

近 40 年永兴岛造礁石珊瑚动态变化及其控制因素

吴绵璇^{1,2}, 罗孝文², 张永战^{1,3,4*}

1. 南京大学地理与海洋科学学院, 江苏 南京 210023;

2. 自然资源部第二海洋研究所海底科学与划界全国重点实验室, 浙江 杭州 310012;

3. 南京大学海岸与海岛开发教育部重点实验室, 南京 210023;

4. 中国南海研究协同创新中心, 南京 210023

摘 要: 全球珊瑚礁正持续退化, 通过有效降低区域性珊瑚礁退化造成的地区压力, 以减轻日益增加的全球压力的影响, 现已成为共识。南海西沙群岛珊瑚礁是“印度—太平洋珊瑚礁区”的重要组成部分, 在近年来的珊瑚礁生态监测调查中, 呈现出不同程度的退化现象。准确把握其动态变化与主控因素, 是对珊瑚礁区进行及时有效管理的重要基础。本文梳理了 1984—2021 年西沙永兴岛珊瑚礁调查获取的珊瑚覆盖率、补充量及白化率等生态指标数据, 统计分析表明: 近 40 年来, 西沙永兴岛造礁石珊瑚总体呈现“良好生长—急剧退化—缓慢恢复—再次退化”的 4 阶段动态变化, 1984—2006 年呈良好生长状态, 2006—2011 年出现急剧退化阶段, 2011—2019 年缓慢恢复, 2019—2021 年又重新退化。长棘海星和珊瑚热白化分别是永兴岛造礁石珊瑚发生急剧退化和再次退化的主要控制因素, 珊瑚疾病在急剧退化阶段产生了一定的影响, 人类活动一定程度上抑制了珊瑚急剧退化后的迅速恢复, 同期珊瑚热白化影响了其后续恢复。相比大堡礁造礁石珊瑚急剧退化后持续恢复的变化状况, 永兴岛造礁石珊瑚退化程度更为严重, 后续 10 年都呈现低速恢复状态。

关键词: 永兴岛; 造礁石珊瑚; 动态变化; 退化现象; 控制因素

Analysis on changing dynamics and controlling factors of scleractinian corals in Yongxing Island in recent 40 years

WU Mianxuan^{1,2}, LUO Xiaowen², ZHANG Yongzhan^{1,3,4*}

1. School of Geography and Ocean Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China;

2. State Key Laboratory of Submarine Geoscience, Second Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Hangzhou 310012, China;

3. The Key Laboratory of Coast & Island Development, Ministry of Education, Nanjing 210023, China;

4. The Collaborative Innovation Center of South China Sea Studies, Nanjing 210023, China

Abstract: Global coral reefs are undergoing continuous degradation, and it is universally acknowledged that alleviating local pressures stemming from regional coral reef degradation is crucial to counteract the substantial impacts of escalating global pressures. The coral reefs of the Xisha Islands in the South China Sea, a vital component of the “Coral Triangle,” have exhibited varying degrees of degradation in recent years, as revealed by ecological monitoring. Analyzing the factors contributing to coral reef degradation through pertinent ecological indicators is instrumental in comprehending coral reef trends, as well as facilitating their restoration and management. This paper, drawing upon existing surveys of Yongxing Island in the Xisha Islands, examines relevant ecological indicators such as coral cover, replenishment, and bleaching rates. The results indicate that over the past 40 years, the scleractinian corals of Yongxing Island have undergone a phased pattern of degradation: a period of healthy growth from 1984 to 2006, followed by rapid degradation from 2006 to 2011, slow recovery from 2011 to 2019, and renewed degradation from 2019 to 2021. This trend follows a general pattern of “healthy growth - sharp degradation - slow recovery - renewed degradation.” The crown-of-thorns starfish emerges as the primary driver of rapid degradation, with coral diseases exerting a certain influence during this stage. Human activities hinder the swift recovery of corals following rapid degradation to a certain extent, while coral bleaching is the primary factor governing both slow recovery and the later stages of renewed degradation. In comparison to the swift recovery of scleractinian corals in the Great Barrier Reef following its rapid degradation, the scleractinian corals of Yongxing Island have experienced more severe degradation and demonstrated a lower recovery rate over the past decade.

Key words: Yongxing Island; scleractinian coral; changing dynamic; degradation; controlling factor

珊瑚礁被称为海洋中的“热带雨林”, 是海洋生态系统的重要组成部分, 其以占全球海域不足 0.2% 的面积, 养育了

超过 1/4 的海洋生物(黄晖, 2021), 全球珊瑚礁监测网络(global coral reef monitoring network, GCRMN)统计评估世

基金项目: 中国科学院学部咨询评议项目(2016ZWH005A-005、2018-G01-B-005); 中国南海研究协同创新中心项目; 江苏省自然资源发展专项资金(海洋科技创新)项目(JSZRHYKJ202104)

作者简介: 吴绵璇(1999—), 女, 广东省汕头市人, 主要从事珊瑚礁生态研究。email: 502022270103@smail.nju.edu.cn

通信作者: 张永战, 男, 副教授, 主要从事水陆相互作用区滨岸地貌与海岸工程研究。email: zhangyzzh@nju.edu.cn

Foundation item: Consultation and Evaluation Projects of the Chinese Academy of Sciences (2016ZWH005A-005, 2018-G01-B-005); Project of the Collaborative Innovation Center of South China Sea Studies; the Special Fund for Natural Resources Development of Jiangsu Province (Marine Science and Technology Innovation) Project (JSZRHYKJ202104)

Corresponding author: ZHANG Yongzhan. email: zhangyzzh@nju.edu.cn

界珊瑚礁每年可创造经济价值 27000 亿美元(David et al, 2021)。然而, 近几十年来全球珊瑚礁正持续减少中, 2004 年 GCRMN 报告指出全球约 20% 的珊瑚已经灭绝, 约 1/3 的造礁石珊瑚种类濒临灭绝(Wilkinson, 2004); 据 2020 年 GCRMN 报告统计, 在本世纪海水温度升高 1.5℃ 的气候情景下, 全球将损失 70%~90% 的珊瑚礁(David et al, 2021)。目前, 世界上没有完好保存的珊瑚礁, 1998 年全球珊瑚礁白化事件摧毁了约 8% 的珊瑚礁。虽然在其后续十年, 一些严重受损的珊瑚礁有所恢复, 但自 2010 年以来, 各珊瑚礁区的珊瑚覆盖率持续下降, 全球珊瑚礁退化趋势仍不受遏制。

南海是我国珊瑚礁的主要分布区域, 位于世界生物多样性最高的“珊瑚礁大三角”(coral triangle)的北缘(Huang et al, 2015), 其中南海诸岛的珊瑚礁面积约为 37935.33km²(王丽荣 等, 2014)。目前其已知的造礁石珊瑚种类有 445 种, 丰富程度与整个“珊瑚礁大三角”相当(黄晖, 2021), 是世界珊瑚礁的重要组成部分。在过去三十多年间, 南海诸岛珊瑚礁由于全球气候变暖(陆永强 等, 2022)、砗磲开挖(李元超 等, 2015; 吴程宏 等, 2023)、开发建设(赵焕庭 等, 2017)等问题严重退化, 甚至出现了区域性灭绝风险。全球珊瑚礁持续退化下, 珊瑚礁生态监测调查的相关研究尤为重要。

此前, 有关全球珊瑚礁急剧退化的研究已较为丰富, 特别是在 1998 年全球珊瑚礁白化事件后, 全球气候变化对珊瑚礁生态系统健康的影响备受关注。Bellwood 等(2004)研究表明, 由于珊瑚白化、长棘海星和过度捕捞等影响, 珊瑚礁生态系统脆弱性逐渐增加。人类世以来, 世界珊瑚礁在 ENSO 年份更加频繁地发生珊瑚白化, 未来每年发生珊瑚白化的可能性持续增加(Hughes et al, 2018)。然而, 世界珊瑚礁不只受到全球气候变暖的影响, 长棘海星暴发已成为珊瑚礁生态系统的重要威胁之一, 大堡礁是这一问题的典型代表。Reichelt 等(1990)识别 1966—1989 年大堡礁出现

西沙群岛位于南海西北部, 海南岛东南 310km 处, 主体部分处于 15° 40'—17° 10'N, 110° —113° E, 主要由宣德群岛和永乐群岛两个大环礁组成。其中, 永兴岛(16.50°N, 112.21°E)是全新世晚期形成的新灰沙岛(余克服 等, 1995), 位于西沙群岛东北部宣德群岛东南部的礁盘上(图 1), 呈

了两次长棘海星暴发浪潮; 确定了 1995—1999 年大堡礁北部蜥蜴岛长棘海星密度峰值与珊瑚覆盖率大幅度下降的时期吻合(Pratchett, 2010)。De'ath 等(2012)监测表明, 长棘海星导致大堡礁在 1985—2012 年损失了初始珊瑚覆盖率的 42%, 珊瑚恢复速率从每年 2.85% 下降到 0.89%。迄今为止, 大堡礁已记录到 4 次大规模长棘海星暴发(Pratchett et al, 2017), 大堡礁长棘海星的有效管控也始终是关注热点(Kroon et al, 2021; Matthews et al, 2024)。在夏季极端高温等极端条件频发下, 珊瑚疾病也频繁暴发, 1998—2007 年大堡礁、2014—2016 年波斯湾南部等多地珊瑚礁均暴发白色综合征疾病(Heron et al, 2010; Howells et al, 2020)。

