

南海典型珊瑚礁生态系统健康评价方法研究

吴莹莹^{1,2}, 雷新明¹, 黄晖¹, 张浴阳¹, 丁德文^{1,2,3}

1. 中国科学院南海海洋研究所, 广东 广州 510301;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 自然资源部第一海洋研究所, 山东 青岛 266061

摘要: 本研究基于系统复杂性原理, 提出了南海典型珊瑚礁生态系统健康评价方法——组织力及系统功能评价法。该方法的评价框架包括珊瑚礁生态系统结构及功能、珊瑚礁生态系统与其他海洋生态系统间关系、与人类社会生态系统间关系、珊瑚礁生态系统发展制约因素等四大模块; 评价指标体系分为目标层、准则层、因素层、要素层等 6 个层级共计 67 个指标。同时, 本研究系统地提出了珊瑚礁生态系统健康评价的流程, 提高了珊瑚礁健康评价工作的规范性和时效性。应用组织力及系统功能评价法对 2011—2018 年西沙群岛珊瑚礁生态系统进行了健康评价, 结果显示自 2011 年起健康指数年均下降 2.3%~2.4%, 除 2012 年、2015 年健康指数稍有回升外, 其余年份均呈下降走势, 整体评价为亚健康状态。根据七连屿周边岛屿的实地考察和居民生活问卷调查结果, 2006—2008 年的渔业发展、2012 年的海星泛滥和 2014—2015 年的岛礁建设均对珊瑚礁生态系统造成了较大影响, 使 10 年内渔业产量下降了 50%~80%。这与应用组织力及系统功能评价法的评价结果相吻合, 侧面验证了该评价方法的科学性和可行性。

关键词: 南海; 珊瑚礁; 生态系统; 健康评价

中图分类号: P735.12

文献标识码: A

文章编号: 1009-5470(2021)04-0084-14

Study on the health assessment method of typical coral reef ecosystem in the South China Sea

WU Yingying^{1,2}, LEI Xinming¹, HUANG Hui¹, ZHANG Yuyang¹, DING Dewen^{1,2,3}

1. South China Sea Institute of Oceanography, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. The First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China

Abstract: In this paper, we discuss the principle of ecosystem complexity, and propose a method for evaluating the health of typical coral reef ecosystems in the South China Sea—"Organization and System Function Evaluation." The evaluation framework of this method includes four modules: the structure and function of coral reef ecosystems, the relationship between coral reef ecosystems and other marine ecosystems, the relationship with human social ecosystems, and the development constraints of coral reef ecosystems. The evaluation index system is divided into six levels, including target level, criterion level, factor level, and element level, totaling 67 indicators. We systematically put forward the process of coral reef ecosystem health evaluation, which improves the standardization and timeliness of coral reef health evaluation. The organizing power and

收稿日期: 2020-07-07; 修订日期: 2020-09-09。姚衍桃编辑

基金项目: 国家自然科学基金项目(41306144、41676150); 国家重点研发计划课题(2017YFC0506301); 中国科学院战略性先导科技专项(A类)(XDA13020402); 广东省基础与应用基础研究基金项目(2019A1515011532)

作者简介: 吴莹莹(1982—), 女, 江西省南昌市人, 博士研究生, 主要从事海洋生态学研究。email: wuyingying@itpcas.ac.cn

通信作者: 丁德文, 主要从事海洋生态与环境科学工程研究。email: dingdw@163.com

Received date: 2020-07-07; Revised date: 2020-09-09. Editor: YAO Yantao

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (41306144, 41676150); National Key Research and Development Program of China (2017YFC0506301); Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (XDA13020402); Guangdong Basic and Applied Basic Research Foundation (2019A1515011532)

Corresponding author: DING Dewen. email: dingdw@163.com

system function evaluation method was used to evaluate the health of the coral reef ecosystem of the Paracel Islands from 2011 to 2018. The results show that the health index has fallen by 2.3%-2.4% annually since 2011. Except for a slight rebound in 2012 and 2015, the health index has shown a downward trend in the rest of the years. The overall evaluation is that the coral reef ecosystem of the Paracel Islands is sub-healthy. This result is consistent with the results of field investigations and questionnaire surveys on residents' lives around the Qilianyu Islands. We find that the development of fisheries in 2006-2008, the flooding of starfish in 2012, and the construction of islands and reefs in 2014-2015 had great impacts on the coral reef ecosystem. The fishery output dropped by 50%-80% in 10 years, which is also consistent with the evaluation results. It verifies the science and feasibility of the evaluation method from another angle.

Key words: South China Sea; coral reef; ecosystem; health assessment

生态系统是指在自然界一定的空间内, 生物与环境构成的统一整体。生态系统健康是指在这个统一整体中, 生物与环境之间相互影响、相互制约, 并在一定时期内处于相对稳定的动态平衡状态(林丽芳 等, 2018; 孙有方 等, 2018)。生态系统健康评价研究有助于更好地理解和管理人类行为以提升环境质量, 近年来其研究尺度从群落到生态系统、到景观不断拓展, 其成果已经被广泛地应用到河流生态系统、湖泊生态系统、海洋生态系统中。较早出现的评价方法是“生物指标评价法”(Idris et al, 2006; 牛文涛 等, 2009), 该方法较好地解决了用单一类型指标快捷评价珊瑚礁健康状况的问题(Pennisi, 1997; Jameson et al, 2001; Risk et al, 2001), 其局限性主要在于未引入生态系统水平上的综合指标, 具体体现在两个方面: 一是仅从生态系统胁迫角度评价生态系统健康不适用于系统整体健康发展趋势的预测需求; 二是评价指标的全面性和反应灵敏度不足。由于单一物种与整体生态系统功能和性质变化相关性较弱, 系统受胁迫初期指标因素可能会发生反应滞后或超前或不能区分正常扰动和异常波动等问题。此外, 前人提出的物种筛选方法并没有建立统一标准, 因而也影响了研究效果。另一种较为常用的健康评价方法是“结构功能指标评价法”, 相关的评价模型有“生态-经济-社会”评价模型(崔保山 等, 2003)、“压力-状态-响应”模型(肖佳媚, 2007)、“活力-组织力-恢复力”模型(Argüelles-Jiménez et al, 2020)。结构功能指标评价法能够反映外界胁迫的长期累积效应, 优点是稳健性较高。但其敏感性较低, 对环境和健康状况的变化反映需要较长时间的监测分析。结构功能指标评价法存在三方面问题: 一是缺少系统性的理论支撑, 在原理层面没有系统性地阐述珊瑚礁生态健康评价方法的理论依据, 例如没有提出评价模型构建机制、指标体系建立的理论依据; 二是指标组合不成体系, 没有建立指标筛选原

