the value of marine ecosystem services. It is recommended to strengthen the evaluation of the mid-term and long-term effectiveness of the restoration based on the process of typical marine ecosystems. The evaluation of the effectiveness of restoration methods and

收稿日期: 2021-06-19; 修订日期: 2021-08-15

基金项目: 自然资源部海洋生态修复技术标准体系建设与规划编制研究

作者简介: 吴霖 (1997—), 硕士研究生, 主要从事海洋生态修复研究。电子邮箱: wulin@tio.org.cn

通讯作者: 欧阳玉蓉, 高级工程师, 主要从事海洋生态评估与生态修复、海洋环境影响评价、海洋环保规划相关研究。

电子邮箱: ouyangyurong@tio.org.cn

the evaluation of social, economic and cultural benefits are also needed. Through combing the effectiveness evaluation and methods, this paper aims to provide a better reference for the theoretical and practical researches on the effectiveness evaluation of ecological restoration of typical marine ecosystems.

**Keywords:** marine ecological restoration; effectiveness evaluation; marine ecosystem; evaluation method; evaluation index

典型海洋生态系统包括红树林、珊瑚礁、盐沼湿地、海草床等，它们具有极高的生物多样性和生产力，为人类提供了丰富的自然资源、为海洋生物提供了产卵和养育的场所、同时保护生态海岸以防受到海浪和飓风等侵蚀（王丽荣等，2018；童晨等，2018）。然而，受大规模围填海工程、入海污染物大量排放、过度捕捞、近海油气矿产资源的开发与密集运输等人类活动影响（Zhao et al, 2016; Ladd et al, 2019），以及全球气候变化、自然灾害等自然因素的共同作用，典型海洋生态系统出现了诸如生境丧失、资源衰减、富营养化，以及水动力条件紊乱和生物多样性下降等一系列生态系统退化问题（童晨等，2018）。据研究，全球约80%的滨海湿地、35%的红树林、20%的珊瑚礁及近29%的海草床资源已丧失或退化（Maynard et al, 2016; Valiela et al, 2001; Blasco et al, 2001; Waycott et al, 2009）。我国自20世纪50年代以来，近50%的红树林已经消失；珊瑚礁面积从20世纪90年代以来减少了80%；当前约14%（10种）的海草种类面临灭绝（陈彬等，2019）。

随着退化程度的日益加剧，海洋生态修复受到国内外高度关注。海洋生态修复是在停止或减少人为干扰的基础上，采用适当的生物、生态及工程技术辅助，使受损海洋生态环境得以恢复到原来或与原来相近的结构和状态（姜欢欢等，2013；钱伟等，2018）。目前海洋生态修复的理论与方法研究，主要集中在生态系统退化诊断及退化机制研究、生态修复技术方法研究等方面，而在生态修复成效评估方面的研究较为缺乏。现阶段各典型海洋生态系统已在不同区域，针对其生态退化诊断结果实施了大量的生态修复工程，亟须开展成效评估相关研究，以判定生态修复成效，及时纠正误区，满足适应性管理的需要。

本文回顾了近年来国内外红树林、珊瑚礁、海草床、盐沼湿地4类典型海洋生态系统的生态修复成效评估研究，通过系统总结生态修复成效评估指标和评估方法两个方面的研究进展，指出目前存在

的问题，并对今后的典型海洋生态系统成效评估研究内容进行了展望，以期提高修复成效评估指标及方法的科学性和可操作性，促进典型海洋生态系统生态修复研究。

## 1 成效评估指标

评估指标是进行生态修复成效评估研究的关键。随着对典型海洋生态系统研究的深入，大量的指标被引入生态修复成效评估体系中，更多的指标固然可以更加全面地反映生态修复的成效，但也会带来指标的重复且大大增加评估的工作量。因此，目前生态修复成效评估面临的主要问题就是如何选取评估指标，如何建立指标体系。本文重点梳理了理论与实践研究中常用的评估指标，为相应研究的开展提供借鉴和参考。

### 1.1 海草床生态修复成效评估指标

海草床生态修复的主要方法有种子法、植株移植法和生境修复法（Zhao et al, 2016），相应的成效评估指标大致划分为海草群落、生物多样性、水环境和底质环境等。其中，海草群落指标反映了生态修复后海草床植被的恢复情况，是评估海草床生态系统修复状况最常见的指标（Muko et al, 2011; Statton et al, 2012; Susan et al, 2014; Scapin et al, 2019），其具体指标包括海草覆盖率（陈石泉等，2021）、海草种类组成（Fonseca et al, 1996; Scapin et al, 2019）、海草枝条密度（Fonseca et al, 1996; Scapin et al, 2016）、海草冠层高度（Fonseca et al, 1996; Sheridan, 2004）等。由于海草覆盖率指标更为直接有效，很多项目甚至只考虑这一项指标。除此以外，海草群落指标还包括了移植单元成活率、修复斑块新分枝率和播种萌发后的成活率等（李森等，2010; Scapin et al, 2019; 陈石泉等，2021），这些指标在种子法和植株移植法的成效评估中尤为重要。生物多样性指标主要有游泳生物、底栖生物的种类和生物量等指标（Fonseca et al, 1996; Scapin et al, 2016, 2019; 宁秋云等，