在全球气候变化压力不可逆转下, 通过有效遏制地区珊瑚礁退化的压力以减缓全球压力(De'ath et al, 2012; Rogers et al, 2022), 现已成为共识。南海西沙群岛珊瑚礁生态系统拥有我国现存最古老、原始、典型的珊瑚礁群落, 近年来研究显示, 西沙生态监控区的造礁石珊瑚出现区域性灭绝问题(吴钟解 等, 2011; 李元超 等, 2019a), 永兴岛作为南海西沙群岛面积最大的一个珊瑚岛礁, 在自然条件和地理位置上都具有重要的意义。2012 年三沙市成立以来, 人类活动开发程度不断加大, 在 2012 年西沙监控海域中, 永兴岛的造礁石珊瑚覆盖率最低, 退化程度十分严重。此前, 有关南海离岸珊瑚礁长时序生态监测调查的系统研究较为有限, 永兴岛作为其中生态指标数据相对完整的岛礁, 为把握其动态变化提供了可能。本文梳理了 1984—2021 年西沙永兴岛珊瑚礁调查获取的相关生态指标数据, 结合历史文献, 较为全面地分析了近 40 年西沙永兴岛造礁石珊瑚的退化状况及演变规律, 探究了珊瑚礁持续退化的主要控制因素, 以推进南海珊瑚礁的可持续发展。

1 研究区与数据来源

1.1 研究区概况

椭圆形, 于 1991 年与石岛筑堤连通为一体, 陆地面积 1.8km², 是西沙群岛陆地面积最大的岛屿, 也是海南省三沙市人民政府和西沙区人民政府驻地, 在全国县级政权中管辖的国土疆范围最大, 管辖面积约为 2000000km², 是目前三沙市范围人类活动最为活跃的岛屿。

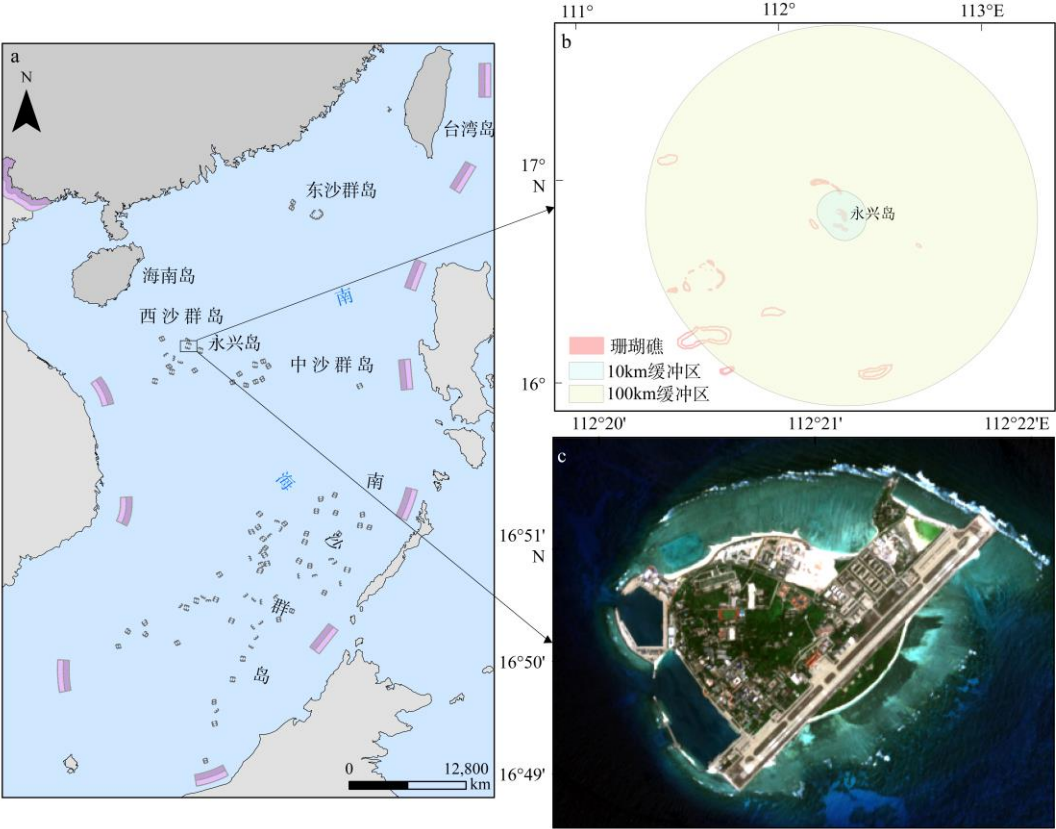


图 1 永兴岛区域示意图

a. 永兴岛的位置示意图; b. 永兴岛的 10km 和 100km 缓冲区范围图; c. 永兴岛的区域示意图

图 a 基于 2018 年自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2022)4318 号的标准地图制作, 底图无修改; 图 b—c 基于联合国环境规划署世界保护监测中心(UNEP-WCMC)全球珊瑚礁数据库(Version 4.1, 2021)和 2024 年哨兵 2 号(Sentinel-2)影像制作

Fig.1 The location and area of Yongxing Island in the South China Sea

a. The location of Yongxing Island; b. The 10km and 100km buffer of Yongxing Island; c. The area of Yongxing Island

据报道, 我国西沙群岛造礁石珊瑚种类丰富, 共有 38 属 127 种及亚种(邹仁林, 2001)。2006 年西沙群岛记录的造礁石珊瑚种类为 13 科 50 属 204 种(黄晖 等, 2011), 约占我国造礁石珊瑚种类的 3/4。然而, 近年来西沙海域的各珊瑚礁明显退化, 2006 年永兴岛的造礁石珊瑚种类有 65 种(黄晖 等, 2006), 2007—2016 年永兴岛造礁石珊瑚种类从 39 种下降到 18 种(李元超 等, 2018)。相关监测调查显示, 1984 年西沙永兴岛的珊瑚覆盖率达 70%(李元超 等, 2008),

2011 年永兴岛珊瑚覆盖率珊瑚幼虫补充量达到历史上最低值, 分别为 2.15%和 0.07 ind·m⁻²(李元超 等, 2019a)。

1.2 数据来源

本文所用珊瑚礁各生态指标及数据资料主要来自历史文献统计数据、各监测单位已发表科学报告和文献中的珊瑚礁生态监测数据, 具体包括珊瑚覆盖率、补充量及白化珊瑚覆盖率等, 数据来源详见表 1, 具体数据见表 2。

表 1 数据来源表

Tab.1 data source

数据指标	年份/年	资料来源
珊瑚覆盖率	1984	李元超 等(2008)
珊瑚覆盖率	2002	黄晖 等(2006)
珊瑚覆盖率、补充量、长棘海星密度	2005—2009	据资料图件估算(吴钟解 等, 2011)
珊瑚覆盖率、补充量、长棘海星密度	2010—2019	据资料图件估算(李元超 等, 2019a, 2019b)
珊瑚覆盖率、补充量、白化率、长棘海星密度	2020—2021	朗尚昆(2022)
珊瑚覆盖率、补充量	2007—2016	李元超 等(2018)

表 2 永兴岛及东南侧造礁石珊瑚覆盖率和补充量年变化

Tab.2 Annual changes of scleractinian coral cover and recruitment in Yongxing Island and southeast

年份	东南侧覆盖率		永兴岛覆盖率	
	/%	东南侧补充量/ind·m ⁻²	/%	永兴岛补充量/ind·m ⁻²
1984	——	——	70.00	——
2002	55.7	——	68.40	——
2005	——	——	64.39	1.21
2006	——	——	66.25	0.66
2007	46.67	0.37	53.80	0.20
2008	51.40	0.12	16.84	0.07
2009	24.50	0.11	7.93	0.06
2010	25.50	0.25	11.55	0.07
2011	1.97	0.00	2.15	0.07
2012	1.79	0.00	2.15	0.16
2013	6.67	0.20	5.25	0.41
2014	6.40	0.60	4.38	0.25
2015	3.00	0.10	2.65	0.12
2016	5.00	0.10	5.25	0.20
2017	——	——	7.45	0.55
2018	——	——	8.32	0.91
2019	——	——	14.99	3.46
2020	——	——	13.60	——
2021	——	——	7.22	3.22

叶绿素 a 含量数据选取自中国黄河数据中心 (<http://huanghe.ncdc.ac.cn>)的 OCNET(object context network) 全球每日叶绿素-a 产品数据集(2001—2021 年)(龙笛, 2024), 该数据集涵盖 2001 年 1 月 1 日至 2021 年 12 月 31 日的全球每日叶绿素 a 含量数据, 时间跨度是 2001 年至 2021 年, 时间分辨率为日, 空间分辨率为 0.25°。本文提取了 2002—2021 年永兴岛珊瑚礁区范围内(16° 35'—16° 59'N, 112° 05'—112° 35'E)的每日叶绿素 a 含量数据。

