

# 涠洲岛珊瑚礁特点、演变及保护与修复对策的思考\*

周浩郎\*\*，王欣，梁文

(广西科学院广西红树林研究中心, 广西红树林保护与利用重点实验室, 广西北海 536000)

**摘要:**涠洲岛珊瑚礁最早形成于约 7 000 年前的末次海侵, 是中国大陆沿海成礁珊瑚分布最北缘的典型边缘珊瑚礁(Marginal Coral Reefs), 与区域内其他珊瑚礁缺少生态关联, 其特征不同于热带珊瑚礁, 即块状珊瑚占优势。20 多年来, 涠洲岛珊瑚礁持续退化, 枝状珊瑚大量死亡, 石珊瑚盖度急剧降低, 反映珊瑚礁良好状况的指标生物如鹦嘴鱼、蝴蝶鱼等的数量大幅减少。近 10 年来, 珊瑚虽未出现异常死亡现象, 但珊瑚自然修复不明显, 表明珊瑚补充不足。功能性植食性鱼类的缺乏, 显示珊瑚礁恢复力不足。涠洲岛珊瑚礁国家级海洋公园的建立, 体现了保护涠洲岛珊瑚礁的政治意愿。只有恢复鹦嘴鱼等功能性植食性鱼类的数量, 才能恢复和增强珊瑚礁固有恢复力, 进而促进涠洲岛珊瑚礁的自然恢复。人为修复可采取移植珊瑚断枝的方式, 并以实现生态、经济和社会增益为目标, 构建能应对人为干预且能持续演化的珊瑚礁。

**关键词:**涠洲岛 珊瑚礁 特点 变化 保护 修复 对策

中图分类号: P745 文献标识码: A 文章编号: 1002-7378(2020)03-0228-09

DOI: 10.13657/j.cnki.gxkxyxb.20201027.016



微信扫一扫, 与作者  
在线交流(OSID)

## 0 引言

涠洲岛珊瑚礁因其分布特殊性和人类关联性而愈来愈受到重视, 其存在的重要性不仅在于维持珊瑚礁生物多样性, 而且也在于保障当地社会经济可持续性。扭转涠洲岛珊瑚礁退化趋势, 使其恢复健康状态, 是涠洲岛珊瑚礁国家级海洋公园建立的明确目的和任务, 更是生态文明建设的需要。只有通过了解其发展历史, 推演其演变过程, 掌握其特点和结构, 分析其面临的具体问题, 在科学认识涠洲岛珊瑚礁前提下, 才能找到恢复涠洲岛珊瑚礁的正确途径。

## 1 涠洲岛珊瑚礁的特点

### 1.1 涠洲岛珊瑚礁是边缘珊瑚礁

一直以来, 珊瑚礁被归为环境耐受度较低的生态系统, 受限于较狭窄的环境条件, 仅限分布于温暖、清澈、浅水和高盐的海域, 即珊瑚礁的正常分布海域。涠洲岛珊瑚礁位于北部湾, 是中国大陆沿海成礁珊瑚分布的最北缘, 是典型的边缘珊瑚礁(Marginal Coral Reefs)<sup>[1]</sup>。

温度、盐度、营养盐、可见光和文石饱和度等物理和化学因子, 是决定珊瑚存活并成礁的关键因子。其他因子, 如水文动态条件(波浪、海流、地形、风暴频发

\* 广西重点研发计划项目(桂科 AB19245045)和北海市科技计划项目(北科合 201884027)资助。

#### 【作者简介】

周浩郎(1962—), 男, 研究员, 主要从事海洋生物多样性研究, E-mail: zhouhaolang@sina.com。

#### 【\*\*通信作者】

#### 【引用本文】

周浩郎, 王欣, 梁文. 涠洲岛珊瑚礁特点、演变及保护与修复对策的思考[J]. 广西科学院学报, 2020, 36(3): 228-236.

ZHOU H L, WANG X, LIANG W. Reflections on the Characteristics, Evolution and Protection and Rehabilitation Strategies of the Coral Reefs at Weizhou Island [J]. Journal of Guangxi Academy of Sciences, 2020, 36(3): 228-236.

