

# 珊瑚礁生态系统功能产生机制及评价方法

李宇亮<sup>1</sup>, 高宇<sup>1</sup>, 郑新庆<sup>1,2,3</sup>, 刘恒<sup>1</sup>, 陈克亮<sup>1,2\*</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:** 生态系统功能是指生态系统维持自身或其他生态系统健康, 并直接或间接为人类提供产品和服务的能力。客观评价珊瑚礁生态系统功能对实现珊瑚礁资源有效保护和可持续利用有重要意义。本研究梳理归纳了生态系统功能的概念内涵, 分析了珊瑚礁生态系统功能的产生机制; 初步构建了基于珊瑚礁生态系统功能指数 (coral reef ecosystem function index, CREFI) 的珊瑚礁生态系统功能评价方法; 并以徐闻国家级珊瑚礁自然保护区为例, 利用 2006 年和 2016 年调查数据对珊瑚礁生态系统功能进行定量评价。结果显示, 徐闻国家级珊瑚礁自然保护区 2016 年的 CREFI 高于 2006 年, 主要是由于珊瑚礁的死亡率有所降低和食草性鱼类种数明显增加; CREFI 具有清晰的应用目标和理论框架, 评价结果能清晰地反映珊瑚礁生态系统功能的时空差异, 较好地评价珊瑚礁生态系统的功能稳定性和健康状况, 可作为一种珊瑚礁生态系统功能定量评价模型, 为珊瑚礁生态系统管理和决策提供参考。

**关键词:** 海洋环境科学; 珊瑚礁; 生态系统功能; 评价方法; 生态系统管理

DOI: 10.3969/J.ISSN.2095-4972.2022.03.012

中图分类号: P76

文献标识码: A

文章编号: 2095-4972(2022)03-0475-08

珊瑚礁由珊瑚虫、钙化藻、有孔虫等造礁生物的灰质骨骼残体世代不断堆积所形成, 它为恋礁型海洋生物提供了栖息地, 具有极高的初级生产力和生物多样性, 因此被称为“海洋中的绿洲”<sup>[1]</sup>。珊瑚礁生态系统为人类提供了丰富的渔业和旅游资源<sup>[2]</sup>, 能保护海岸线<sup>[3]</sup>, 并且具有很高的科研文化价值<sup>[4]</sup>。然而, 近年来, 海岸带区域人口快速增长、岸线高强度开发以及全球气候变化等一系列因素已对珊瑚礁生态系统造成了严重的威胁<sup>[5-6]</sup>。因此, 珊瑚礁生态系统的保护与管理成为政府部门和学界共同关注的焦点。

在我国, 大多数珊瑚礁生态系统管理都是以日常巡护工作为主要内容, 缺乏系统的方法, 而为数不多的珊瑚礁生态调查监测目标则过于简单, 没有关注珊瑚礁的关键功能和再生恢复能力, 也没有充分地对珊瑚礁生态调查指标所反映的信息进行综合分析利用<sup>[7-8]</sup>, 一些学者回顾和总结了国内外珊瑚礁

保护和管理的理论、实践成果, 认为缺乏全面详细的定量数据支持是许多国家珊瑚礁管理所面临的问题<sup>[9-10]</sup>。

本研究重点关注珊瑚礁的综合功能和整体健康监测, 在梳理生态系统功能相关理论的基础上, 全面分析珊瑚礁生态系统功能的产生机制, 探索性地构建珊瑚礁生态系统功能定量评价模型, 并通过案例研究验证评价模型的适用性和可操作性, 旨在明确珊瑚礁生态系统保护和管理目标, 建立一种快速、客观的生态系统功能定量评价方法, 为珊瑚礁生态系统管理提供决策依据。

## 1 珊瑚礁生态系统功能

### 1.1 生态系统功能

目前, 文献中关于“生态系统功能”的定义不尽相同, 但总的来看, 可以分为两类, 一类是生态学领域的定义, 另一类是生态经济学领域的定义。生态

收稿日期: 2021-02-25

基金项目: 自然资源部第三海洋研究所基本科研业务费专项资金资助项目(海三科 202008); 国家自然科学基金资助项目(41961144022); 自然资源部专项业务费资助项目(HR04-220901-22); 徐闻珊瑚礁国家级自然保护区珊瑚礁生态调查资助项目(S160940)

作者简介: 李宇亮(1985—), 男, 博士, 助理研究员; E-mail: liyuliang@tio.org.cn

\* 通讯作者: 陈克亮(1978—), 男, 博士, 正高级工程师; E-mail: klchen@tio.org.cn

学领域对生态系统功能的定义可归纳为:生态系统为维持自身和其他生态系统健康而完成的一系列生态过程,包括物质循环、能量流动和信息传递<sup>[11-13]</sup>。生态经济学领域对生态系统功能的定义可归纳为:生态系统直接或间接为人类提供产品和服务以此满足人类需求的能力,生态系统功能来源于生态系统结构和过程,是生态系统服务产生的前提<sup>[14-15]</sup>。

本研究认为广义的生态系统功能可定义为:生态系统维持自身或其他生态系统健康状况并直接或间接为人类提供产品和服务的能力。更进一步来看,生态系统功能是一系列自然过程的综合结果,是生态系统的自然属性,独立于人类社会而存在,其作用对象包括3个方面,分别是生态系统自身、其他生态系统以及人类。