海洋热浪观测数据(marine heatwave watch)选取自美国国家海洋和大气管理局珊瑚礁监测计划中心 (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)提供的海洋热浪数据集(https://www.star.nesdis.noaa.gov/pub/socd/mecb/crw/data/marine_heatwave/v1.0.1/category/nc/), 该数据集是 Hobday 等(2016, 2018)利用海洋热浪算法计算的每日 5km 分辨率海洋热浪观测产品, 其将海洋热浪强度划分为 5 类(中、强、严重、极端和极端以上), 时间跨度是 1985 年至今。本文统计了 2002—2021 年夏季(6—8 月)永兴岛珊瑚礁区范围内各海洋热浪强度的天数。

2 永兴岛造礁石珊瑚的退化

2.1 不同时间阶段造礁石珊瑚的退化现象

造礁石珊瑚作为珊瑚礁生态系统最重要的框架生物(黄晖, 2021), 其珊瑚覆盖率和珊瑚补充量是珊瑚礁生态监

测调查中的重点监测指标, 这些指标在代表珊瑚礁的健康状况上具有关键性指示意义。在过去近 40 年中, 西沙永兴岛及东南侧的造礁石珊瑚覆盖率和补充量的时间变化如表 2 和图 2 所示, 可以看出, 在 2006 年之前, 永兴岛造礁石珊瑚的覆盖率均保持在 66.25% 以上, 1984 年甚至达到了 70%, 表明 1984—2006 年间永兴岛造礁石珊瑚处于良好生长状态。在 2011 年永兴岛造礁石珊瑚覆盖率、补充量和东南侧造礁石珊瑚补充量却达到了历史时期上的最低值, 分别为 2.15%、0.07ind·m⁻² 和 0ind·m⁻²。2006—2011 年永兴岛及东南侧造礁石珊瑚覆盖率和补充量分别下降了 64.1%、44.7% 和 0.59 ind·m⁻²、0.37 ind·m⁻², 永兴岛造礁石珊瑚覆盖率下降速率达到了每年 10.68%, 这说明 2006—2011 年该时段内永兴岛造礁石珊瑚处于急剧退化状态, 甚至出现了区域性灭绝的风险。在 2011—2016 年期间, 永兴岛及东南侧造礁石珊瑚覆盖率和补充量都波动性缓慢上升, 2016—2019 年期间永兴岛造礁石珊瑚覆盖率和补充量呈现一个稳定性缓慢上升的变化。总体而言, 2011—2019 年该时段内永兴岛造礁石珊瑚出现了一个缓慢恢复的变化状态。然而, 自 2019 年起, 永兴岛造礁石珊瑚覆盖率再次下降, 即在 2019—2021 年该时段永兴岛造礁石珊瑚出现了一个再次退化的状况。

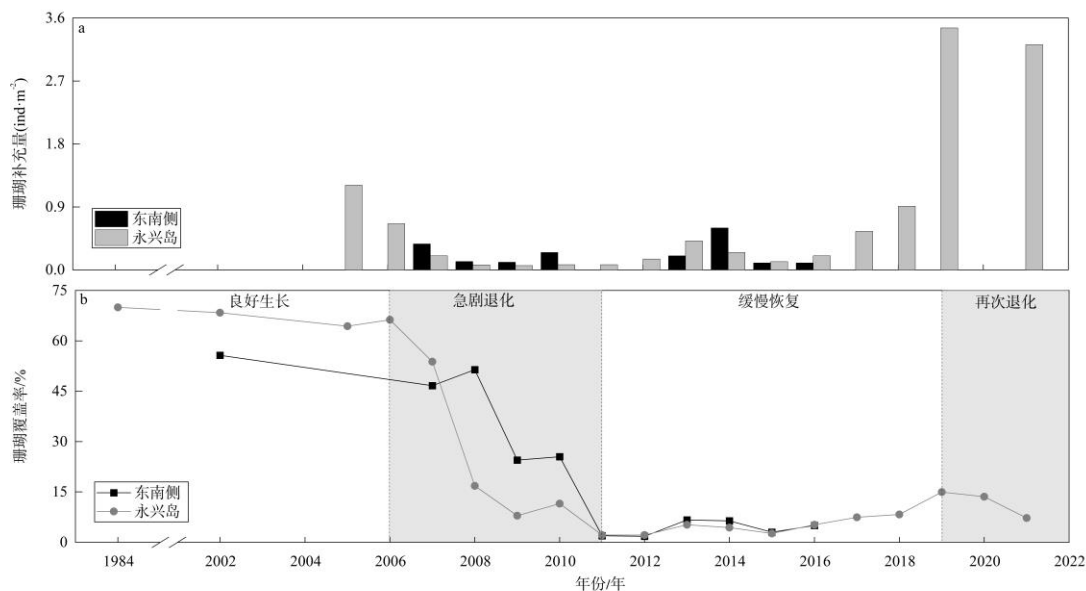


图 2 1984—2021 年永兴岛及东南侧造礁石珊瑚覆盖率和补充量年际变化

a. 永兴岛及东南侧造礁石珊瑚补充量年变化; b. 永兴岛及东南侧造礁石珊瑚覆盖率年变化

Fig.2 Temporal trends in scleractinian coral cover and recruitment for Yongxing Island and southeast over the period 1984—2021

a. Changes in scleractinian coral recruitment on Yongxing Island and southeast; b. Changes in scleractinian coral cover on Yongxing Island and southeast

在 1984—2021 年过去近 40 年间, 西沙永兴岛珊瑚礁严重退化, 整个珊瑚礁区内的造礁石珊瑚覆盖率急剧下降, 从初始状态的 70% 下降到 7.22%, 下降率约达 $1.7\%y^{-1}$, 这相当于初始造礁石珊瑚覆盖率损失了 89.6%。西沙永兴岛造礁石珊瑚总体呈现“良好生长—急剧退化—缓慢恢复—再次退化”的 4 阶段动态变化。虽然在 1984—2006 年这前 20 年间的珊瑚覆盖率数据相对有限, 造礁石珊瑚在该阶段的演化过程中是否发生退化并不明晰, 但是从 2006 年的高珊瑚覆盖率结果来看, 在该时段永兴岛造礁石珊瑚要么可以从过去的干扰中恢复, 要么是处于一种低干扰状态。与 2006 年之前相比, 可以看出, 2006 年以后, 永兴岛造礁石珊瑚受破坏程度严重。2006—2021 年永兴岛珊瑚覆盖率在受破坏后始终处于 20% 以下, 造礁石珊瑚的退化直接破坏了珊瑚礁生态系统的稳定性, 进一步威胁了珊瑚礁的可持续发展。

2.2 永兴岛与澳大利亚大堡礁退化的对比

我国西沙海域有着丰富的珊瑚礁资源, 但近半个世纪来, 该海域珊瑚礁经历着与全球其他地区珊瑚礁相似的命运, 造礁石珊瑚大面积损失和死亡。其中, 西沙永兴岛造礁石珊瑚严重退化问题最为突出, 《2012 年海南省海洋环境状况公报》官方指出, 在 2012 年西沙监控海域中, 永兴岛的造礁石珊瑚覆盖率最低(海南省海洋与渔业厅, 2013)。南海地区其他珊瑚礁的健康水平也明显高于永兴岛, 2013 年永乐群岛造礁石珊瑚覆盖率达到 18%(Zhao et al, 2016), 均远低于 2011 年澳大利亚大堡礁造礁石珊瑚覆盖率, 其约为 28%。我国对珊瑚礁长时序系统监测和保护工作严重落

后于世界其他区域珊瑚礁, 西沙永兴岛与大堡礁造礁石珊瑚同为印度—太平洋区系珊瑚礁发育中心, 二者的造礁石珊瑚繁生区水深都在 1~5m 处(曾昭璇, 1997), 所在珊瑚礁区也都会因长棘海星暴发而导致珊瑚大量死亡(姚秋翠等, 2022), 故将二者的退化状况对比。

在 1980 年代之前, 关于大堡礁的珊瑚覆盖率数据十分有限, 自 1985 年以来, 澳大利亚海洋科学研究所(Australian Institute of Marine Science, AIMS)启动了一项长期监测计划, 通过鳐式监测法对大堡礁开展广泛的珊瑚礁生态监测, 相关珊瑚覆盖率数据来自(<https://apps.aims.gov.au/reef-monitoring/sector>)。在过去近 40 年中, 大堡礁的珊瑚覆盖率出现了明显的波动变化, 结果如图 3 所示, 1986—2021 年大堡礁的珊瑚覆盖率在空间上呈现出南北高中部低的现象, 南部珊瑚覆盖率年均值可达到 23% 以上, 而中部珊瑚覆盖率年均值低于 20%。时间尺度上, 大堡礁整体珊瑚覆盖率虽然在一定环境干扰下一直处于波动变化的状态, 但于 2011 年之前仍可以维持在 20% 以上, 1986—2011 年大堡礁造礁石珊瑚呈良好波动生长状态。自 2011 年起, 大堡礁的造礁石珊瑚损失严重并呈现出持续退化的趋势, 在 2017 年珊瑚覆盖率急剧下降至 15.7%, 2011—2017 年该时段的珊瑚下降速率达到了每年 2.1%, 造礁石珊瑚处于急剧退化阶段。2017—2021 年大堡礁整体珊瑚覆盖率重新恢复, 出现稳定持续上升的良好生长现象。因此, 1986—2021 年大堡礁造礁石珊瑚的生长变化模式大致可以划分为三个阶段“波动生长——急剧退化——持续恢复”。