等)和生物变量(幼体来源、多样性、疾病等),通常只作用于珊瑚礁如何分布和发育<sup>[1]</sup>。

约7 000年前,涠洲岛珊瑚礁随末次海侵形成,至今仍然存在<sup>[2,3]</sup>。在一定时间和空间尺度上,相对于珊瑚的环境限值,涠洲岛海域的相关理化因子表现出边缘性,甚至超出阈值<sup>[1]</sup>,如最低水温较低(1959—2001年月平均最低海表面温度SST均值为17.3℃<sup>[4]</sup>),水体透明度通常不高(一般小于10 m,通常在2.6—6.0 m<sup>[5]</sup>),但仍满足珊瑚存活、生长和成礁所需。1960—2001年,涠洲岛SST年平均值为24.6℃<sup>[4]</sup>,盐度平均值为32.1<sup>[6]</sup>,营养盐状况符合《海水水质标准》(GB 3097—1997)的一类水质标准<sup>[7,8]</sup>。因已存在几千年,涠洲岛珊瑚礁可视为适应边缘条件的正常珊瑚礁。

涠洲岛海水可见光弱,造成珊瑚分布范围大致囿于5 m等深线以浅的海区<sup>[9]</sup>。珊瑚分布垂直空间狭窄,必然加剧珊瑚的空间竞争,导致珊瑚分层分布现象不似热带珊瑚礁那么明显。

北部湾内的造礁石珊瑚有190种,种类组成特点近似于泰国湾,共有种占两湾所有种的71.7%<sup>[10]</sup>,概因2个海湾的水文地质条件相似,即海水较浅,水体营养化和浊度较高,且海底黏土沉积。同在印度-太平洋地区的印度-波利尼西亚区(Indo-Polynesia Province),两湾珊瑚群落中,滨珊瑚科和蜂巢珊瑚科占优势,并构成珊瑚礁的架构。以滨珊瑚(*Porites*)和蜂巢珊瑚(*Favia*)而非鹿角珊瑚(*Acropora*)占优势的特点,使得北部湾珊瑚礁极为独特<sup>[11]</sup>。北部湾造礁石珊瑚种类丰度因地而异,据记录,三亚有14科29属80种<sup>[12]</sup>,三亚鹿回头岸段有13科24属69种<sup>[13]</sup>,海南岛西北部(临高)有12科20属50种<sup>[14]</sup>,徐闻有9科25属57种<sup>[15]</sup>,涠洲岛有10科22属46种和9个未定种<sup>[9]</sup>,越南下龙湾群岛有41属125种<sup>[16]</sup>。

珊瑚种类在丰度最高的珊瑚三角(Coral Triangle)超过500种,其中印尼拉贾安帕(Raja Ampat)乌头半岛有553种<sup>[17]</sup>,越南全域有376种<sup>[18]</sup>(越南南部265种,越南中部219种)。南海造礁石珊瑚种类丰度自南向北减少,反映了边缘性条件的限制。北部湾属于越南北部生态区,其珊瑚分布格局反映了理化因子的协同影响,包括水温、海流、沉积作用等,这在越南下龙湾群岛也有所体现,即岛屿间沉积差异和地理距离越小,珊瑚种类组成就越相似,沉积物的影响就越显著<sup>[10]</sup>。

南海诸岛的一些珊瑚种类,如柱状珊瑚(*Stylopora* sp.)和排孔珊瑚(*Seriatopora* sp.),未曾见于北部湾;杯形珊瑚(*Pocillopora* sp.)可见于海南岛,却未见于雷州半岛。南海诸岛珊瑚种类更多,证明北部湾珊瑚源自南海诸岛<sup>[19]</sup>。

## 1.2 涠洲岛珊瑚礁为孤立分布区

相比徐闻,涠洲岛珊瑚群落与海南岛南部更相似。依据海流模式,可推测珊瑚幼体扩散路径是自西沙群岛,经由北部湾越南沿岸,先至广西而后至广东<sup>[20]</sup>,但不足以断定当前的北部湾造礁石珊瑚分布格局由此而成,因为珊瑚分布不仅取决于幼体扩散,还取决于其他诸多因素,如幼体寿命长短和活力强弱、幼体遭遇基底概率高低、幼体附着和变态的诱因存在与否、幼体附着后成活率高低等。