## 1.2 珊瑚礁生态系统功能

为更好地将生态系统功能理论与实验研究相结合,在特定的研究案例中关于生态系统功能应该有专门的概念解释和功能识别<sup>[16]</sup>。Moberg等(1999)认为珊瑚礁生物通过参与各项生态过程而形成各种特定的功能群,共同完成重要的生态功能<sup>[17]</sup>。傅秀梅等(2009)认为珊瑚礁生态系统具有造礁与消波护岸、维持生物多样性、提供生物资源和材料、生物地球化学研究以及文化教育与生态旅游等功能<sup>[18]</sup>。赵美霞等(2016)认为,珊瑚礁关键生物有造礁生物、光合自养藻类、控制系统结构的顶级捕食者、调整和控制珊瑚群落的草食性种类、其他浮游和底栖微生物,这些生态类群都有各自的生态功能<sup>[19]</sup>。Simon等(2019)探索利用声遥感技术对珊瑚礁生态系统功能进行评价,并将珊瑚覆盖率、生境复杂程度、浮游生物捕食者状况、第三级消费者状况等作为评价指标<sup>[20]</sup>。本研究从生态经济学的视角,参考de Groot等(2002)的分类方法<sup>[14]</sup>,从生境功能、调节功能、产出功能和信息功能4个方面对珊瑚礁生态系统功能的产生机制进行分析,并依此设计相应的评价方法。

**1.2.1 生境功能** 造礁珊瑚分泌钙质骨骼形成骨骼架,珊瑚骨骼架在浅海区与其他形成钙质骨骼的动植物不断混合堆积,并经过侵蚀作用后形成复杂的三维结构,这种三维结构具有极高的生境异质性,有利于维持物种多样性,同时也提高了演化出新物种的可能性<sup>[1]</sup>。因此,珊瑚礁是许多生物产卵、孵化、觅食和生长的庇护所,珊瑚礁覆盖范围大约占全球海底面积的0.1%~0.5%,而全世界将近三分之一的海洋鱼类都是在珊瑚礁发现的<sup>[21]</sup>。此外,珊瑚礁独特的物理结构还能保护海岸线,维持海岸带生境

的稳定性,使其免受风暴潮的袭击<sup>[3]</sup>。

**1.2.2 调节功能** 珊瑚礁中丰富的物种彼此作用形成了复杂的食物网,使珊瑚礁生态系统内部以及珊瑚礁生态系统与外部环境之间都有频繁的物质能量交换<sup>[22]</sup>。例如,珊瑚礁中的微生物和蓝藻可以高效地吸收同化周围水体甚至是空气中的氮<sup>[23]</sup>,能降解水体中的石油产品,使烃类物质变成二氧化碳和水<sup>[24]</sup>;珊瑚虫能将周围水体中游离的钙转化为自身的骨骼,对海洋环境的钙平衡有重要意义<sup>[25]</sup>。此外,珊瑚礁还在全球碳循环中扮演着重要角色,尽管目前关于珊瑚礁是碳“源”还是“汇”的争议悬而未决,但已有研究表明,全球的珊瑚礁预计每年可固碳9亿吨,因此其在碳汇方面的调节功能不容忽视<sup>[26]</sup>。以上一系列生态过程保证了珊瑚礁调节功能的实现。

**1.2.3 产出功能** 珊瑚礁为人类提供多种海产品,其渔业产量约占全球渔业总产量的10%,为5亿居民提供了经济收入和蛋白质来源<sup>[27]</sup>。此外,目前已有研究表明珊瑚礁生态系统中的一些软体动物、腔肠动物和多孔动物具有药用价值;许多观赏性的水族馆生物都是来自于珊瑚礁生态系统;珊瑚骨骼和珊瑚礁生态系统中的某些贝类被作为珠宝和装饰品<sup>[28-29]</sup>。值得一提的是,识别珊瑚礁生态系统的产出功能,是以人类对珊瑚礁可持续的利用方式为前提,这样才能维持珊瑚礁生态系统的恢复力,保证生态产品的可持续供应。

**1.2.4 信息功能** 独特的物理结构和丰富的物种使得珊瑚礁生态系统具有极高的美学文化价值,支撑了沿海区域旅游业的发展<sup>[30]</sup>,并且每年有大量以珊瑚礁为创意题材的书籍、电影等出版物发行,带来了巨大的经济效益和社会效益<sup>[31]</sup>。除此之外,珊瑚礁生态系统还具有极重要的科研价值——某些礁石生物是海洋环境监测的指示生物<sup>[32]</sup>;造礁珊瑚的骨骼可以长时间记录海水中的重金属水平变化情况<sup>[33]</sup>、海洋气候因子变化情况<sup>[34-35]</sup>以及季风海流等海洋环境事件<sup>[36]</sup>。