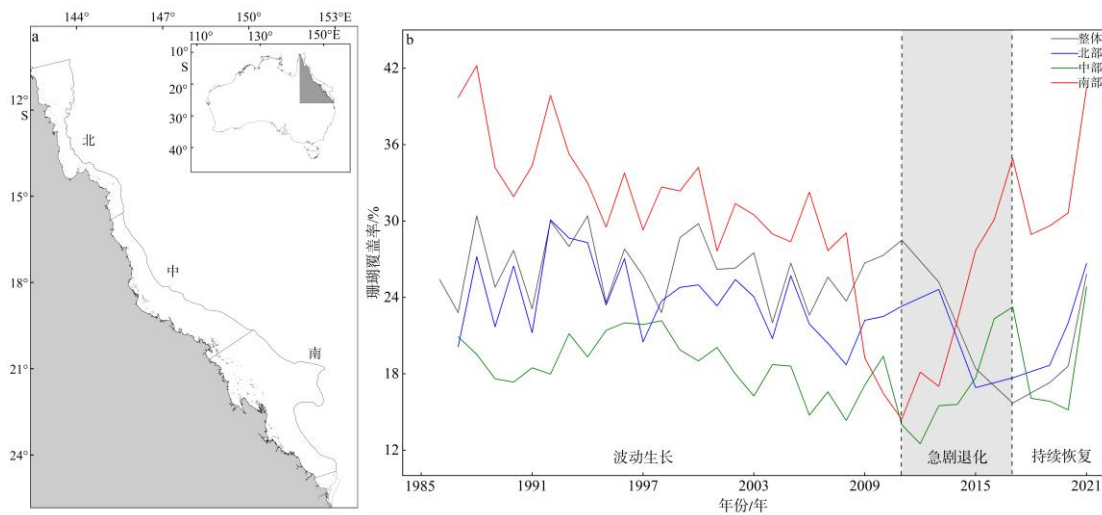


图3 1986—2021年澳大利亚大堡礁珊瑚覆盖率年际变化

a. 澳大利亚大堡礁的研究区示意图; b. 澳大利亚大堡礁整体及北、中、南部珊瑚覆盖率变化

Fig.3 Temporal trends in coral cover for the GBR over the period 1986—2021

a. Study region of the Australian Great Barrier Reef; b. Changes in coral cover on the Australian Great Barrier Reef as a whole and in the southern, central and northern parts of the Reef

在全球珊瑚礁持续退化背景下,大堡礁珊瑚礁受到气候变暖、珊瑚疾病等干扰因素的威胁日渐增多,整体处于衰退中。其中,长棘海星暴发在大堡礁并非一种新的自然现象。大堡礁长棘海星的暴发浪潮最早可以追溯到1960s(Barnes et al, 1964),迄今为止,大堡礁总共经历了4次有记录的大规模长棘海星暴发,1962年在其绿岛开始了第一次长棘海星暴发,并依次在1979年、1993年和2009年迎来了其余3次暴发浪潮(Reichelt et al, 1990; Pratchett et al, 2017)。1998和2002年,大堡礁的南部和中部约有300个珊瑚礁发生珊瑚白化(Hughes et al, 2017),珊瑚白化率最高可达60%(Berkelmans et al, 2004)。De'ath等(2012)利用逻辑回归模型研究表明,1985—2012年长棘海星暴发造成的珊瑚损失率是这两次珊瑚礁白化事件的四倍。珊瑚礁生态系统具有一定的自我恢复能力,可以通过珊瑚自身生长和补充恢复如初(Lotze et al, 2011),在没有其他环境因素严重干扰下,珊瑚礁与长棘海星之间可以保持着一种稳定的生态平衡,造礁石珊瑚覆盖率会因长棘海星的周期性暴发而波动变化。1986—2011年,大堡礁整体珊瑚覆盖率呈波动变化状态,同期记录到4次长棘海星暴发相对于其他干扰造成了更为严重的珊瑚损失率,可以推测,长棘海星是期间大堡礁造礁石珊瑚呈现波动变化生长模式的主要控制因素。2016年大堡礁北部珊瑚礁大规模白化,此次严重白化的珊瑚礁约为1998年和2002年的四倍多(Hughes et al, 2017)。由于多次严重热带气旋活动、局部长棘海星暴发和连续大规模珊瑚热白化,2011—2017年大堡礁整体珊瑚覆盖率持续下降(图3b),相对于局部长棘海星的影响,期间发生的严重热带气旋和珊瑚热白化对大堡礁造礁石珊瑚影响更广泛(Emslie et al, 2024)。因此,严重热带气旋活动和珊瑚热白化是大堡礁造礁石珊瑚出现急剧退化阶段的主要控制因素。总之,在2011年以前,全球气候变暖引发的珊瑚热白化与

大堡礁原有的长棘海星暴发问题耦合作用于珊瑚礁生态系统,提高了大堡礁珊瑚礁生态系统的脆弱性,后续10年气候变暖对珊瑚礁生态系统的威胁更为严峻。

3 永兴岛造礁石珊瑚退化控制因素

3.1 长棘海星

长棘海星(crown-of-thorns starfish, CoTS)暴发是印度—太平洋地区珊瑚礁生态系统退化的主要原因之一(Pratchett et al, 2014)。长棘海星幼虫依赖高营养盐环境发育,成年后专食珊瑚,在活珊瑚覆盖率大于20%标准下,当长棘海星密度超过 $0.01\sim 0.015\text{ind}\cdot\text{m}^{-2}$ 时就达到了暴发阈值,珊瑚会被吞噬而大量死亡(Moran et al, 1992; 姚秋翠等, 2022)。在食物源充足条件下,高营养盐通常是长棘海星暴发的必要先兆(Wooldridge et al, 2015),然而,近20年永兴岛叶绿素a含量都维持在 $0.07\sim 0.24\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ (图4a),未曾出现富营养化现象。一般情况下,长棘海星幼虫生存发育的最佳叶绿素a浓度范围为 $0.25\sim 1.0\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ (Fabricius et al, 2010),因此,永兴岛发生幼虫原地产卵并自我补充导致的初级暴发可能性极小,更可能是次级暴发,其扩散范围通常在10~100km(Dight et al, 1990),有效扩散距离不超过1000km(Harrison et al, 2017)。据历史调查,2005年率先在西沙洲、赵述岛监测到长棘海星,分布密度为 $0.04\text{ind}\cdot\text{m}^{-2}$ (吴钟解等, 2011),随后2006年首次在永兴岛北侧监测到长棘海星密度为 $0.08\text{ind}\cdot\text{m}^{-2}$ 。结合图1b分析,永兴岛的长棘海星最可能从其北部的西沙洲等岛礁漂移而来,在2006—2007年自永兴岛北侧向南侧迁移。通常高营养盐环境极利于长棘海星生长繁殖,2007—2009年间,长棘海星在一支高营养盐海流汇入时就急剧爆发式增长(Shi et al, 2012),2009—2010年数量骤减,期间密度达 $0.04\sim 5.78\text{ind}\cdot\text{m}^{-2}$,远超过能够维持珊瑚礁正常生长时的密度阈值(图4b)。2006—2009年永兴岛造礁石珊瑚覆盖率和补充量逐年急

剧下降,造礁石珊瑚覆盖率损失了约 58%,2009—2010 年稍有回升。因此,长棘海星暴发是 2006—2010 年永兴岛造礁石珊瑚发生急剧退化的主控因素。

虽然在 2006 年以前,西沙长棘海星的相关监测记录很少,但根据其暴发周期(李元超 等, 2019a)和永兴岛造礁石珊瑚良好生长的结果,可以推断,在珊瑚礁生态系统承载力下,1984—2006 年永兴岛长棘海星和造礁石珊瑚之间形成了一种良好交替生长的周期性变化模式。从图 4b 可知,