2020), 还可考虑用一些具体的指示物种来评估海草床生态修复效果 (Scapin et al, 2016)。宁秋云等 (2020) 在评估基于移植法的广西竹山海草生态修复项目成效时, 选取的生物多样性指标有浮游动植物多样性和底栖生物多样性, 该研究还引入了社会和工程管护指标, 其中, 工程管护性指标包括了管护制度建立情况、管护经费和人员有效性、警示标牌有效性、病虫害情况、监测情况等。

在非生物指标方面, 反映海水物理特征的水环境指标有盐度和水温等 (Fonseca et al, 1996; Sheridan 2004; Muko et al, 2011), 还有底质环境指标即沉积物指标, 包括有机物含量和沉积物粒度等 (Fonseca et al, 1996; Sheridan, 2004)。

在一些海草床生态修复成效评估中, 还会考虑社会和经济指标, 如王明 (2015) 在评估基于种子法的庙岛群岛大叶藻生态修复中, 考虑了修复投入产出比、渔业产品商用率等经济指标, 以及管理结构合理性、管理者素质、教育科研和休闲旅游等社会指标。

海草床生态系统生态修复成效评估指标的选取与修复方法密切相关, 除了一些通用的指标外, 不同修复方法的指标选取各有侧重。在海草床生态修复项目监测、评估时间方面, 大多数项目的监测、评估都是在短时间内进行的, 缺乏连续长期的监测, 有研究认为理想的监测时长应为 5 年以上 (Muko et al, 2011; Statton et al, 2012)。

表 1 常见海草床生态修复成效评估指标

修复方法	指标	具体指标	使用现状
生境修复法	水环境、底质环境、生物多样性、海草群落	盐度、水温、有机物含量和沉积物、游泳生物的种类和生物量、底栖生物的种类和生物量、指示物种、海草覆盖率、海草种类组成、海草枝条密度、海草冠层高度	生境修复法与其他修复方法常结合使用, 已有研究对水文指标考虑较少; 选用指示物种进行评估时, 指示物种的代表性不确定; 缺乏连续、长期监测
植株移植法	海草群落、生物多样性	海草覆盖率、海草种类组成、海草枝条密度、海草冠层高度、移植单元成活率、修复斑块新分枝率	海草群落指标较为常见; 缺乏连续、长期监测
种子法	海草群落、生物多样性	海草覆盖率、海草种类组成、海草枝条密度、海草冠层高度、种子萌发率、萌发后幼苗成活率	
-	社会、经济	工程管护指标、修复投入产出比、渔业产品商用率、教育科研和休闲旅游等	目前使用较少, 指标的合理性和可操作性还有待研究

## 1.2 珊瑚礁生态修复成效评估指标

已有的珊瑚礁生态修复方法有构建人工珊瑚礁法、构建人工礁结合珊瑚移植法、珊瑚幼虫收集-培养-移植法、珊瑚有性繁殖法、珊瑚杂交培育法、珊瑚礁噪音模拟法等 (郑新庆等, 2021), 其中, 前三种方法较为常见, 成效评估研究也主要围绕这三种方法展开。目前, 针对不同生态修复方法的成效评估指标研究已较丰富, 但仍未形成一套标准化的指标体系 (Hein et al, 2017)。已有的指标主要是生态指标, 集中在生物指标和环境指标两方面。常用的生物指标有移植珊瑚生长状况、移植珊瑚存活率、珊瑚盖度等 (Muko et al, 2011; 李元超等, 2014; Hein et al, 2017; 郑新庆等, 2021), 这些都是最广泛运用于表征珊瑚礁生态修复情况的指标。其他生物指标还有硬珊瑚补充量、珊瑚种类多样性、珊瑚健康状况、珊瑚结构复杂性、珊瑚幼虫相关指标、礁栖生物多样性和生产力等 (McClanahan et al, 2012; 李元超等, 2014; Hein et al, 2017; 郑新庆等, 2021)。珊瑚幼虫相

关指标有珊瑚幼虫附着率、珊瑚幼虫生长状况和珊瑚幼虫补充量等 (Oren et al, 1997; McClanahan et al, 2012)。礁栖生物相关指标有鱼类群落多样性及丰度、底栖生物和大型藻类的多样性及丰度 (Muko et al, 2011; McClanahan et al, 2012; 李元超等, 2014; Johns et al, 2014; Hein et al, 2017; Ladd et al, 2019; Seraphim et al, 2020)。关于鱼类群落多样性指标, 大多数研究都集中在植食性鱼类指标 (Raymundo et al, 2007; Hein et al, 2017; Ladd et al, 2019), 而对肉食性鱼类指标的关注较少。实际上, 由于缺乏充足的定量研究, 以鱼类作为指标的修复成效评估案例相对较少。Seraphims 等 (2020) 研究表明肉食性鱼类指标可能对指示珊瑚礁生态系统修复成效有着重要意义。