## 2 珊瑚礁生态系统功能评价方法

### 2.1 珊瑚礁生态系统功能指数

利用有限的、相对独立的指标来反映珊瑚礁生态系统整体功能和健康状况是构建珊瑚礁生态系统功能评价模型的基本目标。本研究构建了“珊瑚礁生态系统功能指数”(coral reef ecosystem function index, CREFI)对珊瑚礁生态系统功能进行定量评价,公式如下:

$$CREFI = \sum_i S_i \quad (1)$$

式(1)中:CREFI包括“活珊瑚覆盖率”“经济鱼类种类”“食草鱼类种类”以及“珊瑚死亡率”4个评价指标。 $S_i$ 为每项指标标准化以后的数值,其中,“活珊瑚覆盖率”“经济鱼类种类”“食草鱼类种类”为正向指标,“珊瑚死亡率”为负向指标,各评价指标的权重相等(即4个评价指标的权重各为0.25)。每项评价指标对应的生态系统功能如图1所示,指标说明如下。

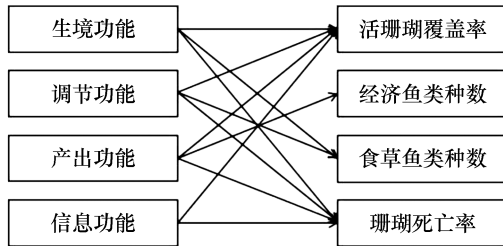


图1 各类珊瑚礁生态系统功能对应的评价指标

Fig. 1 Indicators of evaluating coral reef ecosystem functions

①活珊瑚覆盖率。用水下数码摄像机从珊瑚礁断面线的一端开始沿着断面线摄像,形成调查样带。在调查样带上,每隔20 cm判读该刻度所对应的底质类型(活珊瑚、已死亡珊瑚、大型藻类、沙地、石头、碎石等),样带上判读为活珊瑚底质类型的次数与整条样带被判读总次数的比例为活珊瑚覆盖率。活珊瑚生长过程中会产生碳酸钙骨骼,这些碳酸钙骨骼能消减波浪,为生物的天然庇护场所,因此,所有生态功能的实现都依赖于活珊瑚的存量情况以及它们所营造的栖息地物理结构<sup>[37-38]</sup>。活珊瑚覆盖率的持续下降会使底栖生境的生物构成发生变化,珊瑚礁生境的结构复杂度不断降低<sup>[39]</sup>。

②经济鱼类种数。对调查样带中拍摄到的珊瑚礁鱼类进行定性分析,整条样带中鉴定出的经济鱼类种类数量即为经济鱼类种数。我国目前对于珊瑚礁的资源利用还是以渔业资源为主<sup>[19]</sup>,经济鱼群种类对于珊瑚礁生态系统的供给功能十分重要,它决定了珊瑚礁提供渔业资源的能力,以及所提供渔业资源的价值<sup>[40]</sup>。

③食草鱼类种数。对调查样带中拍摄到的珊瑚礁鱼类进行定性分析,整条样带中鉴定出的食草鱼类种类数量即为食草鱼类种数。生态系统中各物种所具有的生态习性共同决定了生态系统的稳定性,食草型鱼类能维持珊瑚礁生态系统的关键功能群,因为它们能控制藻类生长,对保持珊瑚礁生态系统“珊瑚主导”的状态十分重要<sup>[39]</sup>。若缺少食草鱼

类,珊瑚礁生态系统中的藻类就会过量繁殖,最终“杀死”成体活珊瑚,并侵占珊瑚幼体的栖息领地,从而使珊瑚礁生态系统成为“藻类主导”的生态系统<sup>[41-42]</sup>。此外,对于受损的珊瑚礁生态系统而言,食草性鱼类能直接减少新鲜藻类的生物量,间接帮助造礁珊瑚和虫黄藻的繁殖,有利于珊瑚礁生态系统的恢复<sup>[43]</sup>。此外,还有研究表明,食草鱼类对珊瑚礁生态系统生产力和固氮过程都有一定的影响<sup>[17]</sup>。

④珊瑚死亡率。从调查样带上统计出两年内死亡的珊瑚个数,其与整条样带上鉴定出的珊瑚总个数之比,即为珊瑚死亡率。珊瑚死亡率是评价模型中唯一的负向指标,其直接反映了珊瑚礁生态系统功能的完整性和健康状况的稳定性。

## 2.2 珊瑚礁生态系统功能指数与现有评价方法的区别

已有研究人员构建了“简化的珊瑚综合健康指数”(simplified integrated reef health index, SIRHI)<sup>[44-46]</sup>来定量评价珊瑚礁维持健康功能和生物多样性的能力:

$$SIRHI = \sum_i G_i \quad (2)$$

式(2)中: $G_i$ 为每项评价指标的得分,分数等级范围为1~5分;评价指标包括“珊瑚覆盖率”“大型藻类覆盖率”“食草鱼类生物量”以及“经济鱼类生物量”这4项,所有指标的权重相等。

本研究构建的CREFI与SIRHI的不同之处主要表现在:

①评价数据不同。SIRHI采用主观的区间评分数据作为评价数据,而CREFI以客观的监测数据作为评价数据。

②不包含“大型藻类覆盖率”指标。已有研究表明,大型藻类的藻树冠会影响水流动力,从而促进海水沉积物的沉降,降低海水养分的有效性<sup>[47]</sup>,另一方面,藻类代谢产物会促进细菌繁衍,导致珊瑚疾病<sup>[48]</sup>,珊瑚礁生态系统中过多的藻类覆盖不利于活珊瑚的生存以及珊瑚礁整体生态功能的实现,只有珊瑚和大型藻类之间和谐的相互关系才能保证珊瑚礁生态系统的健康状况<sup>[49-50]</sup>。因此,“大型藻类覆盖率”不宜作为正向指标来评价珊瑚礁生态系统功能。