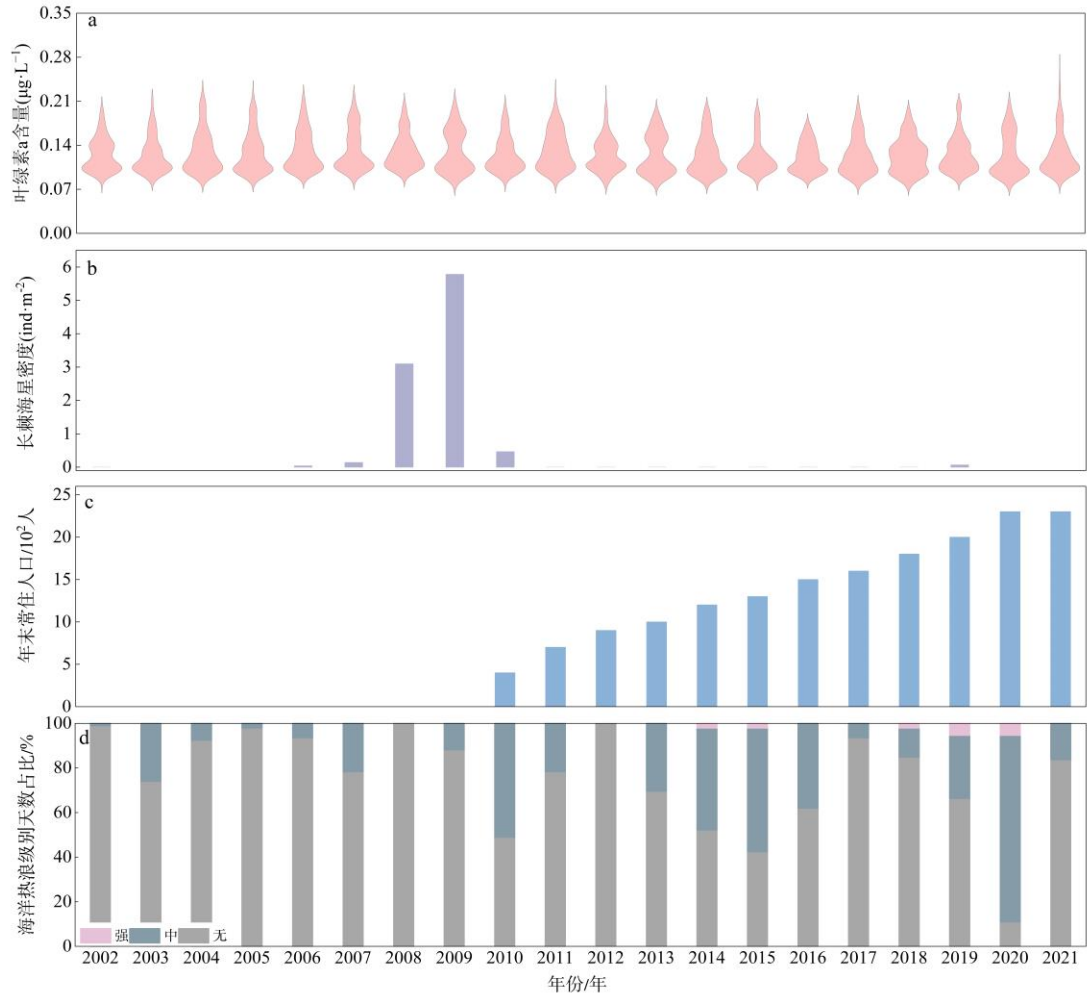


图 4 2002—2021 年永兴岛各退化控制因素指标年际变化
a. 永兴岛叶绿素 a 含量; b. 长棘海星密度; c. 年末常住人口数; d. 海洋热浪级别天数占比

Fig.4 Changes of degradation control factors in Yongxing Island from 2002—2021

a. Chlorophyll-a concentration in Yongxing Island; b. density of crown-of-thorns starfish; c. Year-end resident population; d. percentage of days with marine heatwave level

3.2 珊瑚疾病

近几十年来珊瑚病害对造礁石珊瑚的威胁日益严重,结合历史文献,梳理了永兴岛珊瑚病害的相关调查,研究显示,在 2002 年以前,永兴岛没有任何珊瑚疾病的记录,2002 年在永兴岛北部首次发现了由海洋细菌造成叶状蔷薇珊瑚 (*Montipora foliosa*) 局部变黑的问题(李颖虹 等, 2004)。此前,永兴岛仅于 1991 年建成横跨东西的机场跑道(赵焕庭 等, 2017), 该项工程对珊瑚礁影响范围有限且年代久远。2006 年永兴岛的造礁石珊瑚生长良好(黄晖 等, 2011), 这说明 2002 年永兴岛北侧珊瑚局部黑化在 2002—2006 年末持续蔓延和威胁珊瑚生长,是正常的自然过程,永兴岛造礁石珊瑚在 1984—2006 年良好生长阶段受珊瑚疾病影响有限。

2011—2021 年永兴岛长棘海星几乎为零,仅 2019 年超过其暴发时阈值,分布密度为 0.07ind·m⁻²,后续 10 年永兴岛造礁石珊瑚覆盖率远低于 20%和 2014 年来强海洋热浪天气的频繁发生,因食物缺乏和海水变暖抑制了长棘海星的再次暴发生长(Lamare et al, 2014)。2020—2021 年的调查明确指出,宣德群岛仅有极少量长棘海星分布且不影响珊瑚正常生长(郎尚昆, 2022)。因此,长棘海星在永兴岛造礁石珊瑚缓慢恢复和重新退化阶段几乎没有产生任何影响。

2008 年, Shi 等(2012)首次在永兴岛北侧活珊瑚上发现大量黑皮海绵, 覆盖率约为 7.8%, 2010 年下降至 4.6%。黑皮海绵 (*Terpios hoshinota*) 通常大规模出现在高盐高污染的沿岸水体, 在西太平洋沿海一带过度开发的珊瑚礁都出现过 (Klaus et al, 1993; Yang et al, 2018), 为获取生存空间, 会通过释放毒素和光阻断损伤珊瑚组织而造成珊瑚死亡 (Syue et al, 2021)。永兴岛沿岸水体相当干净, 一直处于低营养盐水平, 不具备原地自发性暴发大规模黑皮海绵的条件。研究表明, 西太平洋黑潮的支流在汇入南海西南流时, 将 2006 年率先在台湾绿岛暴发的黑皮海绵通过海流输运至永兴岛北侧海域, 导致了此次永兴岛黑皮海绵的暴发 (Shi et al, 2012)。这只海流造成长棘海星在 2008 年加速繁

殖,从而捕食了更多珊瑚,同时黑皮海绵与珊瑚的种间竞争也导致其死亡退化。在 2010—2011 年间,永兴岛南北两侧的珊瑚都出现了不同症状的珊瑚疾病,珊瑚疾病种类达 8

表 3 2010—2011 年永兴岛南北侧珊瑚疾病类型(数据源于历史文献(朱志雄 等, 2012)

Tab.3 Coral disease types on the north and south sides of Yongxing Island, 2010—2011

类型 位置	黄色炎症样 病症	黑 化	白化	白斑病	粉化	粉带病 症	粉红色线 状综合征	粉红颗粒 状综合征
南侧		+	+	+	+	+		
北侧	+		+	+	+		+	+

总而言之, 2006 年长棘海星在永兴岛北侧暴发后, 2008—2010 年突发性黑皮海绵暴发和长棘海星暴发耦合作用于永兴岛造礁石珊瑚, 结合长棘海星暴发的时间、数量以及对珊瑚的影响机制, 可以推断, 黑皮海绵造成的珊瑚死亡面积应远少于长棘海星。因此, 2008—2011 年永兴岛的多种珊瑚疾病是永兴岛造礁石珊瑚出现急剧退化阶段的次要影响因素。在 2011 年之后, 永兴岛珊瑚疾病调查鲜有报道, 由于多数珊瑚病害需附着在活珊瑚上才能大量繁殖, 在 2011—2021 年永兴岛珊瑚覆盖率极低情况下, 各珊瑚疾病几乎无法大量繁殖, 所以珊瑚疾病在后期永兴岛造礁石珊瑚缓慢恢复和重新退化阶段影响有限。

3.3 珊瑚热白化

我国珊瑚礁分布于世界珊瑚礁北缘, 理论上全球气候变暖对我国珊瑚礁的影响较为有限, 但近年来研究显示, 永兴岛海域年均海温增温率显著高于全球水平(时小军 等, 2008), 西沙北礁也于 2014 年首次记录到大规模珊瑚白化, 礁区的珊瑚白化率超过 90%(Li et al, 2016)。未来全球气候变暖背景下, 海洋热浪会更加频繁(Frölicher et al, 2018; Hayashida et al, 2020; 袁钰 等, 2024), 西沙海域珊瑚热白化死亡的潜在威胁日渐凸显。由于珊瑚热白化与热压力累积密切相关(Hughes et al, 2017; Aarón et al, 2019; 陆永强 等, 2022), 在永兴岛珊瑚白化事件历史记录空白下, 采用 NOAA 基于高分辨率遥感海表温度数据(CoralTemp)计算的周热度数据(degree heating weeks, DHW)(<https://coralreefwatch.noaa.gov/product/vs/data.php>), 得出西沙珊瑚礁区的年周热度变化(图 5)。目前, 基于

种(表 3)。在 2011 年永兴岛长棘海星消亡的情况下, 各种珊瑚病害损失了其约 9%的造礁石珊瑚。

CoralTemp 海表温度计算的 DHW 已成功监测和预警了全球多起大规模珊瑚白化事件(Liu et al, 2003; Hughes et al, 2017), 在南海海域甚至比现场观测海温的计算值更能反映实际的珊瑚白化情况, 且 CoralTemp 在多个遥感海表温度数据中最接近现场观测值(旷芳芳 等, 2023)。