则和筛选标准; 三是模型时空普适性不够, 评价模型之间差异较大, 不利于在不同地域和发展时期的迁移使用, 影响研究结论之间的比较分析。

海洋生态系统是一类复杂的社会-经济-自然复合生态系统, 其庞大的组织结构、循环交错的能量流动网络、动态平衡的群落演替等特征, 决定了其并不适合通过选取有限的几个指示物种进行综合健康评价的方法。珊瑚礁生态系统健康水平下降导致珊瑚礁生态系统逐渐被其他生态系统替代, 珊瑚礁生态系统与其他生态系统组成的更高层级的系统整体受损, 更严重的将会造成高层级系统内物质能量循环断开或受阻, 珊瑚生存环境更加窘迫。可见, 仅讨论珊瑚礁本身的压力和响应不能体现珊瑚礁生态系统的健康水平和发展趋势, 需要拓宽评价视野, 将人与自然系统作为一个整体去考虑, 建立涵盖面广、信息量大的指标体系, 从更高层级反映珊瑚礁生态系统的实际状态和未来趋势。综上, 本文提出珊瑚礁生态系统健康评价方法的设计思路为: 1) 健康的生态系统具有良好的组织力。组织力是维系复杂活跃的珊瑚礁生态系统调控机制的统称, 是个体独特的基因构成、发育路径、组织规律和进化动力学共同作用的结果。生态系统健康的概念已经不单纯是一个生态学上的定义, 在系统组织力的维系下, 生态、社会经济、人类健康三个领域合在一起形成了独一无二的生物物种和生态组合规律。2) 健康的珊瑚礁生态系统内部物种结构是完整有序的, 例如种间关系和功能良好, 生物多样性或系统复杂性高。在时间水平上, 同一段时间内群落演替保持有序进行, 演替进程未因外界环境变化而中断, 具有良好的系统弹性; 在空间水平上, 同一区域内物种之间遵循互惠共生的法则(牛文涛 等, 2009, 2010), 系统处于高效产能状态, 未受到外界扰动。3) 在组织力调节下, 各种构成个体聚集成为与个体特性简单相加完全不同的全新的整体特性。其生态系统健

康评价理论体系不仅包括生态系统生理方面的要素,而且还应包括复杂的人类价值及生物的、物理的、伦理的、艺术的、哲学的和经济学的观点。

本文在借鉴前人评价方法的基础上,基于生态学和系统复杂性原理提出了一种普适性较强且指标体系较为完整的珊瑚礁生态系统健康评价方法,拟命名为“组织力及系统功能评价法”。同时,系统地提出了珊瑚礁生态系统健康评价工作的完整流程,即:建立珊瑚礁生态系统通用型评价框架→筛选关键指标形成健康评价指标体系→设计符合区域特点的评价模型→结合实地调研及历史数据复核评价模型的科学性和有效性→完善通用型评价框架,促使评价框架和指标不断在实践中得到完善和提升。本文研究成果将为珊瑚礁生态系统健康评价与管理提供科学支撑。

1 材料与方法

1.1 实验对象及数据来源

本研究的实验对象为西沙群岛海域珊瑚礁生态系统。实验数据来源于实地调查及南海珊瑚礁科学考察报告、海南省统计年鉴、海南省生态环境厅生态环境及海洋环境公报。生物类数据来自 2005—2008 年西沙群岛部分岛礁(永兴岛、赵述岛、金银岛、东岛、北岛、羚羊礁、西沙洲、晋卿岛、甘泉岛)的 56 个调查站位每年 2 个航次的生物调查结果,调查范围为 109°13′—112°51′E、16°60′—18°13′N。环境类数据来自国家环境保护总局、海南省生态环境厅、国家自然资源部南海局 2001—2019 年发布的有关中国近岸及海南省的生态环境及海洋环境公报。经济类数据来自国家统计局 2010—2019 年海南省统计年鉴。具体包括:1) 海南省海洋与渔业科学院,《西沙珊瑚礁生态监控区报告》(2014—2018 年);2) 海南省海洋与渔业科学院,《海南省海洋自然保护区生物多样性调查报告》(2016—2018 年);3) 中国科学院南海海洋研究所,《珊瑚礁生态调查研究报告》(2005 年、2006 年、2015 年);4) 海南省统计局,《海南统计年鉴》(2010—2019 年);5) 国家环境保护总局,《中国近岸海域(生态)环境质量公报》(2001—2018 年);6) 海南省生态环境厅(原海南省海洋与渔业厅),《海南省(生态)环境状况公报》(2009—2019 年);7) 海南省生态环境厅(原海南省海洋与渔业厅),《海南省海洋环境状况公报》(2005—2018 年);8) 国家自然资源部南海局,《南海区海洋环境状况公报》(2009—2016 年)。

1.2 评价指数

珊瑚礁生态系统健康评价采用分级指标评分法,逐级加权,综合评定健康指数,然而目前并没有统一公认的等级划分标准。珊瑚礁健康状况通常划分为 4 级:理想状况、健康、亚健康、不健康(表 1)。

表 1 珊瑚礁生态系统健康评估分级表

Tab. 1 Grading results of coral health appraisal

级别	赋分范围	健康状况
1	80~100	理想状况
2	60~80	健康
3	35~60	亚健康
4	0~35	不健康

评价为“健康”表明珊瑚礁生态系统保持其自然属性,生物多样性及生态系统结构基本稳定,生态系统主要服务功能正常发挥,病害或人为活动所产生的生态压力在生态系统的承载范围之内。评价为“亚健康”表明珊瑚礁生态系统基本保持其自然属性,生物多样性及生态系统结构发生一定程度的改变,生态系统主要服务功能不能完全正常发挥,病害或人为活动所产生的生态压力超出生态系统的承载能力,但生态系统在去除人为干预的情况下尚能自然修复。评价为“不健康”表明珊瑚礁生态系统自然属性明显改变,生物多样性及生态系统结构发生较大程度改变,生态系统主要服务功能严重退化或丧失,病害或人为活动所产生的生态压力超出生态系统的承载能力,生态系统在短期内难以恢复。

1.3 评价框架

珊瑚礁生态系统是一个开放的复杂系统,由珊瑚虫、海星、海胆、螺类等底栖生物、蓝藻等浮游生物、珊瑚礁鱼类、细菌真菌类等无数个体聚集而成的相对独立的一个整体(雷新明等,2019)。珊瑚礁生态系统健康评价框架作为健康评价工作的基础和核心,应体现出珊瑚礁生态系统这种独一无二的生物物种和生态组合规律。基于生态学和系统复杂性理论,将珊瑚礁生态系统的组织结构、能量循环及动态平衡等独特的整体特征纳入框架,同时结合珊瑚礁调查和观测情况,梳理统筹生物群落、物理化学、社会经济、人类健康等各方面因素,形成了关于珊瑚礁生态系统健康的评价框架(赵帅等,2013;柴立和等,2004)。

本研究根据珊瑚礁生态系统结构和压力-状态-响应模型、珊瑚礁生态系统结构与功能重要因素的比重关系,邀请业内专家,根据西沙群岛珊瑚礁生

态系统独特的物候条件和高度丰富的物种结构以及近年岛礁开发情况，筛选了系统结构和功能方面的关键要素组成评价框架(表 2)。该评价框架包括四大模块，分别是珊瑚礁生态系统结构及功能、珊瑚礁生态系统与其他海洋生态系统间关系、与人类社会

生态系统间关系、珊瑚礁生态系统发展制约因素。第一模块为生物类因素，是体系评价的固定板块；第二至第四模块统称为环境类因素，可随地域特性和调查情况设置个性化的评价指标及权重参与生态系统整体评价。