③增加“珊瑚死亡率”指标。造礁珊瑚的钙质骨骼是形成珊瑚礁物理结构的基础,珊瑚礁特殊的物理结构能为生物提供高异质性的生境,能保护海岸线、促进沙滩的沙粒形成,从而为人类提供各种生

态福利,然而,造礁珊瑚一旦死亡,它们原有的生存空间就很可能被藻类取代,复杂的珊瑚礁物理结构就会逐渐消失,从而导致整个生态系统状况的改变<sup>[31,51]</sup>。因此,珊瑚死亡率直接决定了珊瑚礁生态系统功能的完整性。

④用物种种类数量替代生物量。生物多样性的变化会对生态系统功能造成一定影响,特定物种的消失将使生态过程的效率降低,一些与特定物种相关的生态功能也会随之消失<sup>[52]</sup>。“功能冗余”是指具有相似生态功能特点的物种的数量,也就是说,假如在生态系统功能群中某一物种消失了,它的功能角色可以由其他功能相似的物种来代替,以此缓解生物多样性损失所造成的不良结果<sup>[53-55]</sup>。生态系统功能群的物种种类数量反映了生态系统功能冗余水平,物种种类数量多意味着当一个物种缺失时,会有更多的物种来代替其功能。大多数生态系统功能群都仅仅包含有限的几个物种,这几个物种限制了整个生态系统的功能冗余<sup>[40]</sup>。对于珊瑚礁生态系统而言,越多的经济鱼类种数能保证其产出功能;而越多的食草鱼类种数能保证珊瑚礁生态系统中的大型藻类有稳定的消费者,不会过度扩张生长。因此,考虑到功能冗余对珊瑚礁生态系统功能的重要性,本研究选择经济鱼类种数和食草鱼类种数作为评价珊瑚礁生态系统功能的指标。

### 3 徐闻国家级珊瑚礁自然保护区的生态功能评价

利用 *CREFI* 对徐闻国家级珊瑚礁自然保护区生态系统功能进行定量评价以及时空差异分析来验证其在珊瑚礁生态系统管理中的可操作性。

#### 3.1 研究区域

徐闻国家级珊瑚礁自然保护区位于广东省湛江雷州半岛徐闻县西部的灯楼角至水尾角沿岸,包括角尾、迈陈、西连的西部海区。保护区总面积 14 378.5 hm<sup>2</sup>,其中核心区 4 356.1 hm<sup>2</sup>,缓冲区 4 665.2 hm<sup>2</sup>,实验区 5 357.2 hm<sup>2</sup>(图 2)。保护区海域范围内分布着具有热带北缘特点的珊瑚礁生态系统,是中国大陆沿岸现存唯一的大面积珊瑚礁。

#### 3.2 数据来源

研究数据来源于 2016 年徐闻国家级珊瑚礁自然保护区生态调查数据以及保护区管理机构提供的 2006—2012 年雷州半岛西南沿岸生态监控区生态状况调查数据,调查站位包括 S4 至 S7、S14 至 S17、S19 共 9 个(图 2)。

### 3.3 数据去量纲

本研究采用阈值法对数据进行无量纲化处理:

正向指标:

$$Y_i = \frac{X_i}{\text{Max}X_i} \quad (3)$$

负向指标:

$$Y_i = \frac{\text{Min}X_i}{X_i} \quad (4)$$

式(3)至(4)中: $Y_i$ 为指标*i*去量纲后的评价值, $X_i$ 为指标*i*的实际值, $\text{Max}X_i$ 为指标*i*的最大值, $\text{Min}X_i$ 为指标*i*的最小值。

### 3.4 评价结果

3.4.1 2016 年徐闻珊瑚礁生态系统功能的空间差异 由于评价范围较小,且鱼类具有移动范围大、移动迅速的特点,因此,鱼类种类调查就以整个徐闻珊瑚礁生态系统为调查范围,在进行珊瑚礁生态系统功能评价时,“经济鱼类种数”和“食草鱼类种数”这两项指标的取值在各站点是相等的。2016 年调查发现,徐闻珊瑚礁生态系统中,经济鱼类有 10 种,分别为褐菖鲉(*Sebasticus marmoratus*)、三色菖鲉(*Sebasticus tertius*)、线尾锥齿鲷(*Pentapodus setosus*)、点带棘鳞鱼(*Sargocentron cornutum*)、黑斑鲷(*Upeneus tragula*)、孟加拉豆娘鱼(*Abudefduf bengalensis*)、六线豆娘鱼(*Abudefduf sexfasciatus*)、黄尾新雀鲷(*Neopomacentrus azysron*)、斑刻新雀鲷(*Neopomacentrus bankieri*)和六带石斑鱼(*Epinephelus sexfasciatus*);可能食用藻类的杂食性鱼类有 5 种,分别为孟加拉豆娘鱼、六线豆娘鱼、黄尾新雀鲷、斑刻新雀鲷和线尾锥齿鲷。