西沙珊瑚礁在 1988 年、2014—2016 年和 2019—2021 年的年最大 DHW 都大于 8 °C-周(图 5), 都超过了珊瑚严重白化和大规模死亡的 DHW 阈值(8 °C-周)。据调查, 2019 年鸭公岛鹿角珊瑚大面积白化(黄晖, 2021), 2020 年西沙 17 个岛礁都出现不同程度的白化, 永乐群岛白化珊瑚覆盖率高达 4.61%, 2021 年珊瑚白化情况有所好转(郎尚昆, 2022)。以上珊瑚白化事件说明西沙年最大 DHW 能够较好地预警区域内珊瑚热白化的发生。结合图 4d, 2014 年以来, 永兴岛开始在夏季出现强海洋热浪天气, 在 2020 年夏季出现 5 天, 其白化珊瑚覆盖率为 5.23%; 而 2021 年夏季未有相关记录, 白化珊瑚覆盖率下降为 0.33%。根据 2014—2016 年西沙的年最大 DHW、西沙其他岛礁的珊瑚热白化和永兴岛的强海洋热浪天气记录, 永兴岛造礁石珊瑚在 2014—2016 年经历了高强度的热压力胁迫, 期间珊瑚覆盖率波动变化(图 2b), 极有可能是发生了珊瑚热白化。综上, 在 2014 年以前, 珊瑚热白化对永兴岛的良好生长和急剧退化阶段影响有限。2014—2016 年永兴岛经受的热压力胁迫可能导致其造礁石珊瑚恢复缓慢, 具体影响程度还需考虑 2011—2019 年其他控制因素的变化。目前, 可以明确珊瑚热白化是 2019—2021 年永兴岛造礁石珊瑚再次退化的主要控制因素。

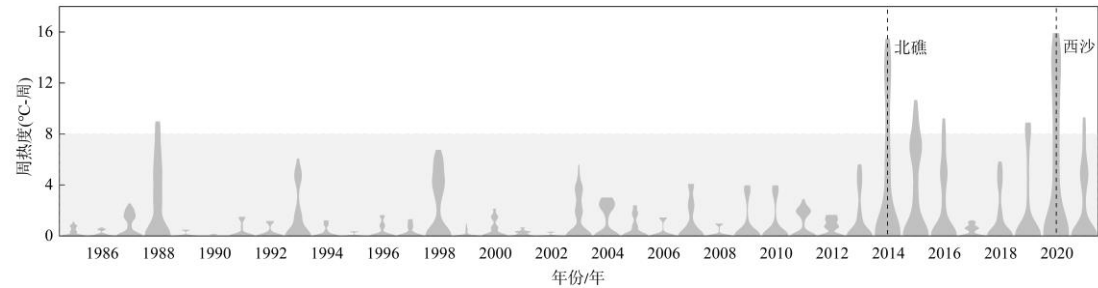


图 5 西沙珊瑚礁区年周热度小提琴图

Fig.5 The violin plots of the annual degree heating week in the coral reef regions of the Xisha Islands

3.4 人类活动

珊瑚礁受干扰后具有重新恢复的能力, 即使珊瑚幼虫

补充量很小, 在没有人类活动影响下能相对较快地从干扰中恢复(Gilmour et al, 2013)。然而, 2011—2019 年, 永兴岛

珊瑚礁恢复速率极低,人类活动的干扰程度会显著影响珊瑚礁的恢复速度(李淑等,2007)。离岸珊瑚礁的人类活动影响不外乎是开发建设工程、破坏性渔业活动和过度捕捞以及海水富营养化和污染这几类情况。首先,1970s 永兴岛在西南侧修建了两个港口(Shi et al, 2012),1991 年建成横跨东西的机场,2012 年在西北部礁坪上修建了新的大港池(北港)和多用途码头(赵焕庭等,2017),施工后的海洋水文和底质状况改变仅限于工程建设区及其周围小范围,珊瑚发育生长的理化环境不会发生根本性变化,仍能健康生长。因此,这些建设工程一定程度上影响了永兴岛西侧的造礁石珊瑚,但对其北侧和东南侧无显著影响。破坏性渔业活动通常在渔场使用非法网具、炸鱼和电鱼等方式直接破坏珊瑚礁,但这些主要发生在上世纪 70—80 年代,且南海 20 余个天然渔场都距永兴岛有一定的距离,距离最近的海南岛东南部渔场有 100km 以上(许强等,2018)。有关研究显示,在 2003—2013 年间,永兴岛的珊瑚礁鱼类种类仍较多,鱼类多样性并未降低(王雪辉等,2011;李元超等,2017)。由于 1984—2006 年永兴岛珊瑚覆盖率保持在 65%以上,故可推断期间发生的人类活动事件与其中的自然过程耦合作用于永兴岛珊瑚礁生态系统,但并未超出其生态承载力。2012 年以来,永兴岛已严令禁止非法砗磲采挖行为(李元超等,2018),因此砗磲采挖亦非 2011—2019 年间抑制珊瑚自我修复的主要因素。而 2012 年永兴岛西北部的工程建设也发生在急剧退化阶段之后,2006—2011 年在永兴岛也并未记录到其他重大人类活动事件,因此,人类活动在永兴岛急剧退化阶段的干扰程度几乎很小。

随着西沙群岛的发展,三沙市政府自 2012 年常驻永兴岛并开展了各项建设活动,包括学校建设和邮轮投运等,2010—2021 年常住人口从 400 人逐年递增至 2300 人(图 4c)。为满足 2011—2019 年新增居民的生活需求,相关人类活动在此阶段可能对环境造成了一定程度的干扰,然而持续增加的人口密度无法解释 2011—2019 年珊瑚覆盖率波动增长至 14.99% 的现象。因此,在 2011—2019 年间,人类活动

可能一定程度上抑制了永兴岛造礁石珊瑚的迅速恢复,但 2014—2019 年期间永兴岛的热压力才是其造礁石珊瑚缓慢恢复的主要控制因素。近 40 年来,人类活动和自然因素一直耦合作用于永兴岛珊瑚礁生态系统,但人类活动在永兴岛造礁石珊瑚各阶段都并未起到主要控制作用。

4 结论

从近 40 年永兴岛珊瑚礁生态监测调查现象的梳理与统计分析中发现:在 1984—2021 年间,西沙永兴岛范围内的珊瑚礁严重退化,活珊瑚覆盖率从初始的 70% 下降到 7.22%,近 60% 的造礁石珊瑚已损失。永兴岛造礁石珊瑚总体呈现“良好生长—急剧退化—缓慢恢复—再次退化”的 4 阶段动态变化,1984—2006 年呈现良好生长状态,2006—2011 年出现急剧退化阶段,2011—2019 年开始缓慢恢复,2019—2021 年又重新退化。长棘海星和珊瑚热白化分别是永兴岛造礁石珊瑚急剧退化和再次退化的主要控制因素,珊瑚疾病在急剧退化阶段产生了一定的影响,人类活动一定程度上抑制了珊瑚急剧退化后的迅速恢复,同期珊瑚热白化影响其后续恢复。近 40 年来,人类活动和自然因素一直耦合作用于永兴岛珊瑚礁生态系统,但人类活动在永兴岛造礁石珊瑚各个变化阶段都并未起到主要控制作用。21 世纪以来大堡礁和永兴岛的造礁石珊瑚都出现了一个“急剧退化”阶段,大堡礁的“急剧退化”阶段发生在 2011—2017 年,严重热带气旋和珊瑚热白化是该阶段的主要控制因素,但其在急剧退化后能持续恢复到原来水平。而永兴岛的“急剧退化”阶段出现得更早,长棘海星暴发造成珊瑚大面积死亡,后期珊瑚疾病、人类活动和珊瑚热白化等多因素综合作用于永兴岛,使其造礁石珊瑚恢复力低下,珊瑚覆盖率始终处于低水平。珊瑚礁保护与修复是可能逆转珊瑚礁不断退化现状的有效措施(黄晖等,2024),在日渐严峻的气候环境下,加强区域珊瑚礁退化的有效预警与控制区域环境因素对珊瑚礁的影响是减轻区域珊瑚礁退化压力和推动全球珊瑚礁可持续发展的关键。

参考文献 References

- 海南省海洋与渔业厅. 2012 年海南省海洋环境状况公报[N]. 海南日报, 2013-06-27(A07). Hainan Provincial, Ocean and Fisheries. Bulletin of the state of marine environment in Hainan Province in 2012[N]. Hainan Daily News, 2013-06-27(A07) (in Chinese).
- 黄晖, 练健生, 黄小平, 等. 用珊瑚覆盖率作为干扰指标——永兴岛石珊瑚生物多样性研究[J]. 科学通报, 2006, 51(S3): 108—113. HUANG HUI, LIAN JIANSHENG, HUANG XIAOPING, et al. Coral cover as a disturbance indicator——A study on stony coral biodiversity on Yongxing Island[J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(S3): 108—113 (in Chinese).
- 黄晖, 尤丰, 练健生, 等. 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, 2011, 19(6): 710—715. HUANG HUI, YOU FENG, LIAN JIANSHENG, et al. Species diversity and distribution of scleractinian coral at Xisha Islands, China[J]. Biodiversity Science, 2011, 19(6): 710—715 (in Chinese with English abstract).
- 黄晖. 中国珊瑚礁状况报告(2010—2019)[M]. 北京: 海洋出版社, 2021. HUANG HUI. Status of coral reefs in China: 2010—2019[M]. Beijing: China Ocean Press, 2021 (in Chinese).