表 2 珊瑚礁生态系统健康评价框架
Tab. 2 Evaluation framework of coral reef ecosystem

评价模块	类别	小类	指标
模块一：珊瑚礁生态系统结构及功能	1.1 系统共生	1.1.1 物种间共生关系和功能	组织粘性
			食物链完整度
			消费者存量 生产者存量 分解者存量
	1.2 系统互惠	1.1.2 种群组成动态平衡水平	天敌密度
			珊瑚关键种存量
	1.3 系统弹性	食物网物质能量循环	覆盖率及病害
模块二：珊瑚礁生态系统与其他海洋生态系统间关系	2.1 陆地	珊瑚繁殖恢复力及遗传抗逆性	物种多样性、均匀度
		2.1.1 栖息地	城市建设与野生林地保护
		2.1.2 空间外力	自然灾害频率和强度
	2.2 水域	2.1.3 地理分布	纬度及深度
		2.2.1 季节性洋流	
		2.2.2 初级生产力相关水文条件	
模块三：珊瑚礁生态系统与人类社会生态系统间关系	3.1 人类社会系统压力	2.2.3 水质富营养化	
		3.1.1 人口	生存资源及就业需求
		3.1.2 环境	治污排污、垃圾填埋
	3.2 人类社会系统弹性	3.2.1 城市建设	沿海城市生态建设水平与远景规划
		3.2.2 经济	渔业、运输业、制造业、旅游业发展
		3.2.3 政治	维护领土领海，国家权力博弈
模块四：珊瑚礁生态系统发展制约因素	4.1 空间因素		陆源污染物
			人口增长
		4.1.1 人文因素	经济及制造业发展
			国家政策及国际形势
			生态功能型城市建设与规划
			海洋经济发展
		4.1.2 水域因素	洋流及板块运动
			温室效应
	4.2 时间因素	富营养化及石油泄漏	
		4.1.3 气候因素	自然灾害
		引发生态系统健康状况整体变化的时间点，即缓慢侵蚀性因素	

本文提出的珊瑚礁生态系统健康评价框架，是对珊瑚礁生态系统健康评价方法规范化和范式化的一次新尝试。它涵盖了生态系统结构、生态功能、压力、物理化学、社会经济及人类健康等各类指标，能从综合层面反映珊瑚礁生态系统的环境质量。评价框架的第一模块是生态系统结构及功能，这个大类包含三小类系统能力，分别是系统内生物共生能力、互惠能力和系统弹性恢复能力。系统互惠是指

物质能量循环顺畅时，系统内生物能够通过物质能量交换来获得必须的营养物质；系统弹性是指珊瑚繁殖率及补充量高时，系统能够在逆境中保持种群的延续性。本文将从物种和种群两个水平上分别评估共生能力。在物种水平上，共生关系的基础是组织黏性和关键种存量，当消费者、生产者、分解者存量丰富且组成交错牢固的食物链时，会产生较强的组织黏性；造礁石珊瑚关键种存量较高且无天敌

威胁的情况下,能够构建坚固的珊瑚礁礁体(黄林韬等, 2020),为珊瑚礁生物提供赖以生存的物理生境(蔡泽富等, 2015)。种群水平上的共生体现为种群组成的动态平衡,建立于物种多样性和均匀度较高的基础之上(Huang et al, 2006)。评价框架的第二模块是生态系统与其他海洋生态系统间关系。系统间关系按地质地貌分为陆地和水域两大类,陆地模块包括生物栖息地保护和城市建设、自然灾害、地理分布和深度三类指标,例如用森林及保护区占比衡量生物栖息地情况,用巨浪天数、潮高超标次数衡量自然灾害破坏水平。水域模块包括水域富营养化程度和季节性洋流轨迹变化。评价框架的第三模块是生态系统与人类社会生态系统间关系,分为人类社会系统压力和人类社会系统弹性两类。压力来源为人口与环境(施祺等, 2007),具体的压力指标包括生存资源占用、治污排污技术水平。弹性来源于城市建设、经济政治博弈,具体为城市生态文明建设的实际举措和远景规划、渔业、运输业、旅游业发展以及主权领土和能源争夺战争。评价框架的第四模块是生态系统发展制约因素,包括了人文因素、水域因素、气候因素、时间因素。人文因素具体为人口增长、经济及制造业发展、国家政策及国际形势、城市建设与经济发展等;水域因素为洋流、温室效应、富营养化及石油泄漏等;气候因素为自然灾害等;时间因素为引发系统健康整体改变的时间累积效应。

1.4 评价指标体系

按照评价框架的模块划分,结合前人的珊瑚礁调查资料及筛选标准,选择一系列关键性指标,之后运用层次分析法将关键指标在时间和空间层级分类排序,构建起珊瑚礁生态系统健康评价的关键指标体系。关键性指标是体现一定时间尺度内系统被干扰的指示标记。珊瑚礁生态系统作为一个复杂的演化系统,“不稳定—变化—稳定”是组织在干扰中趋向于相对稳定的调节过程,当系统发生了显著不同的波动时,关键性指标应出现实时或滞后的显著变化(黄晖等, 2008, 2011)。因此,本文将关键性指标的筛选标准设置为:第一,关键性指标应是可指示系统受到干扰后的恢复能力指标;第二,关键性指标应具有整体关键性,若失去关键要素或关键要素及其相关的反馈作用发生变化,将影响本层次甚至更高层次的结构、功能和运动规律。

本研究以南海典型珊瑚礁生态系统结构和生态

服务功能为主要评估内容,建立了南海典型珊瑚礁生态系统健康评价体系(见表3),共包括5个层次:1)第1层次是目标层,为“生态系统健康指数”。2)第2层次是次目标层,包括:①“生态系统内平衡水平”,用于评价珊瑚礁在人类活动的干扰下与健康状态的距离,以反映系统内的稳定程度;②“生态系统间平衡水平”,用于评价珊瑚礁生态系统与外部其他生态系统间的平衡状态及趋势。3)第3层次是准则层,包括目标层中“生态系统内平衡水平”划分的“生态系统结构均衡性:共生关系”和“生态系统功能:互惠关系”2个准则,以及“生态系统间平衡水平”划分的“地理环境-栖息地破坏水平”“水环境变化”和“人类社会环境发展水平”3个准则。4)第4层次是次准则层,包括“物种间共生关系和功能”“种群组成动态平衡水平”“物质能量循环-鱼类密度与石珊瑚覆盖率比值”“系统弹性,繁衍和恢复力”“人为开发”“自然灾害”“生产力相关水文条件”“水质条件”“人类生活环境”“人口素质”“环保水平”“经济发展”等12个次准则。5)第5层次是因素层,包括“组织黏性”“关键物种生物量”“物种多样性”“物种均匀度”“病害”“幼体补充量”“死亡率”“森林覆盖率”“自然保护区占比”“自然灾害强度”“自然灾害频率”“海水pH”“海表温度”“海水透明度”“悬浮物”“重金属含量”“富营养水平”“站点油类含量”“污水排放量”“污水水质”“人口密度”“文盲率”“农村居民人均可支配收入”“城镇污水处理率”“农村生活污水处理率”“工业固体综合利用率”“生活垃圾无害化处理率”“渔业捕捞发展”“海水养殖业发展”“货物吞吐量”“旅游业发展”“工业制造业发展”等32大类。6)第6层次是要素层,包括67项指标。