修复过程中各环境指标的稳定性与修复成效密切相关 (郑新庆等, 2021), 所以除了生物指标外, 还要考虑与珊瑚礁生境状况相关的环境指标, 如海水温度、营养盐、沉积物、悬浮物等 (McClanahan et al, 2012)。Hein 等 (2017) 发现,

大多数成效评估仅专注于移植珊瑚的短期生物反应——存活和生长等，只有少数评估着眼于修复和礁栖群落或重要生态过程的关系 (Hein et al, 2017; Ladd et al, 2019)。目前，随着珊瑚生态修复日渐为人们所关注，学者们也开始将社会、经济和管理因素与生态指标相结合用于评估珊瑚生态系统修复成效。Hein 等 (2017) 首次强调应将修复过程中所带来的社会、文化和经济效益应用在珊瑚

礁生态修复成效评估中，并结合 6 项生态学指标提出了 4 项社会与经济指标。郑新庆等 (2021) 基于 Hein 的指标体系，初步提出了我国珊瑚礁生态修复成效评估指标体系，其中包括用户满意度、社会价值、人文价值和经济价值等经济、社会、人文方面的评估。

针对常见的珊瑚礁生态修复方法，珊瑚礁生态修复成效评估指标见表 2。

表 2 常见珊瑚礁生态修复成效评估指标

修复方法	指标	具体指标	使用现状
		海水环境质量	
	环境指标	珊瑚生境中理化因子稳定性(温度、营养盐、沉积物、悬浮物等)	关注珊瑚礁生境修复时重点考虑
		移植材料与珊瑚礁基质融合情况	
构建人工珊瑚礁、构建人工礁结合珊瑚移植法	珊瑚礁生态修复情况指标	珊瑚礁生长状况、珊瑚盖度、珊瑚种类多样性、珊瑚健康状况、珊瑚结构复杂性、移植珊瑚存活率(珊瑚移植法考虑)、移植珊瑚再生状况(珊瑚移植法考虑)	这一类指标目前广泛使用,专注于移植珊瑚的短期生物反应,对于礁栖群落或重要的生态过程等的关注较少
	礁栖生物多样性和生产力指标	鱼类群落多样性、底栖生物和大型藻类丰度、藻类群落多样性、珊瑚礁群落多样性、珊瑚礁鱼类丰度、底栖无脊椎动物丰度和群落多样性	鱼类相关指标研究较少,且集中于植食性鱼类
珊瑚幼虫收集-培养-移植法	生物资源类指标	珊瑚幼体附着率和生长状况、珊瑚幼体补充量	
-	社会、经济	珊瑚礁用户满意度、管理工作、能力建设、经济价值、社会价值、人文价值	目前使用较少,指标的合理性和可操作性还有待研究

### 1.3 盐沼湿地生态修复成效评估指标

盐沼湿地主要进行生境修复和生物资源恢复，生态系统修复成效评估的指标涵盖了生物指标和非生物指标两大类。其中，生物指标有植被覆盖率、植物生长发育状况和生物多样性指标等 (张悦等, 2013)，多样性指标主要包括了植被群落、底栖生物、鸟类、微生物、鱼类以及入侵物种 (Neckles et al, 2002; Warren et al, 2002; 张悦等, 2013; Staszak et al, 2013; Lynam et al, 2020)。非生物指标有水文指标、水环境指标、沉积物及土壤理化性质指标等，常见的水文指标有水体淹没状态 (Warren et al, 2002; Konisky et al, 2006)；水环境指标则有盐度、溶解氧、pH 值、水温等 (Neckles et al, 2002; Konisky et al, 2006)；沉积物和土壤理化性质有孔隙水 pH 和盐度、土壤地下水位 (Warren et al, 2002; Staszak et al, 2013)，以及土壤有机物含量 (Duarte et al, 2012) 等。由于大规模湿地修复规划的出现，景观和区域尺度湿地生态恢复研究也逐渐成为重点，人们开始关注除生态系统结构性指标外的景观和区域尺度相关指标 (裴绍峰等, 2015; 刘红玉等, 2021)。景观指标

包括湿地斑块类型面积、斑块数量、斑块密度以及斑块聚集度等 (永智丞等, 2020)。

具体研究案例中，部分指标的代表性仍存在争议，例如 Konisky 等 (2006) 研究缅甸湾盐沼湿地的案例时，认为生物指标较非生物指标变化不明显，难以作为成效评估参考依据，而 Staszak 等 (2013) 则认为部分非生物指标只能反映环境条件，可能与修复后生态系统的恢复程度无关。综合以上研究，想要清晰地了解各指标对修复的反馈情况，还需开展更多的调查并进行长期的监测。