评价结果显示,站位 S14 的 *CREFI* 最高,该点的珊瑚覆盖率较高而死亡率较低;站位 S17 的珊瑚覆盖率最高,但珊瑚死亡率也较高,进而影响了其 *CREFI* 水平;站位 S19 的珊瑚死亡率最高,是站位 S6 的 15 倍,且珊瑚覆盖率较低,因而其 *CREFI* 是所有站点中最小的(图 2)。

3.4.2 2016 年与 2006 年徐闻珊瑚礁生态系统功能比较分析 2016 年 S7、S16 两个站位的位置分别与 2006 年永久观测点 I、II 位置接近,因此,在进行生态系统功能时序比较时,2016 年珊瑚礁覆盖率和死亡率数据采用站位 S7 和站位 S16 数据的平均值,鱼类调查数据采用当年的珊瑚礁鱼类调查数据(调查所发现鱼类种类已在“3.4.1”中介绍);2006 年珊瑚礁覆盖率和死亡率数据采用两个永久观测站点数据的平均值,鱼类调查数据采用当年徐闻珊瑚礁游泳生物调查数据。

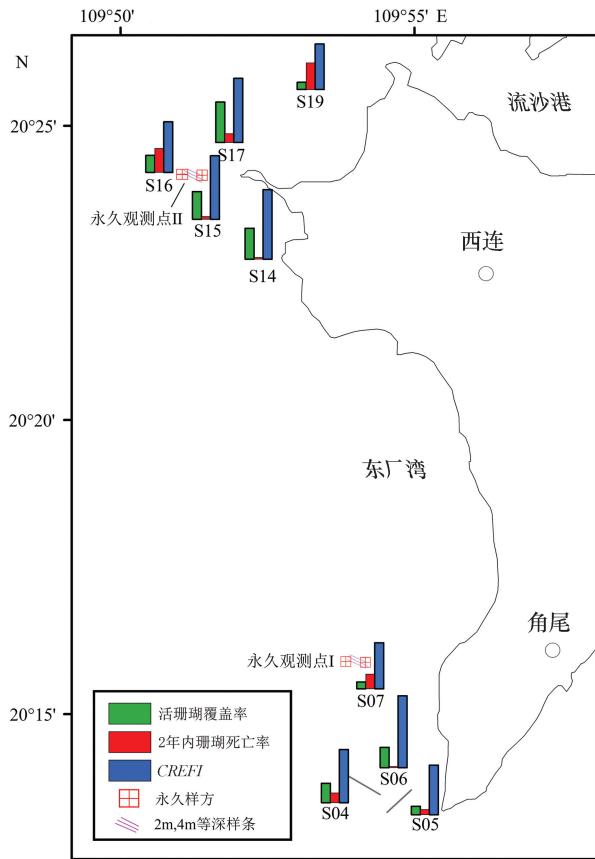


图2 2016年徐闻国家级珊瑚礁自然保护区各监测点生态系统功能指数及部分评价指标值  
 Fig. 2 CREFI and part of its evaluation indicators of each monitoring site in Xuwen Coral Reef Nature Reserve in 2016

2006年调查发现徐闻珊瑚礁生态系统中经济鱼类有10种,分别为尖嘴鲷(*Dasyatis zugei*)、尖尾鳎(*Uroconger lepturus*)、六指马鲛(*Polynemus sextarius*)、短棘银鲈(*Gerres lucidus*)、日本鰐(*Uranoscopus japonicus*)、银鲳(*Pampus argenteus*)、孔鰕虎鱼(*Trypauchen vagina*)、大鳞舌鰐(*Cynoglossus macrolepidotus*)、蓝圆鲀(*Decapterus maruadsi*)、叫姑鱼(*Johnius dussumieri*),可能食用藻类的杂食性鱼类有1种,为孔鰕虎鱼。

2006年和2016年徐闻珊瑚礁生态系统功能评价结果见图3。

2016年的CREFI高于2006年,从各个评价指标来看,2016年的珊瑚礁覆盖率较2006年下降,但

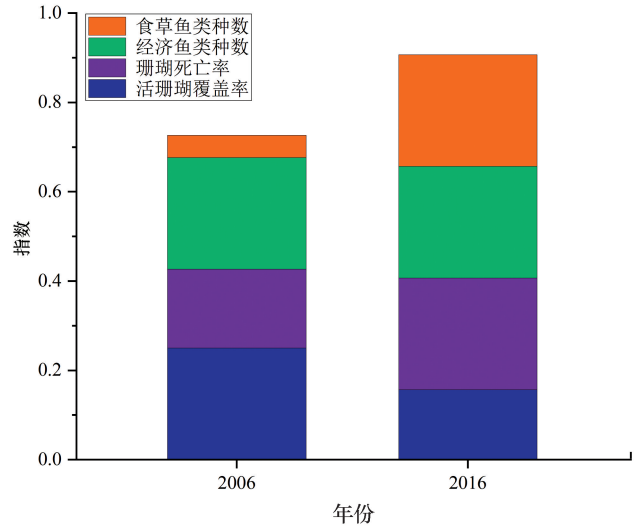


图3 2006年与2016年徐闻珊瑚礁生态系统功能指数  
 Fig. 3 CREFI of Xuwen Coral Reef Nature Reserve in 2006 and 2016