涠洲岛珊瑚随海侵殖生并繁茂,由于海水上升是渐进过程,可推断珊瑚是由南海随海水上升连续殖生而来,而非北部湾形成后靠海流扩散而来。海水的上升使北部湾由浅变深,原来应该生长珊瑚的湾底,逐渐成为平均水深40 m的海底,且黏土沉积,不再适合珊瑚生长,珊瑚便选择北部湾大陆和岛屿沿岸的浅海区域继续繁衍。涠洲岛的珊瑚也逐渐聚拢,随后被大海分隔,远离其他珊瑚礁分布区上百千米。涠洲岛的珊瑚是否仍与其他珊瑚分布区存在生态连通尚不得而知。

既存在于约7 000年前,也存在于3 100年前<sup>[21]</sup>,涠洲岛的珊瑚是否繁衍伊始至今未曾中断尚无定论,但有可能。涠洲岛胶结石化的海滩岩中,生物碎屑含量占5%—50%,其中以珊瑚为主,且主要是鹿角珊瑚<sup>[22]</sup>。20多年前,涠洲岛的鹿角珊瑚仍然繁茂<sup>[23]</sup>,与越南白龙尾岛类似,枝状和匍匐状的鹿角珊瑚和蔷薇珊瑚(*Montipora* sp.)聚生成片<sup>[24]</sup>(图1、

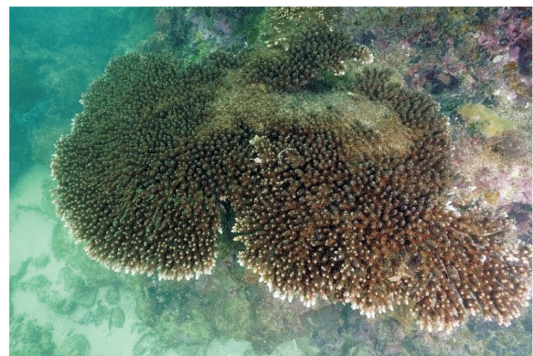


图1 涠洲岛的风信子鹿角珊瑚

Fig. 1 *Acropora hyacinthus* at Weizhou Island

图 2)。可见,在不同时期,涠洲岛枝状珊瑚皆曾繁茂的特点类似。

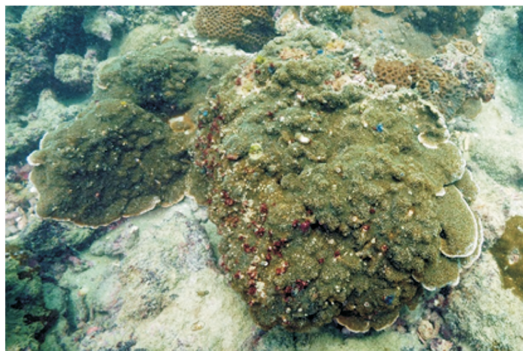


图 2 涠洲岛的浅窝蔷薇珊瑚

Fig. 2 *Montipora foveolata* at Weizhou Island

因远离其他珊瑚礁,涠洲岛珊瑚的繁衍更可能是依赖自身幼体补充的内生性方式,而非依赖外源幼体扩散的外生性方式。因为外生性繁衍的概率很低,尽管珊瑚幼体寿命足够长,可使其漂至近千千米以外<sup>[25]</sup>。珊瑚幼体寿命最高可超过 200 d,诞生初期活力最强,倾向于在此阶段就地附着。漂浮阶段的珊瑚幼体持续死亡,活力日衰,百日之后能量储备趋尽,死亡率飙升。因此,幼体漂流时间越久,附着新生概率越低,相应尺度上的生态连通性也就越低。很多珊瑚分布广阔,却在集合种群尺度上遗传结构高度一致,其原因正在于此<sup>[26]</sup>。