与珊瑚礁生态系统一样，盐沼湿地生态系统生态修复成效评估指标也开始考虑社会和经济方面的内容。宁秋云等 (2014) 评估广西竹山盐沼湿地生态系统修复工程成效时，除了生态状况和环境压力指标外，还加入了工程周边居民的环保意识水平、宣传、人均收入科研水平的社会影响指标及评价工程管理者对工程管理有效性的指标。

由于针对盐沼湿地生态修复成效评估的相关指标研究较少，本文仅对常见指标进行了梳理 (表 3)。因为盐沼湿地往往涉及尺度较大，本文认为，成效评估时可适当考虑景观生态学指标。

表 3 常见盐沼湿地生态修复成效评估指标

修复方法	指标	具体指标	使用现状
生境修复	水文指标	水体淹没状态	指标的代表性不足, 需进一步研究, 需要加强指标的长期监测
	水环境指标	盐度、溶解氧、pH、温度	
	沉积物/土壤理化性质指标	孔隙水、pH、盐度、土壤地下水位、土壤有机物含量	
生物资源恢复	植被恢复指标	植被覆盖率、植物生长发育状况	
	生物多样性指标	植物群落、底栖生物、鸟类、微生物、鱼类、入侵物种	
-	生态系统景观变化	斑块面积、斑块密度和聚集度、斑块数量、景观破碎度	景观生态学指标研究较少, 可适当考虑
-	社会、经济	居民环保意识水平、宣传、人均收入科研水平	研究较少, 处于起步阶段

#### 1.4 红树林生态修复成效评估指标

红树林生态系统的生态修复方法包括生境修复法和植被修复法(自然恢复法、人工种植法、移植法等), 其成效评估指标和盐沼湿地类似, 也涵盖了生物指标和非生物指标两类。体现生境条件恢复情况的非生物参数指标包括土壤指标(如硫化物含量、重金属含量等)、有机质含量、盐度、水文和水环境指标、降水率和蒸发量等(Zaldivar-Jimenez et al, 2010; 徐华林等, 2012; 冯建祥等, 2017a; Canales-Delgado et al, 2019; Pérez-Ceballos et al, 2020)。红树林生态修复成效评估指标中的生物指标有红树林植被生长情况、其他生物多样性和反映生态过程恢复状况的生态系统功能指标等。其中, 红树林植被生长状况包括了红树林成活率、红树林植物多样性、红树林盖度及密度(Zaldivar-Jimenez et al, 2010; 郑俊鸣等, 2016), 以及红树植物健康状况(冯建祥等, 2017a)等。冯建祥等(2017a)在评估深圳红树林生态系统修复成效时, 选择以秋茄的高度和胸径两个生长指标作为监测对象, 判断红树林植被修复状况, 同时还选择了光合速率、呼吸速率、己糖磷酸异构酶以及 3-磷酸甘油醛脱氢酶用于评价红树林植物健康状况。另一项

研究中, 冯建祥等(2017b)还利用了植物生物量、沉积物碳库和特征动物食物来源比例分别评估碳库功能和食物网支持功能, 以此来评估湿地生态系统功能修复情况。其他生物多样性指标包括鸟类和底栖软体动物的多样性及物种相对丰度等(Walton et al, 2007; Frederick et al, 2009; 冯建祥等, 2017b; Salmo et al, 2017; Canales-Delgado et al, 2019)。例如鸟类中朱鹭和林鹤因对水质变化敏感, 它们的存在被认为是修复成功的重要依据(Frederick et al, 2009; Canales-Delgado et al, 2019)。红树林的生态修复成效评估中常将顶级捕食者、基石物种和蟹类群落组成(如泥蟹的丰度)作为生态系统健康的指标(Walton et al, 2007)。

互花米草作为生长在潮间带的米草属多年生植物, 对红树林及其他近岸生态系统的过程和功能会产生严重影响。它们对红树林生态修复过程常带来阻碍, 修复项目中常包括了互花米草的生态治理(顾燕飞, 2019; 林秋莲等, 2020)。因此互花米草生物量、复发率等指标也是成效评估考虑的指标(冯建祥等, 2017a; 顾燕飞, 2019)。