注:图中各指标数据是去量纲化后的数值,其中,“珊瑚死亡率”指标为负向指标,其数据已经过正向化处理。

珊瑚礁的死亡率也有所降低;2016年食草鱼类种数明显提升,经济鱼类种类数量没有变化。

#### 4 结论

本研究首先梳理了生态系统功能的内涵,认为生态系统功能是指生态系统维持自身或其他生态系统健康并直接或间接为人类提供产品和服务的能力。在此基础上,从生境功能、调节功能、产出功能和信息功能4个方面分析了珊瑚礁生态系统功能的产生机制。

此外,构建了“珊瑚礁生态系统功能指数”(CREFI),并以徐闻国家级珊瑚礁自然保护区为例,验证其适用性和可操作性。结果显示,CREFI具有清晰的应用目标和理论框架,评价数据具有较强的可获得性和科学性,评价结果能清晰地反映珊瑚礁生态系统功能的时空差异,较好地评价珊瑚礁生态系统的健康状况和功能稳定性,可作为一种珊瑚礁生态系统功能定量评价模型,为珊瑚礁生态系统管理提供客观的决策参考依据。

#### 参考文献:

[1] 郑新庆,张涵,陈彬,等. 珊瑚礁生态修复效果评价指标体系研究进展[J]. 应用海洋学报, 2021, 40(1): 126-141.  
 ZHENG X Q, ZHANG H, CHEN B, et al. Advance of indicator system for the evaluation of coral reef restoration effectiveness[J]. Journal of Applied Oceanography, 2021, 40(1): 126-141.

[2] SHEPPARD C. Coral Reefs-Economics and Ecology, H.S.J. Cesar (editor), 2000. Collected essays on the Economics of Coral Reefs. Published by CORDIO, Kalmar University, Sweden 244 pp. [J]. Marine Pollution Bulletin, 2001, 42(2): 162.

- [3] ELLIFF C I, SILVA I R. Coral reefs as the first line of defense: shoreline protection in face of climate change[J]. *Marine Environmental Research*, 2017, 127: 148-154.
- [4] BEANS C. Science and culture; artistic endeavors strive to save coral reefs[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(21): 5 303-5 305.
- [5] PANDOLFI J M, CONNOLLY S R, MARSHALL D J, et al. Projecting coral reef futures under global warming and ocean acidification[J]. *Science*, 2011, 333(6 041): 418-422.
- [6] ZANEVELD J R, BURKEPILE D E, SHANTZ A A, et al. Overfishing and nutrient pollution interact with temperature to disrupt coral reefs down to microbial scales[J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 11833.
- [7] 李劲松. 海南省海岸带综合管理研究: 以三亚珊瑚礁保护区为例[D]. 海南: 海南大学, 2017.
- LI J S. Study on integrated coastal zone management of Hainan Province: a case study of Sanya Coral Reef Reserve [D]. Haikou: Hainan University, 2017.
- [8] 张乔民, 余克服, 施祺, 等. 全球珊瑚礁监测与管理保护评述[J]. *热带海洋学报*, 2006, 25(2): 71-78.
- ZHANG Q M, YU K F, SHI Q, et al. A review of monitoring, conservation and management of global coral reefs[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2006, 25(2): 71-78.
- [9] 王丽荣, 赵焕庭. 珊瑚礁生态保护与管理研究[J]. *生态学杂志*, 2004, 23(4): 103-108.
- WANG L R, ZHAO H T. Ecological conservation and management of coral reef[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2004, 23(4): 103-108.
- [10] 李元超, 陈海洲, 郑新庆, 等. 海南铜鼓岭国家级自然保护区海域珊瑚的分布及其健康状况评价[J]. *应用海洋学学报*, 2014, 33(4): 539-545.
- LI Y C, CHEN H Z, ZHENG X Q, et al. Distribution and healthy status of corals in Tongguling National Nature Reserves[J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2014, 33(4): 539-545.
- [11] ODUM E F. Fundamentals of ecology[J]. *Oikos*, 1954, 5(1): 134.
- [12] MEYER K M, HOPPLE A M, KLEIN A M, et al. Community structure-ecosystem function relationships in the Congo Basin methane cycle depend on the physiological scale of function[J]. *Molecular Ecology*, 2020, 29(10): 1 806-1 819.
- [13] EDWARDS M, KONAR B, KIM J H, et al. Marine deforestation leads to widespread loss of ecosystem function[J]. *PLoS ONE*, 2020, 15(3): e0226173.
- [14] DE GROOT R S, WILSON M A, BOUMANS R M J. A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services[J]. *Ecological Economics*, 2002, 41(3): 393-408.
- [15] 李宇亮, 温荣伟, 陈克亮. 海洋生态系统服务价值研究进展[J]. *生态经济*, 2017, 33(6): 120-126.
- LI Y L, WEN R W, CHEN K L. A review on the progress in marine ecosystem services valuation[J]. *Ecological Economy*, 2017, 33(6): 120-126.
- [16] JAX K. Function and “functioning” in ecology: what does it mean? [J]. *Oikos*, 2005, 111(3): 641-648.
- [17] MOBERG F, FOLKE C. Ecological goods and services of coral reef ecosystems[J]. *Ecological Economics*, 1999, 29(2): 215-233.
- [18] 傅秀梅, 王长云, 邵长伦, 等. 中国珊瑚礁资源状况及其药用研究调查 I. 珊瑚礁资源与生态功能[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2009, 39(4): 676-684.
- FU X M, WANG C Y, SHAO C L, et al. Investigation on the status of coral resources and medicinal research in China I. Corel reef resources and ecological functions[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2009, 39(4): 676-684.
- [19] 赵美霞, 余克服, 张乔民. 珊瑚礁区的生物多样性及其生态功能[J]. *生态学报*, 2006, 26(1): 186-194.
- ZHAO M X, YU K F, ZHANG Q M. Review on coral reefs biodiversity and ecological function[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(1): 186-194.
- [20] ELISE S, URBINA-BARRETO I, PINEL R, et al. Assessing key ecosystem functions through soundscapes: a new perspective from coral reefs [J]. *Ecological Indicators*, 2019, 107: 105623.
- [21] MCALLISTER D E. What is the status of the world's coral reef fishes? [J]. *Sea Wind*, 2019, 5: 14-18.
- [22] ODGEN J C, GLADFELTER E. Coral reefs, seagrass beds and mangroves: their interaction in the coastal zones of the Caribbean[J]. *Unesco Reports in Marine Science*, 1983, 23: 133.
- [23] 张颖, 杨清松, 张燕英, 等. 造礁石珊瑚共附生固氮微生物的固氮活性[J]. *生态学杂志*, 2018, 37(7): 2 122-2 129.
- ZHANG Y, YANG Q S, ZHANG Y Y, et al. Nitrogen-fixation activity of the hermatypic corals associated diazotrophs[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, 37(7): 2 122-2 129.
- [24] 龚骏, 宋延静, 张晓黎. 海岸带沉积物中氮循环功能微生物多样性[J]. *生物多样性*, 2013, 21(4): 12.
- GONG J, SONG Y J, ZHANG X L. Phylogenetic and functional diversity of nitrogen cycling microbes in coastal sediments[J]. *Biodiversity Science*, 2013, 21(4): 12.
- [25] KUEHLMANN D H H. The sensitivity of coral reefs to environmental pollution[J]. *Ambio*, 1988, 17(1): 13-21.
- [26] 石拓, 郑新庆, 张涵, 等. 珊瑚礁: 减缓气候变化的潜在蓝色碳汇[J]. *中国科学院院刊*, 2021, 36(3): 270-278.
- SHI T, ZHENG X Q, ZHANG H, et al. Coral reefs: potential blue carbon sinks for climate change mitigation[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2021, 36(3): 270-278.
- [27] HOEGH-GULDBERG O, POLOCZANSKA E S, SKIRVING W, et al. Coral reef ecosystems under climate change and ocean acidification[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2017, 4: 158.
- [28] CARTE B K. Biomedical potential of marine natural products[J]. *BioScience*, 1996, 46(4): 271-286.