### 1.3 涠洲岛珊瑚礁曾经繁茂

面积约 25 km<sup>2</sup> 的涠洲岛<sup>[27,28]</sup>,岛屿四周地形地貌、水文动力等环境条件各异,导致不同岸段岸礁的发育程度和珊瑚群落不同:北岸发育最好,东岸和西南岸次之,而西岸和南湾内不成礁。1980 年代中期,珊瑚生长带以 4—8 m 深度分界,上部宽 40—350 m,下部宽 20—300 m。上部优势属为块状蜂巢珊瑚、菊花珊瑚(*Goniastrea*)、扁脑珊瑚(*Platygyra*)等,局部为匍匐状和枝状的鹿角珊瑚,仅在东北岸为叶片状牡丹珊瑚(*Pavona*),礁坪上的活珊瑚长势最好,盖度 20%—80%。下部坡度较大,优势属为匍匐状和枝状鹿角珊瑚,其次为块状蜂巢珊瑚、菊花珊瑚和刺星珊瑚(*Cyphastrea*)等。东北岸为叶片状牡丹珊瑚,直径 1—3 m,礁坪上活珊瑚群体自岸向海增加,有枝状和匍匐状鹿角珊瑚、枝状蔷薇珊瑚以及块状滨珊瑚、菊花珊瑚、蜂巢珊瑚等。西南礁坪特征明显,枝状鹿角珊瑚和蔷薇珊瑚密集生长,高 60—90 cm,盖度达 90%<sup>[21]</sup>。

## 2 涠洲岛珊瑚礁的变化

### 2.1 涠洲岛珊瑚礁退化明显

1960 年代以来,历次鉴定并记录的涠洲岛造礁石珊瑚种数为 14—48<sup>[9,29-31]</sup>,累计记录 13 科 34 属 82 种<sup>[32]</sup>。历次全面调查都能记录约 50 种,但观察到鹿角珊瑚的概率明显趋降。堆积海底的鹿角珊瑚残枝表明,涠洲岛曾发生鹿角珊瑚大量死亡的异常现象。引起珊瑚死亡的异常天气有 1998 年的厄尔尼诺现象和 2008 年 1—2 月的极低温气候。厄尔尼诺现象导致涠洲岛月平均海面温度大于 31.1℃,造成部分造礁石珊瑚白化死亡<sup>[28]</sup>;极低温气候导致平均海面温度连续 8 d 低于 14℃,足以造成造礁石珊瑚尤其是鹿角珊瑚死亡<sup>[33,34]</sup>。

涠洲岛珊瑚礁难免受人为影响,包括沉积作用、污水污染、物理干扰、珊瑚采集、旅游等。已对涠洲岛珊瑚造成影响甚至损害的行为有工程引起的持久强沉积作用,工程、锚泊、盗采珊瑚的直接物理干扰和损害,工业污染、养殖污染及城镇污水污染的局部影响等。首当其冲的是鹿角珊瑚之类的枝状珊瑚。相比扁脑珊瑚和石芝珊瑚在内的强壮珊瑚(Robust Corals),诸如鹿角珊瑚等枝状珊瑚在内的复杂珊瑚(Complex Corals)不具备遗传生理优势,与生俱来便缺乏适应变化的更强能力<sup>[35]</sup>,即便超出珊瑚耐受阈值的环境变化偶然而短暂也足以毁灭珊瑚。鹿角珊瑚等枝状珊瑚,难耐诸多环境变化的协同效应和干扰,因而大量消亡,致使鹿角珊瑚优势丧失,复杂珊瑚结构解构,覆盖礁坪景观不再,珊瑚礁退回演替的初级阶段。

涠洲岛珊瑚礁的退化还反映在珊瑚群落结构的变化上,其优势类群多属于块状珊瑚,如西南的滨珊瑚和牡丹珊瑚,正西的滨珊瑚、角蜂巢珊瑚、扁脑珊瑚,西北的角蜂巢珊瑚、滨珊瑚、蔷薇珊瑚,正北的角蜂巢珊瑚、蜂巢珊瑚,东北的角蜂巢珊瑚、蔷薇珊瑚、牡丹珊瑚,正东的角蜂巢珊瑚、蔷薇珊瑚<sup>[9]</sup>。虽然这些珊瑚类群占优势是北部湾珊瑚礁的特点,但鹿角珊瑚优势不再以及活造礁石珊瑚盖度降低,皆表明涠洲岛珊瑚礁已发生退化。

近 20 年来,涠洲岛活造礁石珊瑚盖度持续下降,1980 年代中期为 20%—80%<sup>[21]</sup>,2001 年为 50%—60%<sup>[36]</sup>,2005 年为 33.2%—35.3%<sup>[31]</sup>,2007 年为 8.45%—25.30%<sup>[37]</sup>,2015 年深水区为 6.04%—17.37%(平均 6.02%)<sup>[38]</sup>。