常见红树林生态修复成效评估指标见表 4。

表 4 常见红树林生态修复成效评估指标

修复方法	指标	具体指标	使用现状
生境恢复法	水体化学指标	水环境指标	常结合植被修复法(自然恢复法、人工种植法、移植法等)进行
	水文动力指标	水文	
	土壤指标	硫化物含量、重金属含量、有机质含量	
	气象指标	降水率、蒸发量	
人工种植法、移植法等	红树林植被生长状况	红树林面积、红树林物种数量, 红树林生物量、红树林盖度及密度、红树植物健康状况、红树植物高度、胸径、红树林成活率	红树林生态系统过程的指标相对较少, 现有指标与红树林生长周期结合较少, 主要适用于短期、近期成效评估, 对于中远期评估尚需进一步研究与验证; 对于社会、经济指标关注较少
	生物多样性	红树林植物多样性、底栖动物多样性和丰度、鸟类多样性和丰度、沉积物微生物多样性	
	红树林生态系统过程	植被初级生产力、沉积物碳库、食物网支持功能	
	红树林生态系统健康	顶级捕食者、基石物种、蟹类群落组成和丰度	
	互花米草清除	互花米草生物量、互花米草复发率	

### 1.5 小结

国内外学者针对各典型生态系统生态修复成效评估指标开展了较多研究,也进行了较多的实践应用。根据不同的生态修复目的、生态修复方法,评估指标的选取各有侧重,目前尚未形成统一的指标体系。针对红树林和珊瑚礁的指标已有较多成熟的研究,海草床和盐沼湿地的部分指标用于进行成效评估时,存在代表性不足的问题,尚需开展深入研究。各典型生态系统在考虑评估指标时,对反映近期成效的指标关注较多,而结合生态系统过程、反映中长期成效的指标关注较少,缺乏长期、连续性的监测。现有指标还不能完全满足适应性管理的需要,对于评估结果不好的生态修复方案、措施,及时进行调整后,相应的成效评估指标如何考虑还需更深入的研究。

此外,社会、文化、经济指标在近年来日益为人们所关注,但是相关的实践较少。这些指标要结合典型海洋生态系统修复的具体情况来使用。如针对我国人类活动频繁的沿岸地区,甚至是作为城市生态系统一部分的海洋生态系统,在评估其修复成效的时候,应将社会价值、文化价值、经济价值等指标与生态指标结合起来综合评价。

## 2 成效评估方法

典型海洋生态系统成效评估主要借鉴陆域生态系统成效评估中较为常用的方法。於方等(2009)从数据分析的角度,整理了目前主要的生态修复评估方法,将其分为统计学方法、综合评价法、模糊评价法、灰色评价法、压力-状态-响应(Pressure-State-Response, PSR)框架模型和空间主成分分析法。吴丹丹等(2009)将中国生态修复成效评估方法定义为基于生物及群落、水土保持功能、水土理化性质、小气候评价、景观格局评价、生态价值评价等系统综合评价指标进行直接评价和综合效益评价的方法。孙晓萌等(2014)总结中国生态修复成效评估方法主要有单指标对比法、综合效益评价和生态服务价值评估,并分析了它们的应用方式及优缺点。张立斌等(2012)将生态修复成效主要评估方法总结为直接对比法、属性分析法和轨迹分析法。高彦华等(2003)则研究了生态系统健康评价方法和生态安全评价方法在生态修复成效评估中的

借鉴作用。

在海洋典型生态系统生态修复成效评估时,常采用的方法包括直接对比法、综合效益评估法、轨迹分析法、指示物种法等。

Fonseca等(1996)将位于美国佛罗里达州坦帕湾的几处经过移植修复的海草床3年的监测数据与附近的天然海草床进行对比,得到海草床修复率和发展趋势等相关信息,以评估修复成效。Susan等(2014)研究坦帕湾一块修复海草床的修复成效,并与参照系统的监测指标进行对比评估。Scapin等(2016)基于威尼斯潟湖海草床修复第一年的监测数据,使用生境鱼类生物指标指数与参照地点进行对比,评估威尼斯潟湖海草床生态系统中的鱼类资源修复成效。宁秋云等(2020)使用综合效益评估法从生态环境、工程管护、社会影响等方面对广西竹山海草生态修复工程效果进行了评估。陈石泉(2021)通过修复区域和参照区域的指标来对比不同技术方法的修复成效。

珊瑚礁生态修复成效评估相关研究中,Yap等(2003)、Raymundo等(2007)、李元超等(2014)、Ladd等(2019)通过跟踪监测修复区的珊瑚礁生态系统,并与参照系统的各项指标进行直接对比,以对修复成效进行评估。Hein等(2017)运用综合效益法,构建了全面反映环境、社会文化、管理和对可持续社区经济贡献的指标体系,用以评估珊瑚礁生态修复成效。

盐沼湿地生态修复的成效评估相关研究中,Neckles等(2002)、Warren等(2002)、Konisky等(2006)、Duarte等(2012)、Staszak等(2013)、Lynum等(2020)均是通过对修复盐沼湿地区域和参照区域的多项生物指标和水环境指标进行对比来评估盐沼湿地生态修复的成效。宁秋云等(2014)采用德尔菲专家法和层次分析法,建立综合评价模型对竹山盐沼修复工程进行了综合效益评价。永智丞等(2020)基于压力-状态-响应机制选取了盐沼湿地修复成效的评价指标,利用综合效益评估法评价了退化盐沼湿地生态系统的修复成效。