- [29] SPURGEON J. The economic valuation of coral reefs[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 1992, 24(11): 529-536.
- [30] PENDLETON L H. Valuing coral reef protection[J]. *Ocean & Coastal Management*, 1995, 26(2): 119-131.
- [31] MOBERG F, FOLKE C. Ecological goods and services of coral reef ecosystems[J]. *Ecological Economics*, 1999, 29(2): 215-233.
- [32] EDMONDS N J, AL-ZAIDAN A S, AL-SABAH A A, et al. Kuwait's marine biodiversity: qualitative assessment of indicator habitats and species [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2021, 163: 111915.
- [33] EDINGER E N, AZMY K, DIEGOR W, et al. Heavy metal contamination from gold mining recorded in *Porites lobata* skeletons, Buyat-Ratototok district, North Sulawesi, Indonesia[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2008, 56(9): 1 553-1 569.
- [34] DE VILLIERS S, NELSON B K, CHIVAS A R. Biological controls on coral Sr/Ca and  $\delta^{18}O$  reconstructions of sea surface temperatures[J]. *Science*, 1995, 269(5 228): 1 247-1 249.
- [35] GAGAN M K, AYLIFFE L K, HOPLEY D, et al. Temperature and surface-ocean water balance of the mid-Holocene tropical western Pacific[J]. *Science*, 1998, 279(5 353): 1 014-1 018.
- [36] ISDALE P. Fluorescent bands in massive corals record centuries of coastal rainfall[J]. *Nature*, 1984, 310(5 978): 578-579.
- [37] PERRY C T, EDINGER E N, KENCH P S, et al. Estimating rates of biologically driven coral reef framework production and erosion: a new census-based carbonate budget methodology and applications to the reefs of Bonaire[J]. *Coral Reefs*, 2012, 31(3): 853-868.
- [38] KENNEDY E V, PERRY C T, HALLORAN P R, et al. Avoiding coral reef functional collapse requires local and global action[J]. *Current Biology*, 2013, 23(10): 912-918.
- [39] PRATCHETT M S, HOEY A S, WILSON S K. Reef degradation and the loss of critical ecosystem goods and services provided by coral reef fishes [J]. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2014, 7: 37-43.
- [40] MICHELI F, MUMBY P J, BRUMBAUGH D R, et al. High vulnerability of ecosystem function and services to diversity loss in Caribbean coral reefs[J]. *Biological Conservation*, 2014, 171: 186-194.
- [41] CHEAL A J, MACNEIL M A, CRIPPS E, et al. Coral-macroalgal phase shifts or reef resilience: links with diversity and functional roles of herbivorous fishes on the Great Barrier Reef[J]. *Coral Reefs*, 2010, 29(4): 1 005-1 015.
- [42] RAMOS C A C, DE KIKUCHI R K P, AMARAL F D, et al. A test of herbivory-mediated coral-algae interaction on a Brazilian reef during a bleaching event[J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2014, 456: 1-7.
- [43] LITTLER M M, LITTLER D S, BROOKS B L. Harmful algae on tropical coral reefs: bottom-up eutrophication and top-down herbivory[J]. *Harmful Algae*, 2016, 5(5): 565-585.
- [44] TURNER R K, BROUWER R, GEORGIU S, et al. Ecosystem functions and services: an integrated framework and case study for environmental evaluation[EB/OL]. [2022-06-10]. [https://www.researchgate.net/publication/265273223\\_ECOSYSTEM\\_FUNCTIONS\\_AND\\_SERVICES\\_AN\\_INTEGRATED\\_FRAMEWORK\\_AND\\_CASE\\_STUDY\\_FOR\\_ENVIRONMENTAL\\_EVALUATION](https://www.researchgate.net/publication/265273223_ECOSYSTEM_FUNCTIONS_AND_SERVICES_AN_INTEGRATED_FRAMEWORK_AND_CASE_STUDY_FOR_ENVIRONMENTAL_EVALUATION).
- [45] Healthy Reefs Initiative. 2015 report card for the mesoamerican reef [EB/OL]. [2022-06-10]. <https://www.healthyreefs.org/cms/front-page-2/mar-en-small/>.
- [46] YEE S H, DITTMAR J A, OLIVER L M. Comparison of methods for quantifying reef ecosystem services: a case study mapping services for St. Croix, USVI[J]. *Ecosystem Services*, 2014, 8: 1-15.
- [47] SEBENS K P, JOHNSON A S. Effects of water movement on prey capture and distribution of reef corals[J]. *Hydrobiologia*, 1991, 226(2): 91-101.
- [48] SMITH J E, SHAW M, EDWARDS R A, et al. Indirect effects of algae on coral: algae-mediated, microbe-induced coral mortality[J]. *Ecology Letters*, 2006, 9(7): 835-845.
- [49] MUMBY P J, HASTINGS A, EDWARDS H J. Thresholds and the resilience of Caribbean coral reefs[J]. *Nature*, 2007, 450(7 166): 98-101.
- [50] BRUNO J F, SWEATMAN H, PRECHT W F, et al. Assessing evidence of phase shifts from coral to macroalgal dominance on coral reefs[J]. *Ecology*, 2009, 90(6): 1 478-1 484.
- [51] ALVAREZ-FILIP L, DULVY N K, GILL G A, et al. Flattening of Caribbean coral reefs: region-wide declines in architectural complexity[J]. *Proceedings Biological Sciences*, 2009, 276(1 669): 3 019-3 025.
- [52] ELMQVIST T, FOLKE C, NYSTRÖM M, et al. Response diversity, ecosystem change, and resilience[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2003, 1(9): 488-494.
- [53] SCHINDLER D W. Linking species and communities to ecosystem management: a perspective from the experimental lakes experience[M]. Boston: Springer U S, 1995: 313-325.
- [54] WALKER B H. Biodiversity and ecological redundancy[J]. *Conservation Biology*, 1992, 6(1): 18-23.
- [55] NAEEM S. Species redundancy and ecosystem reliability[J]. *Conservation Biology*, 1998, 12(1): 39-45.