## 2.2 涠洲岛珊瑚礁生物多样性退化严重

珊瑚礁海洋生物多样性也表现出明显的退化现象。2001年来,年度珊瑚礁健康调查发现,珊瑚礁健康指标种类和数量稀少<sup>[39]</sup>。常见的鱼类多为斑刻新雀鲷(*Neopomacentrus bankieri*) (图3)、尾斑光鳃鱼(*Chromis notata*)、四线天竺鲷(*Apogon quadrfasciatus*)、线尾锥齿鲷(*Pentapus setosus*)、五带豆娘鱼(*Abudefduf vaigiensis*)等小型鱼类;软体类有阿文绶贝(*Cypraea arabica*)、马蹄螺(*Trochus* spp.)、江珧(*Atrina* spp.)、密鳞牡蛎(*Ostrea denselamellosa*)、珍珠贝(*Pteria* sp.);棘皮类有方柱翼手参(*Pentacta quadrangularis*)、海百合(*Metacrinus* spp.)、玉足海参(*Holothuria leucospilota*)、锚参(*Synapta maculata*);腔肠动物有海葵、柳珊瑚、软珊瑚;多毛类有缨鳃虫;扁形动物有黄点海扁虫(*Thysanozoon nigropapillosum*);多孔动物有桶状海绵(*Xestospongia muta*) (图4);被囊动物有海鞘。藻类有绿藻的总状蕨藻(*Caulerpa racemosa*)、红藻的珊瑚藻(*Corallina* sp.)和江蓠(*Gracilaria* sp.)以及褐藻的马尾藻(*Sargassum* spp.)、褐舌藻(*Spatoglossum pacificum*)等。经济价值颇高的花刺参(*Stichopus variegatus*)近乎绝迹,鳃棘鲈(*Plectropomus* spp.)、九棘鲈(*Cephalopholis* spp.)、裸胸鳝(*Gymnothorax* spp.)等名贵海产数量锐减,鹦嘴鱼(Scaridae科和Labridae科中鱼类)难得一见。这些变化既是珊瑚礁退化的相伴现象,也是过度捕捞的必然结果。作为鱼类庇护所的珊瑚和其他资源的丧失,极可能造成若干珊瑚鱼类衰竭,它们或以珊瑚组织为食,或钟爱在珊瑚中繁衍,或与活珊瑚生死相依。



图3 涠洲岛的斑刻新雀鲷

Fig. 3 *Neopomacentrus bankieri* at Weizhou Island



图4 涠洲岛的桶状海绵

Fig. 4 *Xestospongia muta* at Weizhou Island

## 2.3 涠洲岛珊瑚礁复苏困难重重

曾覆盖基底珊瑚被其他生物取代,如藻皮(Turfs)和/或附石藻基(Epilithic Algae Matrix, EAM)和大型海藻等。长高变密的藻皮会阻碍珊瑚附着与补充<sup>[40]</sup>,但被植食性珊瑚鱼大量啃食后,其效应变弱甚至不再存在<sup>[41]</sup>。藻皮的多寡与附着珊瑚幼体的多寡呈显著负相关关系。虽然藻类的生长潜势取决于环境中营养水平,但其组成和生长的空间格局严重受制于被摄食、干扰以及与珊瑚竞争的格局<sup>[42]</sup>。

功能性植食性鱼类的减少和消失,不利于涠洲岛珊瑚礁从衰退中恢复。植食者摄食活动锐减或细微沉积物骤然输入会加速沉积和耗氧,反过来又可能妨碍植食者寻食藻类<sup>[43]</sup>。如果沉积物历久不散,就会排斥植食者并妨碍珊瑚幼体附着<sup>[41]</sup>,严重削弱珊瑚礁恢复力。近年观察的涠洲岛造礁石珊瑚补充量不足1个/m<sup>2</sup>,反映珊瑚礁自然恢复能力弱。近10年来,尽管未再发生珊瑚异常死亡,但决定珊瑚礁恢复力的关键因素未见改善,如功能性植食性鱼类。珊瑚礁复苏困难重重。