红树林生态系统生态修复成效评估方法的研究较其他典型生态系统丰富许多。宁存鑫(2014)选取单指标对比分析以及环境质量综合评价手段,通过修复前后以及和参照区域的对比,初步研究了红

树林生态系统的修复成效。冯建祥等(2017b)从修复红树林湿地的生物群落结构、植物健康状况及环境质量状况等方面,构建特征指标群,使用综合效益评价法开展修复成效评估研究,但是该研究只考虑了生态环境效益,没有涉及经济和社会效益。林秋莲等(2020)运用综合效益评价法,选取环境质量和生物质量指标,将修复区和对照区进行对比,对浙江鳌江口红树林修复进行了成效评估。Salmo等(2017)运用轨迹分析法,即监测分析、评估修复系统随时间变化的轨迹模式,并与参照系统进行对比,评估修复成效;同时,运用指示物种法,探究了软体动物可否作为红树林生态系统生态修复的指示物种。Canales-Delgadillo等(2019)通过直接对比法和指示物种法研究了修复区域和参照区域的鸟类群落多样性、物种丰度和水质变化指标,判断红树林修复成效,并探究哪些鸟类可以作为修复成功的指示物种。

综上所述,典型海洋生态系统生态修复成效评估方法的选择与评估指标的选取密切相关。现阶段针对海草床、珊瑚礁、盐沼湿地生态修复成效评估方法的研究相对较少,评估方法较为单一,有待继续深入完善。在选择评估方法时需注意各自的适用条件,如直接对比法需要选择和确定适合的参照系统;指示物种法对指示物种的代表性要求较高;轨迹分析法要保证监测数据的连续性和完善度;综合效益法需要科学合理分配各指标间的权重。

### 3 展望

当前,国内外对典型海洋生态系统成效评估的评估指标、评估方法进行了大量的研究。本文通过对相关研究的梳理,指出成效评估在指标选取和方法确定上需要重点考虑的因素,并对海草床、珊瑚礁、盐沼湿地、红树林四类典型海洋生态系统在生态修复成效评估时存在的共性问题进行了总结和归纳。

基于前文的研究结果,同时考虑到这几类典型海洋生态系统具有复杂的生物与环境的网络关系和交互功能,本文对典型海洋生态系统生态修复成效的评估研究提出几点展望:①典型海洋生态系统生态修复是一个长期的过程,成效评估研究也应立足于生态系统过程,在生态修复的不同阶段开展成效

评估研究,尤其应注重参考长期、连续性的监测数据,开展中长期成效评估研究。②现阶段开展的成效评估研究主要针对海洋生态系统的类型展开,今后要结合生态系统退化诊断的结果,针对相应的生态修复的方式(保育保护、自然恢复、辅助修复、生态重建等)考虑成效评估指标和方法。③随着海洋生态系统的社会、经济效益日益受到人们的重视,有必要考虑将社会、经济指标纳入成效评估指标,开展相应研究,为促进典型海洋生态系统与周边社区的协同发展奠定基础。

### 参 考 文 献

- 陈彬,俞炜炜,陈光程,等,2019. 滨海湿地生态修复若干问题探讨[J]. 应用海洋学学报,38(4):464-473.
- 陈石泉,蔡泽富,沈捷,等,2021. 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,40(1):65-73.
- 冯建祥,宁存鑫,朱小山,等,2017a. 福建漳江口本土红树植物秋茄替代互花米草生态修复效果定量评价[J]. 海洋与湖沼,48(2):266-275.
- 冯建祥,朱小山,宁存鑫,等,2017b. 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,37(7):2662-2673.
- 顾燕飞,2019. 崇明东滩互花米草生态控制的施工技术及其效果[J]. 上海交通大学学报(农业科学版),37(5):83-88.
- 姜欢欢,温国义,周艳荣,等,2013. 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,30(1):35-38,112.
- 李森,范航清,邱广龙,等,2010. 海草床恢复研究进展[J]. 生态学报,30(9):2443-2453.
- 李元超,兰建新,郑新庆,等,2014. 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,33(3):348-353.
- 林秋莲,顾肖璇,陈昕韡,等,2020. 红树植物秋茄替代互花米草的生态修复评估——以浙江温州为例[J]. 生态学杂志,39(6):1761-1768.
- 刘红玉,周奕,郭紫茹,等,2021. 盐沼湿地大规模恢复的概念生态模型——以盐城为例[J]. 生态学杂志,40(1):278-291.
- 宁存鑫,2014. 深圳红树林湿地环境调查及其修复效果研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学.
- 宁秋云,李英花,莫珍妮,等,2014. 滨海盐沼生态修复工程效果评价——以广西竹山为例[J]. 泉州师范学院学报,32(6):25-29.
- 宁秋云,何斌源,赖廷和,2020. 广西竹山海草生态修复工程效果评估[J]. 化学工程与装备,12:304-306.
- 裴绍峰,刘海月,马雪莹,等,2015. 辽河三角洲滨海湿地生态修复工程[J]. 海洋地质前沿,31(2):58-62.
- 钱伟,冯建祥,宁存鑫,等,2018. 近海污染的生态修复技术研究进展[J]. 中国环境科学,38(5):1855-1866.
- 孙晓萌,彭本荣,2014. 中国生态修复成效评估方法研究[J]. 环境科学与管理,39(7):153-157.
- 童晨,李加林,黄日鹏,等,2018. 陆源污染生态损害评估及其补偿标准研究——以象山港为例[J]. 海洋通报,37(6):685-694.