1.5 评价模型设计

根据达尔文自然选择学说阐述的生物体和生态系统的适应与进化过程,珊瑚礁生态系统具有根据外部环境条件变化适应和进化的能力。生态系统的均衡状态是一个持续的重组—退化—发展的动态平衡,当系统达到自组织的临界条件时,系统在适应环境过程中启动了自调节的自组织行为,逐渐形成珊瑚礁独特的整体行为与特征。复杂的珊瑚礁生态系统因存在着由大量个体组成的结构特性而不易于预测其发展趋势,其中某些组分变动时可能会影响到整个系统,甚至导致系统突然性全面崩溃,例如极端的白化现象和天敌灾害对种群结构会造成较大损伤。

续表

目标层	次目标层	准则层	次准则层	因素层	一级要素层	二级要素层	三级要素层	四级要素层
2. 生态系统间平衡水平	2.1 地理环境-栖息地破坏水平	2.1.2 系统弹性、繁衍和恢复力		1.2.2.1 病害类型、发病率				
				1.2.2.2 幼体补充量				
				1.2.2.3 死亡率				
		2.1.1 人为开发		2.1.1.1 森林覆盖率				
				2.1.1.2 自然保护区面积占比				
		2.1.2 自然灾害(飓风、降水、干旱、高温、严寒)		2.1.2.1 自然灾害强度	海浪年均波高 相对年平均潮位			
				2.1.2.2 自然灾害频率	灾害性巨浪天数(有效波高大于4m 的海浪)			
					沿岸最大增水大于40cm 的风暴潮次数			
		2.2 水环境变化	2.2.1 生产力相关水文条件	2.2.1.1 海水 pH				
				2.2.1.2 海表温度-温室效应				
				2.2.1.3 海水透明度				
				2.2.1.4 悬浮物				
	2.3 人类社会环境发展水平	2.3.1 人类生活环境	2.2.2 水质条件	2.2.2.1 重金属		站点盐度 站点溶解氧(DO) 站点氨氮 站点叶绿素		
				2.2.2.2 富营养				
				2.2.2.3 站点海水油类含量		站点海水油类含量		
					渔业废水	渔业养殖污染-海水养殖产量		
					农业化肥污水量	农田水利有效灌溉面积 周边农业化肥用量		
				2.3.1.1 污水排放量	全省废水排放量	农业化肥污水量		
					工业污染-南海区油气平台废水	工业污染-南海区油气平台废水		
					固体废物倾倒入海	海洋倾倒入海 工业固体废物		
				2.3.1.2 污水水质	河流入海口水质	南渡江-河流入海污染物 COD		

续表

目标层	次目标层	准则层	次准则层	因素层	一级要素层	二级要素层	三级要素层	四级要素层
	2.3.2 人口素质			2.3.2.1 全省常住人口密度	省内陆源入海排污口水质	南渡江-磷酸盐入海		
				2.3.2.2 教育水平-文盲率		南渡江-氨氮入海		
				2.3.2.3 农村居民人均可支配收入		南渡江石油流入海		
						南渡江重金属流入海		
	2.3.3 环保水平			2.3.3.1 城镇污水处理率		溶解氧		
				2.3.3.2 农村生活污水处理率		化学需氧量(COD)		
				2.3.3.3 工业固体综合利用率		氨氮		
				2.3.3.4 生活垃圾无害化处理率		活性磷酸盐		
	2.3.4 经济发展			2.3.4.1 渔业捕捞发展		重金属		
				海水捕捞产品占海水产品比重				
				海水捕捞产值占海水产品产值比重				
				海水养殖产品占海水产品比重				
				海水养殖产值占海水产品产值比重				
				2.3.4.3 货物吞吐量				
				2.3.4.4 旅游业发展		旅游过夜人数		
						旅游总收入		
						机制纸及纸板(外购原纸加工除外)		
				2.3.4.5 工业制造业发展		原油加工量		
						商品混凝土		
						粗钢		

在模型的指标组成方面,对具体区域进行健康评价时,结合研究对象的地域和生态特征,运用综合分析法和层次分析法调整生物、环境、社会经济等方面的关键指标及权重,可建立起该区域的珊瑚礁健康评价模型。首先,选择相应的环境指标。在珊瑚礁生态系统健康评价框架基础上,结合地域特征、生态水平、调查情况,对指标体系进行保留和优化或者查漏补缺,可以获得特定区域的珊瑚礁生态系统健康评价模型。鉴于西沙珊瑚礁距三亚市榆林港和文昌市清澜港 330km,可将水质条件、污水排放、环保水平、经济发展等生态系统间平衡因素暂不纳入至西沙珊瑚礁的健康评价模型中。南渡江是海南省主要河流入海口邻近海域海洋环境质量指标的最主要监测位点,也是海南省五大河流中污染程度较高的流域,故可将其纳入至南海近岸珊瑚礁健康评价模型中,但不适合列入西沙珊瑚礁健康评价模型。其次,考虑纳入生物多样性评价指标。建立生物因素与珊瑚礁健康程度的关联关系,找到珊瑚群落中的模式,并确定每个物种对场地相似性的贡献。综合考虑生物数据与珊瑚数据的关系,以确定每个因素的权重。食物链从顶端到底端呈现为物种丰富、数量均衡的状态,群落演替才能自然持续地运作下去。由于鱼类、底栖生物、浮游生物是食物链的重要种群,因此增加鱼类种类、底栖种类、鱼类密度、底栖动物密度、浮游植物细胞丰度、浮游动物丰度、鱼类平均体长、底栖动物生物量、浮游动物生物量等指标可以提升评价的全面性。

在模型的比较维度方面,根据西沙珊瑚礁生态系统的环境和社会发展水平,选择 2011—2018 年和 2014—2018 年两个时间段,比较珊瑚礁生态系统健康水平受社会经济发展累积效应的影响。在指标体系构建方面,设置含社会环境指标、生物多样性指标和不包含相应指标的两套评价指标体系,比较评价结果受评价体系组成的影响。在人类干扰方面,选择了受人类干扰较强和较弱的岛礁进行比较。综上,根据研究区域的环境和社会发展水平,对西沙珊瑚礁生态系统总共设计了 4 个健康评价模型,分别是:①2011—2018 年含环境指标和生物多样性指标的西沙珊瑚礁生态系统健康评价模型;②2011—2018 年不含环境指标、含生物多样性指标的西沙珊瑚礁生态系统健康评价模型;③2014—2018 年含环境指标和生物多样性指标的西沙珊瑚礁生态系统健康评价模型;④2014—2018 年不含环境指标、含生物多样性指标的西沙珊瑚礁生态系统健康评价模型。

本次研究设计的 4 个评价模型旨在通过时间、空间、食物链等多维度比较来探索珊瑚礁、人类及环境之间的相关性,以及由相互依赖性产生的数学及物理指标数据间的联系,进一步阐释其内在原因和机理,作出对珊瑚礁生态系统重要特性的粗粒度量化描述,形成一个基于数学或可计算的基本原理而构建的理论框架,使今后能够在系统结构和功能层面构建理想化的可统计比较的标准量化系统,并基于此为对照或基数进行在外界环境条件或进化选择影响下的珊瑚礁生态系统发展趋势预测,以应对珊瑚礁生态系统的可持续发展和长期生存。

1.6 评价方法

本研究采用组织力及系统功能评价法对西沙珊瑚礁生态系统进行健康评价。首先,对 2011—2018 年西沙群岛(包括永兴岛、赵述岛、金银岛、东岛、北岛、羚羊礁、西沙洲、晋卿岛、甘泉岛)的珊瑚礁进行区域内健康状况整体评价;然后,对 2011—2018 年北岛、西沙洲、永兴岛、赵述岛 4 个岛礁的珊瑚礁分别进行健康评价;最后,开展实地调查和居民问卷调查,对评价方法进行科学性和可行性验证。