从生态和地质两方面的标准而言,最严格意义上的珊瑚礁完全恢复,是指原有珊瑚礁多种属性的再现,包括礁体的多样性、珊瑚群体生长形态(即便不考虑种类)的混杂性、珊瑚大小频率分布、珊瑚结构覆盖范围、珊瑚结构复杂性<sup>[44]</sup>。这些属性的恢复比珊瑚盖度的恢复时间要长得得多。一个生长缓慢的珊瑚种群(如滨珊瑚和其他块状珊瑚)局部受损后,在原来生境上珊瑚大小频率分布的恢复,可能需要一个世纪甚至更长时间<sup>[45,46]</sup>,而珊瑚盖度的恢复只需10—20年<sup>[47]</sup>。可以断言,即使涠洲岛珊瑚礁出现恢复并持续,完全恢复的过程仍将极其漫长。



### 3 涠洲岛珊瑚礁的保护与修复

#### 3.1 涠洲岛珊瑚礁保护刻不容缓

2013年1月7日,涠洲岛珊瑚礁国家级海洋公园获批建立,标志着珊瑚礁的管理纳入国家海洋保护体系。涠洲岛、斜阳岛珊瑚礁分布面积34.27 km<sup>2</sup>,海洋公园面积25.15 km<sup>2</sup>(公园内的珊瑚礁分布面积10.80 km<sup>2</sup>)。

科学管理珊瑚礁,必须了解珊瑚礁的特点、历史、结构和过程,还需面对如何解读珊瑚礁过往和预测其未来的不确定性<sup>[48]</sup>。仿真分析表明,即使环境条件保持不变,但如果全球气候持续变暖,涠洲岛活造礁石珊瑚盖度也会从2020年的10%左右逐渐降低,直至2120年彻底归零<sup>[49]</sup>。百年后的珊瑚礁结局显然不取决于预测,而取决于珊瑚和人类的选择。人类世(Anthropocene)的珊瑚礁不会像过去那样,演变完全由自然因素所驱动,还必然有社会经济和文化驱动力。

涠洲岛珊瑚礁国家级海洋公园的建立,反映了保护珊瑚礁的政治意愿,明确了维持珊瑚礁的长远目标,但能否实现目标取决于具体的行动。当务之急是消除人为压力,遏制珊瑚礁的退化并促进其恢复。毋庸置疑,人类发展进步的持续动力有赖于自然资源的利用和消耗。自然资源的高效利用,既非杀鸡取卵,也非竭泽而渔,而是取之有道,用之有度,持之以恒。维持涠洲岛珊瑚礁,首要任务是保护现有珊瑚不再减少,并尽快恢复能够影响珊瑚礁进程和功能的生物类群,尤其是功能性植食性鱼类。

#### 3.2 珊瑚种源和珊瑚礁结构复杂性是涠洲岛珊瑚礁自然修复的必要条件

现存造礁石珊瑚是涠洲岛珊瑚礁的宝贵种源,是珊瑚延续的关键,珊瑚补充量与珊瑚盖度正相关,因此,需全面禁止破坏海洋公园内外的造礁石珊瑚的活动,无论是直接的还是间接的。涠洲岛澄黄滨珊瑚(*Porites lutea*)优势仍在,平均年龄为21.44 a,其中84.34%的澄黄滨珊瑚年龄低于30 a<sup>[38]</sup>,说明珊瑚种源越多,繁殖和补充就越旺盛。另外,珊瑚礁结构的复杂性也至关重要,因为相比海流速度,在水平方向和垂直方向上,珊瑚幼体游动速度需分别低1—4个量级和1—3量级,没有复杂微构造引起的紊流和漩涡,即便在平潮时海流平缓的条件下,珊瑚幼体也不能自主游向基底并附着。此类微小尺度的构造,有助于向基底输送珊瑚幼体,促进珊瑚幼体附着,从而帮

助珊瑚恢复。更大尺度上的结构复杂性,同样可造成紊流,当海水流过珊瑚礁体时,水体中的珊瑚幼体可被滞留。因此,保持大小尺度上珊瑚礁结构的复杂性,有助于珊瑚的恢复<sup>[50]</sup>。