- 王丽荣,于红兵,李翠田,等,2018.海洋生态系统修复研究进展[J].应用海洋学学报,37(3):435-446.
- 王明,2015.庙岛群岛大叶藻生态系统修复[D].青岛:中国海洋大学.
- 吴丹丹,蔡运龙,2009.中国生态恢复效果评价研究综述[J].地理科学进展,28(4):622-628.
- 徐华林,彭逸生,葛仙梅,等,2012.基于红树林种植的滨海湿地恢复效果研究[J].湿地科学与管理,8(3):36-40.
- 永智丞,刘吉平,司薇,2020.向海退化盐沼湿地修复效果评估[J].生态学报,40(20):7401-7409.
- 於方,周昊,许申来,2009.生态恢复的环境效应评价研究进展[J].生态环境学报,18(1):374-379.
- 张立斌,杨红生,2012.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,24(9):1062-1069.
- 张悦,刘长安,宋永刚,等,2013.滨海湿地植物修复效果监测与评价方法研究[J].海洋环境科学,32(4):544-546.
- 郑俊鸣,舒志君,方笑,等,2016.红树林造林修复技术探讨[J].防护林科技(1):99-103.
- 郑新庆,张涵,陈彬,等,2021.珊瑚礁生态修复效果评价指标体系研究进展[J].应用海洋学学报,40(1):126-141.
- CANALES -DELGADILLO J C,PEREZ -CEBALLOS R,ZALDIVAR -JIMENEZ M A, et al,2019. The effect of mangrove restoration on avian assemblages of a coastal lagoon in southern Mexico [J]. PeerJ, 7:e7493.
- DUARTE B,FREITAS J,ÇAÇADOR I,2012. Sediment microbial activities and physico-chemistry as progress indicators of salt marsh restoration processes[J]. Ecological Indicators, 19:231-239.
- FONSECA M S,KENWORTHY W J,COURTNEY F X,1996. Development of planted seagrass beds in Tampa Bay,Florida,USA. I. Plant components[J]. Marine Ecology Progress Series, 132:127-139.
- FREDERICK P,GAWLIK D E,OGDEN J C, et al,2009. The White Ibis and Wood Stork as indicators for restoration of the everglades ecosystem[J]. Ecological Indicators, 9(6):S83-S95.
- HEIN M Y,WILLIS B L,BEEDEN R, et al,2017. The need for broader ecological and socioeconomic tools to evaluate the effectiveness of coral restoration programs[J]. Restoration Ecology, 25(6):873-883.
- JOHNS K A,OSBORNE K O,LOGAN M,2014. Contrasting rates of coral recovery and reassembly in coral communities on the Great Barrier Reef[J]. Coral Reefs, 33(3):553-563.
- KONISKY R A,BURDICK D M,DIONNE M, et al,2006. A Regional Assessment of Salt Marsh Restoration and Monitoring in the Gulf of Maine[J]. Restoration Ecology, 14(4):516-525.
- LADD M C,BURKEPILE D E,SHANTZ A A,2019. Near-term impacts of coral restoration on target species,coral reef community structure,and ecological processes [J]. Restoration Ecology, 27(5):1166-1176.
- LYNUM C A,BULSECO A N,DUNPHY C M, et al,2020. Microbial Community Response to a Passive Salt Marsh Restoration[J]. Estuaries and Coasts, 43(6):1439-1455.
- MCCLANAHAN T R,DONNER S D,MAYNARD J A, et al,2012. Prioritizing Key Resilience Indicators to Support Coral Reef Management in a Changing Climate[J]. Plos One, 7(8):e42884.
- MUKO S,IWASA Y,2011. Long-term effect of coral transplantation: Restoration goals and the choice of species[J]. Journal of Theoretical Biology, 280(1):127-138.
- NECKLES H A,DIONNE M,BURDICK D M, et al,2002. A Monitoring Protocol to Assess Tidal Restoration of Salt Marshes on Local and Regional Scales[J]. Restoration Ecology, 10(3):556-563.
- OREN U,BENAYAHU Y,1997.Transplantation of juvenile corals:a new approach for enhancing colonization of artificial reefs[J]. Marine Biology, 127(3):499-505.
- PÉREZ -CEBALLOS R,ZALDÍVAR -JIMÉNEZ A,CANALES -DELGADILLO J, et al,2020. Determining hydrological flow paths to enhance restoration in impaired mangrove wetlands [J]. Plos One, 15(1):e0227665.
- RAYMUNDO L J,MAYPA A P,GOMEZ E D, et al,2007. Can dynamite-blasted reefs recover? A novel,low-tech approach to stimulating natural recovery in fish and coral populations [J]. Marine Pollution Bulletin, 54(7):1009-1019.
- SALMO S G,TIBBETTS I,DUKE N C,2017. Colonization and shift of mollusc assemblages as a restoration indicator in planted mangroves in the Philippines [J]. Biodiversity and Conservation, 26(4):865-881.
- SCAPIN L,ZUCCHETTA M,FACCA C, et al,2016. Using fish assemblage to identify success criteria for seagrass habitat restoration[J]. Web Ecology, 16(1):33-36.
- SCAPIN L,ZUCCHETTA M,SFRISO A, et al,2019. Predicting the response of nekton assemblages to seagrass transplantations in the Venice lagoon:An approach to assess ecological restoration [J]. Aquatic Conservation, 29(6):849-864.
- SERAPHIM M J,SLOMAN K A,ALEXANDER M E, et al,2020. Interactions between coral restoration and fish assemblages: implications for reef management[J]. Journal of Fish Biology 97(3):633-655.
- SHERIDAN P,2004. Comparison of Restored and Natural Seagrass Beds near Corpus Christi,Texas[J]. Estuaries, 27(5):781-792
- STASZAK L A,ARMITAGE A R,2013. Evaluating Salt Marsh Restoration Success with an Index of Ecosystem Integrity[J]. Journal of Coastal Research, 287:410-418.
- STATTON J,DIXON KW,HOVEY RK, et al,2012. A comparative assessment of approaches and outcomes for seagrass revegetation in Shark Bay and Florida Bay[J]. Marine and Freshwater Research, 63(11):984.
- SUSAN S B,MICHAEL L M,MARGARET O H,2014. The Value of Long-Term Assessment of Restoration:Support from a Seagrass Investigation:Long-Term Seagrass Restoration[J]. Restoration Ecology, 22(3):304-310.
- WALTON M E,LE VAY L,LEBATA J H, et al,2007.Assessment of the effectiveness of mangrove rehabilitation using exploited and non-exploited indicator species[J]. Biological Conservation, 138(1-2):180-188.