在健康评价指数计算上,采用层次分析法以确定指标权重。依据 Saaty 提出的 1~9 标度法(吴易雯等, 2017)判断指标的相对重要性,自上而下对评价体系指标及权重进行分析,可得到相应的区域评价模型(赵焕臣等, 1986; 彭涛等, 2016)。指标权重的确定方法如下:

1) 构建判断矩阵 A : 采用专家打分法,建立环境因素与珊瑚礁健康程度的关联矩阵;对于从属于(或影响)上一层每个因素的同一层诸因素,用成对比较法和 1~9 比较尺度构造成对比较阵,确定每个物种对场地相似性的贡献。用 a_{ij} 表示第 i 个因素相对于第 j 个因素的比较结果。

2) 计算权向量并作一致性检验: 计算判断矩阵 B 的最大特征根及对应的特征向量。计算公式为:

$$BW = \lambda_{\max} W \quad (1)$$

式中: $\lambda_{\max}$ 为 B 的最大特征根; W 为对应于 B 的正规化特征向量; W 的分量 W_i 即是相应因素单排序的权值。

对于每一个成对比较阵计算得到的最大特征根及对应特征向量,利用一致性指标 CI 、随机一致性指标 RI 和一致性比率 CR 作一致性检验。当 $CR \leq 0.1$ 时,检验通过,特征向量(归一化后)即为权向量;若不通过,则需重新构造成对比较阵。一致性检验

公式为：

$$CI = \frac{\lambda_{\max}(A) - n}{n - 1} \quad (2)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (3)$$

式中：CI 为层次总排序一致性指标；RI 为层次总排序平均随机一致性指标；CR 为层次总排序随机一致性比率； n 为因素个数。

3) 层次总排序及指标权重计算：利用同一层次中所有层次单排序的结果，可以计算针对上一层次而言的本层次所有因素重要性的权值。若中间层包含 m 个主因素 $A_1, A_2, \dots, A_m$ ，其层次总排序权值分别为 $a_1, a_2, \dots, a_m$ ；而最底层包含 n 个子因素 $B_1, B_2, \dots, B_n$ ，它们对于因素 A_j 的层次单排序权值分别为 $b_{1j}, b_{2j}, \dots, b_{mj}$ 。当 B_i 与 A_j 无联系时， $b_{ij}=0$ ，最底层的子因素 B_i 的总权重公式则为：

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{(BW)_i}{nW_i} \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n a_i b_{ij} = 1 \quad (5)$$

本研究采用综合指数法进行珊瑚礁生态系统健康指数计算，珊瑚礁生态系统健康评价综合指数 (Coral Reef Ecosystem Health Assessment Comprehensive Index, CHI) 的数值范围是 0~100，计算公式如下：

$$CHI = \sum_{i=1}^3 W_i \sum_{j=1}^n Y_{ij} W_{ij} \quad (6)$$

式中：CHI 为珊瑚礁健康评价综合指数； W_i 表示第 i 个一级指标的权重； Y_{ij} 表示第 i 个一级指标中的第 j 个二级指标的赋值得分； W_{ij} 表示第 i 个一级指标中的第 j 个二级指标的权重。

评价指标 P 的指数计算方法为：

$$P_q = \frac{\sum_{r=1}^n E_r}{n} \quad (7)$$

式中： E_r 是第 q 项评价指标的第 r 个样品 (或样方) 的赋值； n 是评价指标监测样品总数 (或监测样方总数)。

2 评价结果

以 2011—2018 年度西沙群岛生态系统常规调查结果为基础，采用包含环境因素和不包含环境因素的两个珊瑚礁健康评价体系，对珊瑚礁生态系统进行了健康评价。结果显示，西沙群岛健康指数年均降低约 2.3%~2.4% (图 1—4)，期间未见明显回升，

一直保持在亚健康的水平。

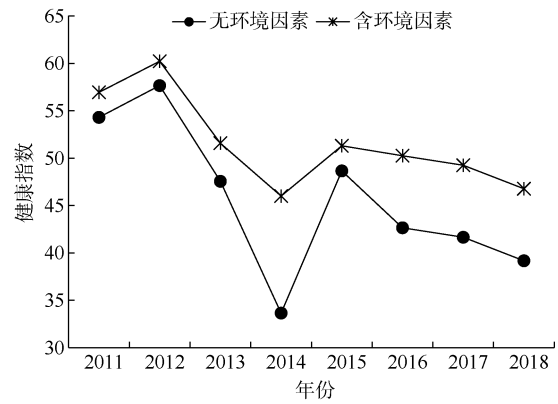


图 1 2011—2018 年西沙珊瑚礁生态系统整体健康状况评价结果

Fig. 1 Health evaluation results of entire Xisha coral reef ecosystem (2011-2018)

将 2011—2018 年西沙群岛珊瑚礁健康评价指数和环境指标进行相关性分析，结果显示，与岛礁珊瑚礁健康状况显著相关 ($p < 0.01$) 的环境因素包括：森林覆盖率、海洋倾倒量、工业固体废物、全省常住人口密度、海水养殖产值占海水产品产值比重、货物吞吐量、旅游总收入、原油加工量、商品混凝土产量、粗钢产量。从影响显著的环境因子类型可知，增设自然保护区、控制上岛人口、增强工业生活废水垃圾处理率、减少海洋倾倒量等措施均有利于珊瑚礁生态系统的自然恢复。

根据海南省政府及当地科研机构 2014—2018 年发布的《西沙珊瑚礁生态监控区报告》和 2005—2018 年发布的《海南省海洋环境状况公报》，2005 年和 2009 年西沙珊瑚礁的健康水平出现了较大幅度的降低，这两年为变化峰值年份。吴莹莹 (2020) 采用模拟算法测试了评价模型的科学性和预测水平，含环境和不含环境因素的西沙珊瑚礁健康指数在 2003—2017 年期间波峰为 2005 年和 2012 年，波谷为 2009 年，波峰与波谷指数差距在 10~15 左右，与历史记录吻合。根据 2019 年对西沙群岛渔民捕捞量及捕捞船只的调查结果，2019 年 11 月七连屿渔民捕鱼 1311.5kg，其中赤口螺、太阳螺、毛蟹、红蟹、排虾等 1124.2kg，鱼类仅有 187.3kg。据不完全统计，2019 年 4—11 月渔民捕捞的鱼类为 19 种，底栖动物 8 种，共计 2442.1kg，10 年内渔业产量下降了 50%~80%。结合永兴岛居民入户调查问卷结果得知，2006—2008 年较快的渔业发展、2012 年严重的海星泛滥、2014—2015 年启动的岛礁建设等历史事件可