# Generation mechanism and evaluation method of coral reef ecosystem functions

LI Yuliang<sup>1</sup>, GAO Yu<sup>1</sup>, ZHENG Xinqing<sup>1,2,3</sup>, LIU Heng<sup>1</sup>, CHEN Keliang<sup>1,2\*</sup>

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

2. Key Laboratory of Marine Ecological Conservation and Restoration, MNR, Xiamen 361005, China;

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

**Abstract:** Ecosystem function refers to the ability of an ecosystem to maintain its own or other ecosystem health and to provide products and services directly or indirectly for human beings. The objective evaluation of coral reef ecosystem function is significantly important to realize the effective protection and sustainable utilization of resources. This paper analyzes the generation mechanism of coral reef ecosystem function based on the concept and connotation of ecosystem function. It provides a quantitative overall evaluation on the health and function of coral reef ecosystem integrity of Xuwen National Coral Reef Nature Reserve in 2006 and 2016 survey data using the coral reef ecosystem function evaluation method based on the coral reef ecosystem function index (CREFI). The results showed that the *CREFI* in Xuwen National Coral Reef Nature Reserve in 2016 was higher than that in 2006, which was mainly due to the decrease in the mortality rate of coral reefs and the obvious increase in the species of herbivorous fish. The evaluation results of *CREFI* with clear goals and theoretical framework of application, available and scientific evaluation data can clearly reflect the temporal and spatial variations, the healthy status and function stability of the coral reef ecosystem function. It also provides a reference for coral reef ecosystem management and decision-making as a quantitative evaluation model of coral reef ecosystem function.

**Key words:** marine environmental science; coral reef; ecosystem function; assessment method; ecosystem management

DOI: 10.3969/J.ISSN.2095-4972.2022.03.012

(责任编辑:肖 静)