(下转第 682 页)

- ter system[J]. *Remote Sensing of Environment*, 233:111325.
- NEUMANN T A, BRENNER A, HANCOCK D, et al, 2019, ATLAS/ICE-Sat-2 L2A Global Geolocated Photon Data, Version 1[DB]. Boulder, Colorado USA. NSIDC: National Snow and Ice Data Center.
- NIE S, WANG C, XI X, et al, 2018. Estimating the vegetation canopy height using micro-pulse photon-counting LiDAR data[J]. *Optics Express*, 26(10): A520-A540.
- WANG X, CHEN X, GONG P, et al, 2011. Earth science applications of ICESat/GLAS: a review[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 32(23): 8837-8864.
- WANG X, PAN Z, GLENNIE C, 2016. A novel noise filtering model for photon-counting laser altimeter data[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 13(7): 947-951.
- ZHANG J, KERÉKES J, CSATHO B, et al, 2014. A clustering approach for detection of ground in micropulse photon-counting lidar altimeter data[C]/*IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium*. IEEE, 177-180.
- ZHU X X, NIE S, WANG C, et al, 2020. A noise removal algorithm based on OPTICS for photon-counting LiDAR data [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, PP(99): 1-5.

(本文编辑:崔尚公)

---

(上接第 608 页)

- WARREN R S, FELL P E, ROZSA R, et al, 2002. Salt Marsh Restoration in Connecticut: 20 Years of Science and Management[J]. *Restoration Ecology*, 10(3): 497-513.
- YAP H T, MOLINA R A, 2003. Comparison of coral growth and survival under enclosed, semi-natural conditions and in the field[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 46(7): 858-864.
- ZALDIVAR -JIMENEZ M A, HERRERA -SILVEIRA J A, TEUTLI -HERNANDEZ C, et al, 2010. Conceptual Framework for Mangrove Restoration in the Yucatan Peninsula[J]. *Ecological Restoration*, 28(3): 333-342.
- ZHAO Q, BAI J, HUANG L, et al, 2016. A review of methodologies and success indicators for coastal wetland restoration[J]. *Ecological Indicators*, 60: 442-452.

(本文编辑:杨瑞)