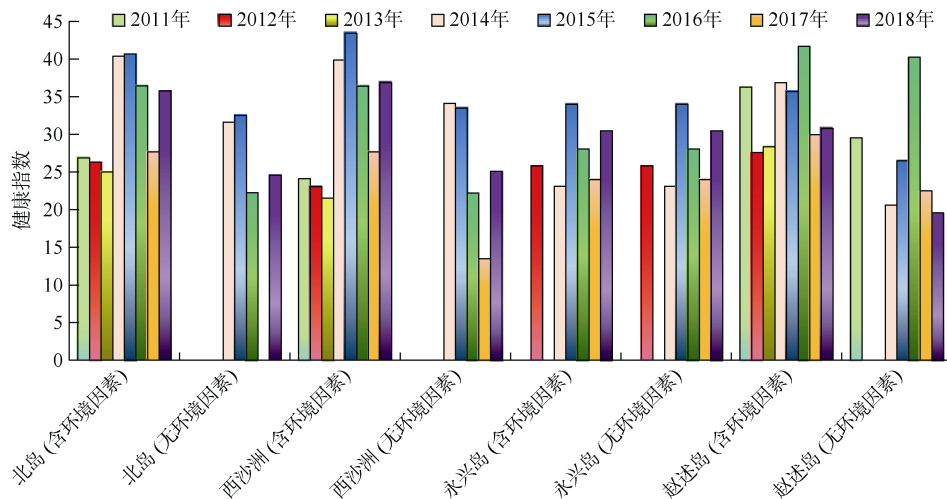


图 2 2011—2018 年西沙各岛礁珊瑚礁生态系统健康评价结果

Fig. 2 Coral reef ecosystem health assessment results at various islands in Xisha (2011-2018)

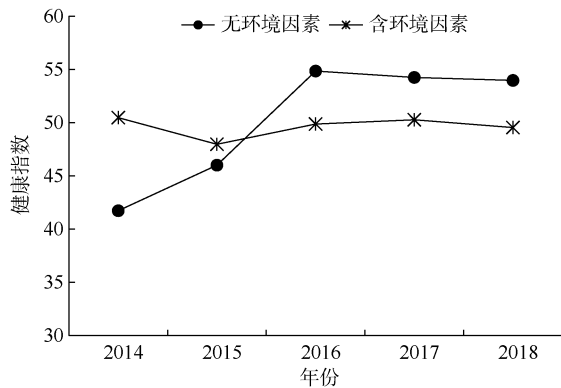


图 3 2014—2018 年西沙珊瑚礁生态系统整体健康状况评价结果

Fig. 3 Health evaluation results of entire Xisha coral reef ecosystem (2014-2018)

能是近 10 年来西沙珊瑚礁生态系统发生退化的主要因素,对西沙珊瑚礁生态系统造成了较大影响。这与本文的珊瑚礁健康评价指数反映的历年健康状况变化也较为吻合,可以侧面验证本评价模型的设计与珊瑚礁生态系统运行模式是比较符合的,模型评价结果能够反映珊瑚礁生态系统的整体健康水平。

3 分析与讨论

3.1 珊瑚礁生态系统健康评价模型的科学性

本文提出的珊瑚礁生态系统健康评价方法——组织力及系统功能评价法,在空间层次上将研究范围拓展到了更高层级的人与珊瑚礁组成的整体生态系统。有研究认为,生态系统内的生物个体及单个系统不能独立生存,依靠广泛的、大量的联系生存,

系统的上、下游是系统物质能量流动的来源和去处,系统与周围其他系统进行物质能量交换(王赛, 2016; 马孟磊 等, 2020),在更高层级上可以理解为所有这些系统再次组合,并构成一个更大的开放性整体。本研究提出的珊瑚礁生态系统健康评价方法将珊瑚礁生态系统与人类社会系统间存在的交叉影响进行量化比较,从而体现出岛礁生态系统的独特个性,即人类社会经济、科技、政治等子系统与珊瑚礁生态系统内的子系统共同形成的具有地域人文特色的珊瑚礁生态系统。本研究关于生态系统健康评价的理论,与生态系统服务评估框架理论的最新进展较为接近,近年来生态系统服务研究模型由半定性评价逐渐过渡为全定量地对生态系统的组成结构、功能、服务进行多层级的综合评估(Armoškaitė et al, 2020)。

组织力及系统功能评价法在时间跨度和指标体系选择方面充分考虑了环境对系统的影响作用。造成珊瑚礁生态系统扰动的外界环境作用包括自然选择和人为干扰两方面,来自自然选择的干扰有自然灾害和正常种间竞争(张乔民 等, 2007);来自人为干扰的有造礁、旅游业发展、采矿、捕捞等人类直接接触伤害,以及生活污水、温室效应、富营养化水体、养殖等人类间接伤害(Eastwood et al, 2017; Tebbett et al, 2018; Ding et al, 2019)。本研究选择了西沙开发建设及海南岛社会经济跨越式发展的主要时间段作为调查时段,同时将自然选择和人为干扰因素纳入评价指标体系,比较珊瑚礁生态系统在人为干扰程度逐年升高过程中的健康状况变化。在健康评价模型中,增加了衡量系统结构或衡量种群组

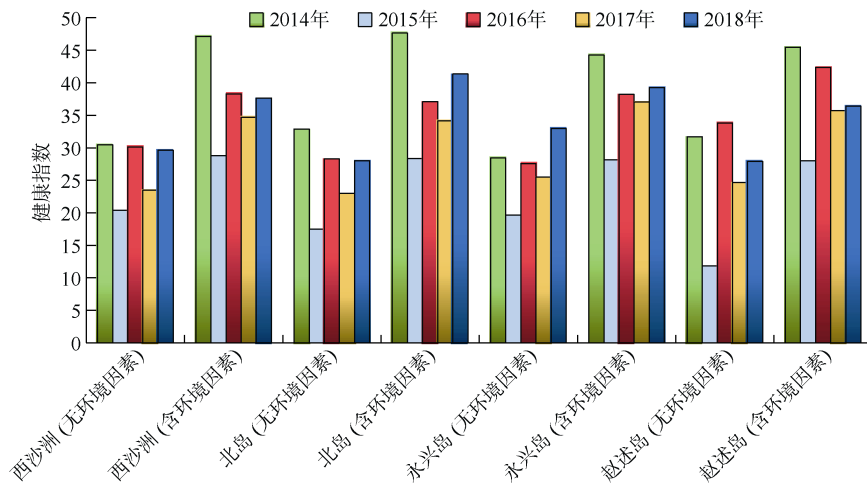


图4 2014—2018年西沙各岛礁珊瑚礁生态系统健康评价结果

Fig. 4 Coral reef ecosystem health assessment results at various islands in Xisha (2014-2018)

成动态平衡水平的指标,例如物种多样性、均匀度指标;增加了衡量食物链完整度的指标,例如底栖浮游鱼类存量、天敌密度等;增加了与健康指数显著相关的因素,如农田水利有效灌溉面积、化肥施用量、文盲率、农村全年人均可支配收入、城市生活垃圾无害化处理率、海水捕捞产量占海水产品比重、海水捕捞产值占海水产品产值比重、机制纸及纸板产量。西沙珊瑚礁生态系统的健康状况比较结果说明,健康指数下降与岛礁近年捕捞量、城市建设发展水平上升有显著相关关系,可见食物链完整度类指标、种群组成动态平衡类指标能够较好地反映系统健康水平的变动,是适合本区域的关键评价指标。