- 黄晖, 俞晓磊, 黄林韬, 等. 珊瑚礁生态学研究现状和展望[J]. 热带海洋学报, 2024, 43(3): 3—12. HUANG HUI, YU XIAOLEI, HUANG LINTAO, et al. Current status and prospects of coral reef ecology research[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2024, 43(3): 3—12 (in Chinese with English abstract).
- 旷芳芳, 张俊鹏, 查品, 等. 不同 SST 资料在海南岛和北部湾珊瑚白化预警中的适用性比较[J]. 应用海洋学学报, 2023, 42(3): 371—381. KUANG FANGFANG, ZHANG JUNPENG, CHA JING, et al. A comparison of three remote sensing SSTs for coral bleaching warnings in coastal areas of Hainan Island and Beibu Gulf[J]. Journal of Applied Oceanography, 2023, 42(3): 371—381 (in Chinese with English abstract).
- 郎尚昆. 海南岛和西沙群岛珊瑚白化状况及原因分析[D]. 三亚: 海南热带海洋学院, 2022. LANG SHANGKUN. The status and cause analysis of coral bleaching in Hainan Island and Xisha Islands[D]. Sanya: Hainan Tropical Ocean University, 2022 (in Chinese with English abstract).
- 李淑, 余克服. 珊瑚礁白化研究进展[J]. 生态学报, 2007, 27(5): 2059—

- 2069.SHU LI, KEFU YU. Recent development in coral reef bleaching research[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007,27(5):2059—2069 (in Chinese with English abstract).
- 李颖虹, 黄小平, 岳维忠. 西沙永兴岛环境质量状况及管理对策[J]. *海洋环境科学*, 2004(1):50—53.LI YINGHONG, HUANG XIAOPING, YUE WEIZHONG. Environmental quality and management measures in Yongxing Island of Xisha, South China Sea[J]. *Marine Environmental Science*, 2004(1):50—53 (in Chinese with English abstract).
- 李元超, 黄晖, 董志军, 等. 珊瑚礁生态修复研究进展[J]. *生态学报*, 2008,28(10):5047—5054.LI YUANCHAO, HUANG HUI, DONG ZHIJUN, et al. Headway of study on coral reefs ecological restoration[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008,28(10):5047—5054 (in Chinese with English abstract).
- 李元超, 韩有定, 陈石泉, 等. 砗磲采挖对珊瑚礁生态系统的破坏——以西沙北礁为例[J]. *应用海洋学学报*, 2015,34(4):518—524.LI YUANCHAO, HAN YOU DING, CHEN SHIQUAN, et al. Damages of coral reef ecosystem by the giant clam excavation——a case study on North Reef of Xisha Islands[J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2015,34(4):518—524 (in Chinese with English abstract).
- 李元超, 吴钟解, 陈石泉, 等. 永兴岛及七连屿浅水礁区珊瑚礁鱼类多样性探讨[J]. *海洋环境科学*, 2017,36(4):509—516.LI YUANCHAO, WU ZHONGJIE, CHEN SHIQUAN, et al. Discussion of the diversity of the coral reef fish in the shallow reefs along the Yongxing and Qilanyu Island[J]. *Marine Environmental Science*, 2017,36(4):509—516 (in Chinese with English abstract).
- 李元超, 陈石泉, 郑新庆, 等. 永兴岛及七连屿造礁石珊瑚近10年变化分析[J]. *海洋学报*, 2018,40(8):97—109.LI YUANCHAO, CHEN SHIQUAN, ZHENG XINQING, et al. Analysis of the change of hermatypic corals in Yongxing Island and Qilanyu Island in nearly a decade[J]. *Haiyang Xuebao*, 2018,40(8):97—109 (in Chinese with English abstract).
- 李元超, 吴钟解, 梁计林, 等. 近15年西沙群岛长棘海星暴发周期及暴发原因分析[J]. *科学通报*, 2019a,64(33):3478—3484.LI YUANCHAO, WU ZHONGJIE, LIANG JILIN, et al. Analysis on the outbreak period and cause of *Acanthaster planci* in Xisha Islands in recent 15 years[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2019a,64(33):3478—3484 (in Chinese with English abstract).
- 李元超, 梁计林, 吴钟解, 等. 长棘海星的暴发及其防治[J]. *海洋开发与管理*, 2019b,36(8):9—12.LI YUANCHAO, LIANG JILIN, WU ZHONGJIE, et al. Outbreak and Prevention of *Acanthaster planci*[J]. *Ocean Development and Management*, 2019b,36(8):9—12 (in Chinese with English abstract).
- 龙笛. OCNET 全球每日叶绿素—a产品数据集(2001—2021年)[Z]. 国家冰川冻土沙漠科学数据中心, 2024.LONG DI. OCNET Global Daily Chlorophyll—a Product Dataset (2001—2021) [Z]. National Cryosphere Desert Data Center, 2024 (in Chinese).
- 陆永强, 陈正华, 余克服, 等. 1985—2019年南海诸岛珊瑚礁区热压力时空变化研究分析[J]. *海洋学报*, 2022,44(11):179—190.LU YONGQIANG, CHEN ZHENGHUA, YU KEFU, et al. Spatio—temporal variations of heat stress in coral reef regions over the South China Sea islands from 1985 to 2019[J]. *Haiyang Xuebao*, 2022,44(11):179—190 (in Chinese with English abstract).
- 时小军, 刘元兵, 陈特固, 等. 全球气候变暖对西沙、南沙海域珊瑚生长的潜在威胁[J]. *热带地理*, 2008,28(4):342—345.SHI XIAOJUN, LIU YUANBING, CHEN TEGU, et al. The Potential Threats of Global Warming on Corals Living in the Xisha Islands and Nansha Islands[J]. *Tropical Geography*, 2008,28(4):342—345 (in Chinese with English abstract).
- 王丽荣, 余克服, 赵焕庭, 等. 南海珊瑚礁经济价值评估[J]. *热带地理*, 2014,34(1):44—49. WANG LIRONG, YU KEFU, ZHAO HUANTING, et al. Economic Valuation of the Coral Reefs in South China Sea[J]. *Tropical Geography*, 2014,34(1):44—49 (in Chinese with English abstract).
- 王雪辉, 杜飞雁, 林昭进, 等. 西沙群岛主要岛礁鱼类物种多样性及其群落格局[J]. *生物多样性*, 2011,19(4):463—469.WANG XUEHUI, DU FEIYAN, LIN ZHAOJIN, et al. Fish species diversity and community pattern in coral reefs of the Xisha Islands, South China Sea[J]. *Biodiversity Science*, 2011,19(4):463—469 (in Chinese with English abstract).
- 吴程宏, 刘维, 符丹凤, 等. 西沙群岛海域砗磲资源的调查[J]. *热带生物学报*, 2023,14(2):197—202.WU CHENGHONG, LIU WEI, FU DANFENG, et al. A survey of giant clams in the waters at Xisha Islands[J]. *Journal of Tropical Biology*, 2023,14(2):197—202 (in Chinese with English abstract).
- 吴钟解, 王道儒, 涂志刚, 等. 西沙生态监控区造礁石珊瑚退化原因分析[J]. *海洋学报*, 2011,33(4):140—146.WU ZHONGJIE, WANG DAORU, TU ZHIGANG, et al. The analysis on the reason of hermatypic coral degradation in Xisha[J]. *Haiyang Xuebao*, 2011,33(4):140—146 (in Chinese with English abstract).
- 许强, 刘维, 高菲, 等. 发展中国南海热带岛礁海洋牧场——机遇、现状与展望[J]. *渔业科学进展*, 2018,39(5):173—180.XU QIANG, LIU WEI, GAO FEI, et al. Development of marine ranching at tropical island area in South China Sea——advantages, status and prospects[J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2018,39(5):173—180 (in Chinese with English abstract).
- 姚秋翠, 余克服, 廖芝衡, 等. 棘冠海星暴发及其对珊瑚礁的生态影响研究进展[J]. *生态学报*, 2022,42(18):7517—7528.YAO QIUCUI, YU KEFU, LIAO ZHIHENG, et al. A review of research on crown-of-thorns starfish and their ecological effects on coral reefs[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022,42(18):7517—7528 (in Chinese with English abstract).
- 余克服, 宋朝景, 赵焕庭. 西沙群岛永兴岛地貌与现代沉积特征[J]. *热带海洋学报*, 1995,14(2):24—31.YU KEFU, SONG CHAOJING, ZHAO HUANTING. The Characters of Geomorphology and Morden Sediments of Yongxing Island, Xisha Islands[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 1995,14(2):24—31 (in Chinese with English abstract).
- 袁钰, 徐海明, 马静, 等. AMO对ENSO与初夏西太平洋海洋热浪年际关系的年代际调制作用[J]. *热带海洋学报*, 2024,43(5):1—16. YUAN YU, XU HAIMING, MA JING, et al. Impact of Atlantic Multidecadal Oscillation on interannual relationship between ENSO and early summer marine heatwaves in the Western Pacific[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2024,43(5):1—16 (in Chinese with English abstract).
- 曾昭璇. 中国珊瑚礁地貌研究[M]. 广州: 广东人民出版社, 1997.ZENG ZHAOXUAN. Geomorphology of coral reefs in China[M]. Guangzhou: Guangdong People's Press, 1997(in Chinese).
- 赵焕庭, 王丽荣. 南海诸岛珊瑚礁人工岛建造研究[J]. *热带地理*, 2017,37(5):681—693.ZHAO HUANTING, WANG LIRONG. Construction of Artificial Islands on Coral Reef in the South China Sea Islands[J]. *Tropical Geography*, 2017,37(5):681—693 (in Chinese with English abstract).
- 朱志雄, 周永灿, 柯韶文, 等. 西沙群岛造礁石珊瑚主要疾病调查与初步研究[J]. *海洋学报*, 2012,34(6):195—204.ZHU ZHIXIONG, ZHOU YONGCAN, KE SHAOWEN, et al. The survey and preliminary research on main diseases of stony coral in Xisha Archipelago[J]. *Haiyang Xuebao*, 2012,34(6):195—204 (in Chinese with English abstract).
- 邹仁林. 中国动物志[M]. 北京: 科学出版社, 2001.ZOU REN LIN. Zoography[M]. Beijing: Science Press, 2001 (in Chinese).
- AARÓN I M, ANDREA R, CHOLLETT I, et al. Three decades of heat stress exposure in Caribbean coral reefs: a new regional delineation to enhance conservation[J]. *Scientific Reports*, 2019,9(1).
- BARNES J, ENDEAN R. A dangerous starfish-*Acanthaster planci* (Linné)[J]. *The Medical Journal of Australia*, 1964,1(16):592—593.
- BELLWOOD D R, HUGHES T P, FOLKE C, et al. Confronting the coral reef crisis[J]. *Nature*, 2004,429(6994):827—833.
- BERKELMANS R, DE'ATH G, KININMONTH S, et al. A comparison of the 1998 and 2002 coral bleaching events on the Great Barrier Reef: spatial correlation, patterns, and predictions[J]. *Coral Reefs*, 2004,23(1):74—83.
- DAVID S, WICQUART S P J. Status of Coral Reefs of the World: 2020[R]. Global Coral Reef Monitoring Network (GCRMN), International Coral Reef Initiative (ICRI), 2021.
- DEATH G, FABRICIUS K E, SWEATMAN H, et al. The 27-year decline of coral cover on the Great Barrier Reef and its causes[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2012,109(44):17995—17999.
- DIGHT I J, JAMES M K, BODE L. Modelling the larval dispersal of *Acanthaster planci*[J]. *Coral Reefs*, 1990,9(3):125—134.
- EMSLIE M J, CECCARELLI D M, LOGAN M, et al. Changing dynamics of Great Barrier Reef hard coral cover in the Anthropocene[J]. *Coral*

- Reefs, 2024,43(3):747—762.
- FABRICIUS K E, OKAJI K, DEATH G. Three lines of evidence to link outbreaks of the crown-of-thorns seastar *Acanthaster planci* to the release of larval food limitation[J]. *Coral Reefs*, 2010,29(3):593—605.
- FRÖLICHER T L, FISCHER E M, GRUBER N. Marine heatwaves under global warming[J]. *Nature*, 2018,560(7718):360—364.
- GILMOUR J P, SMITH L D, HEYWARD A J, et al. Recovery of an Isolated Coral Reef System Following Severe Disturbance[J]. *Science*, 2013,340(6128):69—71.
- HARRISON H B, PRATCHETT M S, MESSMER V, et al. Microsatellites Reveal Genetic Homogeneity among Outbreak Populations of Crown-of-Thorns Starfish (*Acanthaster cf. solaris*) on Australia's Great Barrier Reef[J]. *Diversity*, 2017,9(1):16.
- HAYASHIDA H, MATEAR R J, STRUTTON P G, et al. Insights into projected changes in marine heatwaves from a high-resolution ocean circulation model[J]. *Nature Communications*, 2020,11(1):4352.
- HERON S F, WILLIS B L, SKIRVING W J, et al. Summer hot snaps and winter conditions: modelling white syndrome outbreaks on Great Barrier Reef corals[J]. *PloS one*, 2010,5(8): e12210.
- HOBDAY A J, ALEXANDER L V, PERKINS S E, et al. A hierarchical approach to defining marine heatwaves[J]. *Progress in Oceanography*, 2016,141:227—238.
- HOBDAY A J, OLIVER E C J, GUPTA A S, et al. Categorizing and Naming Marine Heatwaves[J]. *Oceanography*, 2018,31(2):162—173.
- HOWELLS E J, VAUGHAN G O, WORK T M, et al. Annual outbreaks of coral disease coincide with extreme seasonal warming[J]. *Coral Reefs*, 2020,39(3):771—781.
- HUANG DANWEI, LICUANAN W Y, HOEKSEMA B W, et al. Extraordinary diversity of reef corals in the South China Sea[J]. *Marine Biodiversity*, 2015,45(2):157—168.
- HUGHES T P, KERRY J T, ÁLVAREZ-NORIEGA M, et al. Global warming and recurrent mass bleaching of corals[J]. *Nature*, 2017,543(7645):373—377.
- HUGHES T P, ANDERSON K D, CONNOLLY S R, et al. Spatial and temporal patterns of mass bleaching of corals in the Anthropocene[J]. *Science*, 2018,359(6371):80—83.
- KLAUS R, KATHERINE M. Terpios hoshinota, a new cyanobacteriosponge threatening Pacific Reefs[J]. *Scientia Marina*, 1993,57(4):395—403.
- KROON F J, BARNECHE D R, EMSLIE M J. Fish predators control outbreaks of Crown-of-Thorns Starfish[J]. *Nature Communications*, 2021,12(1):6986.
- LAMARE M, PECORINO D, HARDY N, et al. The thermal tolerance of crown-of-thorns (*Acanthaster planci*) embryos and bipinnaria larvae: implications for spatial and temporal variation in adult populations[J]. *Coral Reefs*, 2014,33(1):207—219.
- LI YUANCHAO, ZHENG XINQING, CHEN SHIQUAN, et al. Coral bleaching in the North Reef of China's Xisha Islands in 2014: The 2nd International Conference on Water Resource and Environment (WRE 2016), Shanghai, 2016[C]. BioMed Central.
- LIU G, STRONG A E, SKIRVING W. Remote sensing of sea surface temperatures during 2002 Barrier Reef coral bleaching[J]. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 2003,84(15):137—141.
- LOTZE H K, COLL M, MAGERA A M, et al. Recovery of marine animal populations and ecosystems[J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2011,26(11):595—605.
- MATTHEWS S A, WILLIAMSON D H, BEEDEN R, et al. Protecting Great Barrier Reef resilience through effective management of crown-of-thorns starfish outbreaks[J]. *PLoS one*, 2024,19(4): e0298073.
- MORAN P J, DE'ATH G. Estimates of the abundance of the crown-of-thorns starfish *Acanthaster planci* in outbreaking and non-outbreaking populations on reefs within the Great Barrier Reef[J]. *Marine Biology*, 1992,113(3):509—515.
- PRATCHETT M S. Changes in coral assemblages during an outbreak of *Acanthaster planci* at Lizard Island, northern Great Barrier Reef (1995–1999) [J]. *Coral Reefs*, 2010,29(3):717—725.
- PRATCHETT M S, CABALLES C F, RIVERA-POSADA J A, et al. Limits to understanding and managing outbreaks of Crown-of-Thorns Starfish (*Acanthaster* spp.) [J]. *Oceanography and Marine Biology: an Annual Review*, 2014,52:133—199.
- PRATCHETT M S, CABALLES C, WILMES J, et al. Thirty Years of Research on Crown-of-Thorns Starfish (1986—2016): Scientific Advances and Emerging Opportunities[J]. *Diversity*, 2017,9(4):41.
- REICHELT R E, BRADBURY R H, MORAN P J. Distribution of *Acanthaster planci* outbreaks on the Great Barrier Reef between 1966 and 1989[J]. *Coral Reefs*, 1990,9(3):97—103.
- ROGERS J, PLAGANYI E E. Culling corallivores improves short-term coral recovery under bleaching scenarios[J]. *Nature Communications*, 2022,13(1):2520.
- SHI QI, LIU GUOHUI, YAN HONGQIANG, et al. Black disease (*Terpios hoshinota*): a probable cause for the rapid coral mortality at the northern reef of Yongxing Island in the South China Sea[J]. *Ambio*, 2012,41(5):446—455.
- SYUE S, HSU C, SOONG K. Testing of how and why the *Terpios hoshinota* sponge kills stony corals[J]. *Scientific Reports*, 2021,11(1).
- WILKINSON C R. Status of Coral Reefs of the World: 2004: Institute of Marine Science, Townsville[R]. Australian Institute of Marine Science (AIMS), 2004.
- WOOLDRIDGE S A, BRODIE J E. Environmental triggers for primary outbreaks of crown-of-thorns starfish on the Great Barrier Reef, Australia[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2015,101(2):805—815.
- YANG SUNGYIN, CHEN HSINGJU, HO MINGJAY, et al. Outbreak of coral-killing cyanobacteriasponge, *Terpios hoshinota*, in Taiping Island (Itu Aba), Spratlys, South China Sea[J]. *Bulletin of Marine Science*, 2018,94(4):1543—1544.
- ZHAO MEIXIA, YU KEFU, SHI QI, et al. The coral communities of Yongle atoll: status, threats and conservation significance for coral reefs in South China Sea[J]. *Marine and Freshwater Research*, 2016,67(12):1888—1896.