本研究对组织力及系统功能评价法在系统调控和反馈方面也进行了探索,进一步完善了评价指标体系构建的理论基础。生态系统在结构和功能上的调节机制,既是自上而下的调节控制,也是自下而上的级联反应关系(赵卫东等, 2001)。实际的生态系统间影响会受到周期、频率、速率、反应时间的限制,例如发生反应的延迟、抵消及放大效应,因此局部或者外观上的恶化或者短期内突发的白化不一定代表珊瑚礁生态系统整体的退化(Lancôt et al, 2020; Graham et al, 2020)。为避免评价结果受系统反应延迟、抵消或放大影响的局限性,本研究设计了包含生物环境因素、影响周期长短因素、局部整体因素、天敌因素等四维度交错的各类评价模型。比较含环境因素与不含环境因素评价体系的健康指数发现,含环境因素的评价体系对珊瑚礁健康水平变化的反应更为敏锐。例如,在2005年、2012年和

2015年珊瑚礁健康水平好转,以及2009年和2014年恶化这些转折事件发生前,含环境因素评价体系的珊瑚礁健康指数走向出现了比不含环境因素评价体系的健康指数更为显著的上升或下降。因此,含环境因素的评价体系更符合西沙地域的特点,采用该评价模式能够为珊瑚礁生态系统的健康发展趋势提供比较科学的预测。同时,组织力及系统功能评价法能够通过调节评价模型的方式,对不同区域珊瑚礁在组织结构或系统功能等层级进行同一时期内的横向比较,也可以对生态系统的内外相互作用过程进行不同时间上的纵向比较,综合横向和纵向评价结果可得到立体的珊瑚礁生态系统健康动态画像。根据同期对南海近岸珊瑚礁的评价研究结果得知,大区域、长时间尺度模型的预测结果更为稳健,因此本方法在跨区间的健康评价研究方面是一种能够综合评价系统组织力和系统功能的动态评价方法。

综上,组织力及系统功能评价法作为珊瑚礁生态系统健康评价方法,将珊瑚礁生态系统拓展为人类和珊瑚礁协调共生的生态系统,以珊瑚礁生态系统结构及功能、珊瑚礁生态系统与其他海洋生态系统间关系、珊瑚礁生态系统与人类社会生态系统间关系、珊瑚礁生态系统发展制约因素为主要框架,结合地域特点选择关键指标组成个性化珊瑚礁健康评价体系。与目前已有的评价体系相比,其评价框架能够较好地体现出珊瑚礁生态系统的组织结构、能量流及动态平衡等独特的整体特征;其关键指标能够比较全面地表征珊瑚礁生态系统的结构功能及与周边生态系统间的相互作用,较好地反映出当地

珊瑚礁生态系统的整体健康水平,具有统筹综合、结构灵活、计算便捷的特点。

3.2 珊瑚礁生态系统健康评价模型的潜在应用价值

珊瑚礁生态系统健康评价模型的设计意义不仅在于综合动态地掌握珊瑚礁生态系统的健康状况,更重要的是在于其潜在应用价值:1) 珊瑚礁生态系统的综合健康水平能够用于预测已衰退的珊瑚礁生态系统恢复到自然平衡状态的可能性;2) 珊瑚礁生态系统的健康评价过程与记录能为

珊瑚礁生态系统的恢复方案提供设计思路和指导方向;3) 对珊瑚礁生态系统的监测规划提出关于监测数据来源、传输、采样方式、数据处理方法等的具体需求,可加快监测网络的建设效率;4) 将珊瑚礁生态系统健康评价框架、指标体系、评价模型、评价过程及结果数据、监测综合网络与人类生态城市建设、海洋服务价值结合起来,可为珊瑚礁生态系统与人类社会共同可持续发展探索新方向。

参考文献 References

- 柴立和, 郎铁柱, 2004. 生态系统复杂性研究的几个基本理论及其局限性[J]. 自然杂志, 26(2): 98–102. CHAI LIHE, LANG TIEZHU, 2004. Several theories on the study of ecological system complexity and their shortcomings[J]. Chinese Journal of Nature, 26(2): 98–102 (in Chinese with English abstract).
- 崔保山, 杨志峰, 2003. 湿地生态系统健康的时空尺度特征[J]. 应用生态学报, 14(1): 121–125. CUI BAOSHAN, YANG ZHIFENG, 2003. Temporal-spatial scale characteristic of wetland ecosystem health[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 14(1): 121–125 (in Chinese with English abstract).
- 黄晖, 董志军, 练建生, 2008. 论西沙群岛珊瑚礁生态系统自然保护区的建立[J]. 热带地理, 28(6): 540–544. HUANG HUI, DONG ZHIJUN, LIAN JIANSHENG, 2008. Establishment of nature reserve of coral reef ecosystem on the Xisha islands[J]. Tropical Geography, 28(6): 540–544 (in Chinese with English abstract).
- 黄晖, 尤丰, 练健生, 等, 2011. 西沙群岛海域造礁石珊瑚物种多样性与分布特点[J]. 生物多样性, 19(6): 710–715. HUANG HUI, YOU FENG, LIAN JIANSHENG, et al, 2011. Species diversity and distribution of scleractinian coral at Xisha Islands, China[J]. Biodiversity Science, 19(6): 710–715 (in Chinese with English abstract).
- 黄林韬, 黄晖, 江雷, 2020. 中国造礁石珊瑚分类厘定[J]. 生物多样性, 28(4): 515–523. HUANG LINTAO, HUANG HUI, JIANG LEI, 2020. A revised taxonomy for Chinese hermatypic corals[J]. Biodiversity Science, 28(4): 515–523 (in Chinese with English abstract).
- 雷新明, 黄晖, 练健生, 等, 2019. 中国珊瑚藻的多样性及分布研究现状[J]. 热带海洋学报, 38(4): 30–40. LEI XINMING, HUANG HUI, LIAN JIANSHENG, et al, 2019. The diversity and distribution of coralline algae in China: state of knowledge and research[J]. Journal of Tropical Oceanography, 38(4): 30–40 (in Chinese with English abstract).
- 林丽芳, 余克服, 陶士臣, 等, 2018. 南海黄岩岛珊瑚记录的1780–2013年的表层海温年代际变化特征[J]. 海洋学报, 40(9): 31–42. LIN LIFANG, YU KEFU, TAO SHICHEN, et al, 2018. Interdecadal variability of sea surface temperature from 1780 to 2013 recorded in corals from the Huangyan Island in the South China Sea[J]. Acta Oceanologica Sinica, 40(9): 31–42 (in Chinese with English abstract).
- 马孟磊, 陈作志, 徐姗楠, 等, 2020. 南海北部陆坡海域生态系统营养结构和能量流动分析[J]. 水产学报, 44(10): 1685–1694. MA MENGLEI, CHEN ZUOZHI, XU SHANNAN, et al, 2020. Trophic structure and energy flow of continental slope of the northern South China Sea ecosystem[J]. Journal of Fisheries, 44(10): 1685–1694 (in Chinese with English abstract).
- 牛文涛, 刘玉新, 林荣澄, 2009. 珊瑚礁生态系统健康评价方法的研究进展[J]. 海洋学研究, 27(4): 77–85. NIU WENTAO, LIU YUXIN, LIN RONGCHENG, 2009. Research progress of the health assessment method of coral reef ecosystem[J]. Journal of Marine Sciences, 27(4): 77–85 (in Chinese with English abstract).
- 牛文涛, 张潇娴, 林荣澄, 等, 2010. 海南昌江沿岸海域石珊瑚的物种多样性及其分布[J]. 台湾海峡, 29(3): 389–393. NIU WENTAO, ZHANG XIAOXIAN, LIN RONGCHENG, et al, 2010. Diversity and distribution of coral species along the Changjiang Coastal waters, Hainan Province[J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 29(3): 389–393 (in Chinese with English abstract).
- 彭涛, 王珍, 赵乔, 等, 2016. 基于压力-状态-响应模型的黄柏河生态系统健康评价[J]. 水资源保护, 32(5): 141–145, 153. PENG TAO, WANG ZHEN, ZHAO QIAO, et al, 2016. Ecosystem health assessment for Huangbai river based on PSR model[J]. Water Resources Protection, 32(5): 141–145, 153 (in Chinese with English abstract).
- 施祺, 赵美霞, 张乔民, 等, 2007. 海南三亚鹿回头造礁石珊瑚生长变化与人类活动的影响[J]. 生态学报, 27(8): 3316–3323. SHI QI, ZHAO MEIXIA, ZHANG QIAOMIN, et al, 2007. Growth variations of scleractinian corals at Luhuitou, Sanya, Hainan Island, and the impacts from human activities[J]. Acta Ecologica Sinica, 27(8): 3316–3323 (in Chinese with English abstract).
- 孙有方, 雷新明, 练健生, 等, 2018. 三亚珊瑚礁保护区珊瑚礁生态系统现状及其健康状况评价[J]. 生物多样性, 26(3): 258–265. SUN YOUFANG, LEI XINMING, LIAN JIANSHENG, et al, 2018. Ecosystem status and health assessment of Sanya Coral Reef National Nature Reserve[J]. Biodiversity Science, 26(3): 258–265 (in Chinese with English abstract).
- 王赛, 2016. 东江鱼类食物网结构与生态系统能流模式研究[D]. 广州: 暨南大学: 77–149. WANG SAI, 2016. Structure of

- fish food webs and energy flow of ecosystems in the East River[D]. Guangzhou: Jinan University: 77–149 (in Chinese with English abstract).
- 吴易雯, 李莹杰, 张列宇, 等, 2017. 基于主客观赋权模糊综合评价法的湖泊水生生态系统健康评价[J]. 湖泊科学, 29(5): 1091–1102. WU YIWEN, LI YINGJIE, ZHANG LIEYU, et al, 2017. Assessment of lakes ecosystem health based on objective and subjective weighting combined with fuzzy comprehensive evaluation[J]. Journal of Lake Sciences, 29(5): 1091–1102 (in Chinese with English abstract).
- 吴莹莹, 2020. 南海典型珊瑚礁生态系统现状评价与可持续发展策略研究[D]. 广州: 中国科学院南海海洋研究所: 88–100. WU YINHYING, 2020. Study on current situation evaluation and sustainable development strategy of typical coral reef ecosystem in the South China Sea[D]. Guangzhou: South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences: 88–100 (in Chinese with English abstract).
- 蔡泽富, 陈石泉, 吴钟解, 等, 2017. 海南岛东北部沿岸造礁石珊瑚时空分布特征[J]. 海洋湖沼通报, 2015, 3: 78–87. CAI ZEFU, CHEN SHIQUAN, WU ZHONGJIE, et al, 2015. The Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Hermatypic Corals in the Coastal Waters of Northeastern Hainan Island[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 3: 78–87(in Chinese with English abstract).
- 肖佳媚, 2007. 基于PSR模型的南麂岛生态系统评价研究[D]. 厦门大学: 35–58. XIAO JIAMEI, 2007. Research on Nanji island ecosystem evaluation based on PSR model[D]. Xiamen: Xiamen University: 35–58 (in Chinese with English abstract).
- 赵焕臣, 许树柏, 和金生, 1986. 层次分析法[M]. 北京: 科学出版社: 1–105 (in Chinese).
- 赵帅, 柴立和, 李鹏飞, 等, 2013. 城市生态系统健康评价新模型及应用——以天津市为例[J]. 环境科学学报, 33(4): 1173–1179. ZHAO SHUAI, CHAI LIHE, LI PENGFEI, et al, 2013. Urban ecosystem health assessment model and its application: a case study of Tianjin[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 33(4): 1173–1179 (in Chinese with English abstract).
- 赵卫东, 宋金明, 李鹏程, 等, 2001. 珊瑚礁生态系的协同营养模式[J]. 中国科学基金, 15(1): 32–35. ZHAO WEIDONG, SONG JINMING, LI PENGCHENG, et al, 2001. Cooperation model of nutrition processes in coral reef ecosystem[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 15(1): 32–35 (in Chinese with English abstract).
- ARGÜELLES-JIMÉNEZ J, ALVA-BASURTO J C, PÉREZ-ESPAÑA H, et al, 2020. The measurement of ecosystem development in Caribbean coral reefs through topological indices[J]. Ecological Indicators, 110: 105866.
- ARMOŠKAITĖ A, PURINĀ I, AIGARS J, et al, 2020. Establishing the links between marine ecosystem components, functions and services: an ecosystem service assessment tool[J]. Ocean & Coastal Management, 193: 105229.
- DING YANG, WU ZHIQIANG, ZHANG RUIJIE, et al, 2019. Organochlorines in fish from the coastal coral reefs of Weizhou Island, south China sea: levels, sources, and bioaccumulation[J]. Chemosphere, 232: 1–8.
- EASTWOOD E K, CLARY D G, MELNICK D J, 2017. Coral reef health and management on the verge of a tourism boom: a case study from Miches, Dominican Republic[J]. Ocean & Coastal Management, 138: 192–204.
- GRAHAM N A J, ROBINSON J P W, SMITH S E, 2020. Changing role of coral reef marine reserves in a warming climate[J]. Nature Communications, 11(1): 2000.
- HUANG HUI, DONG ZHI JUN, HUANG LIANG MING, et al, 2006. Restriction fragment length polymorphism analysis of large subunit rDNA of symbiotic dinoflagellates from scleractinian corals in the Zhubi coral reef of the Nansha islands[J]. Journal of Integrative Plant Biology, 48(2): 148–152.
- IDRIS M H, Muta H Z, Arshad A, 2006. Status of coral reefs species at Patricia shoals, Bintulu, Sarawak, Malaysia[J]. Journal of Applied Sciences Research, 2: 816–820.
- JAMESON S C, ERDMANN M V, KARR J R, et al, 2001. Charting a course toward diagnostic monitoring: a continuing review of coral reef attributes and a research strategy for creating coral reef indexes of biotic integrity[J]. Bulletin of Marine Science, 69(2): 701–744.
- LANCTÔT C M, BEDNARZ V N, MELVIN S, et al, 2020. Physiological stress response of the scleractinian coral *Stylophora pistillata* exposed to polyethylene microplastics[J]. Environmental Pollution, 263: 114559.
- PENNISI E, 1997. Brighter prospects for the world's coral reefs?[J]. Science, 277(5325): 491–493.
- RISK M J, HEIKOOP J M, EDINGER E N, et al, 2001. The assessment 'toolbox': community-based reef evaluation methods coupled with geochemical techniques to identify sources of stress[J]. Bulletin of Marine Science, 69(2): 443–458.
- TEBBETT S B, BELLWOOD D R, PURCELL S W, 2018. Sediment addition drives declines in algal turf yield to herbivorous coral reef fishes: implications for reefs and reef fisheries[J]. Coral Reefs, 37(3): 929–937.