#### 3.3 功能性植食性珊瑚礁鱼类的存在是涠洲岛珊瑚礁修复的关键

功能性植食性鱼类是珊瑚赢得竞争的关键。在印度-太平洋珊瑚礁中,刺尾鱼丰度最高。双斑刺尾鱼(*A. nigrofuscus*)为植食性鱼类,可用其利刃状的牙齿割食礁石上附生的丝状藻丛。栉齿刺尾鱼(*Ctenochaetus striatus*)为屑食性鱼类,可用其长齿梳食附于EAM间的沉积物和碎屑并刮伤藻丛<sup>[51-53]</sup>。栉齿刺尾鱼的咬合频率高达30次/分钟,能高效去除大量藻皮并严重影响EAM动态<sup>[54,55]</sup>。鹦嘴鱼约有100种<sup>[56]</sup>,其咽颌进化完美,能轻易磨碎钙化物<sup>[57]</sup>,还具有口齿融合形成的喙状颌<sup>[58]</sup>,咬合力极强,咬合次数最高可达每分钟40次<sup>[58]</sup>,能消费几乎所有的珊瑚礁底质,包括珊瑚群体、覆盖死珊瑚的藻皮、壳状藻、钙化藻、非生物源的石头、大型藻和海草等<sup>[59]</sup>。基于颌的骨骼和肌肉,鹦嘴鱼分为3种摄食模式或3类功能群,即植食者、刨食者和掘食者<sup>[57]</sup>。据估计,鹦嘴鱼所除掉的珊瑚礁中的生物量,占植食性鱼群所除掉总量的40%—98%。鹦嘴鱼的摄食率,按珊瑚礁表面积计算,达每年250%—1700%,最高者相当于每平方米的珊瑚礁每18 d就被鹦嘴鱼啃过一遍<sup>[59,60]</sup>。一尾鹦嘴鱼1年所刨食及排泄的珊瑚沙,高达9 kg/m<sup>2</sup> 碳酸钙的生物腐蚀量,是开辟珊瑚生存空间的“清道夫”。鹦嘴鱼还是大型钙化藻,如仙人掌藻(*Halimeda* spp.)、叉节藻(*Amphiroa* spp.)和乳节藻(*Galaxaura* spp.)等的首要消费者<sup>[61,62]</sup>。被鹦嘴鱼清除过的空间会保持无藻类也无沉积物的状态约8 d,为珊瑚和其他附着生物提供潜在的附着地点<sup>[63]</sup>。鹦嘴鱼的存在有利于珊瑚幼体附着、成活和生长<sup>[64]</sup>,其功效因其种类、数量、大小、生物量不同而有所差异。在中新世阶段,现代石珊瑚和优势珊瑚鱼类同时快速分化,从而形成了石珊瑚与珊瑚鱼之间紧密的生态联系,珊瑚和鹦嘴鱼协同演化,形成互利关系,一荣俱荣,一损俱损。

实施长期禁渔才能恢复涠洲岛鹦嘴鱼资源。在无人干扰的环境中,珊瑚与鹦嘴鱼的数量变动呈现此消彼长的关系,达成动态平衡。以目前涠洲岛珊瑚盖度下降的状况而言,如无人影响,鹦嘴鱼数量应该增加。但是,由于长期过度捕捞,鹦嘴鱼已难得一

见。唯有彻底禁渔, 鹦嘴鱼方能休养生息, 有望恢复。珊瑚礁的自然修复需要鹦嘴鱼群落的存在, 并形成一定的数量。唯如此, 方可期待涠洲岛珊瑚礁重获其固有和应有的恢复力, 并在其驱动下逐渐恢复、重现曾经的珊瑚繁茂景观。

### 3.4 涠洲岛珊瑚礁恢复应遵循的社会-生态模式

珊瑚礁的恢复, 除顺其自然外, 还可通过人为干预得以实现。虽然人为恢复可进一步成就珊瑚礁的保护, 但相比于维护原有的生境, 总是次要的<sup>[65]</sup>。生态恢复是协助已退化、损害或破坏的生态系统复原的过程, 可分为4种模式或4个层面。恢复(Restoration), 即将退化的生态系统尽可能地回复到原有的状态; 修复(Rehabilitation), 即部分或完全(近乎不可能)取代已损失的生态系统的结构或功能, 或者替代原有生态系统的质量或特点, 只要它们的社会、经济或生态价值优于陷入干扰或退化状态的原有系统; 修补(Remediation), 即修补生态系统的损伤; 舒缓(Mitigation), 即减少或控制不利的环境效应, 通过包括生境的替代、恢复和建立等措施, 补偿环境所遭受的损害<sup>[66]</sup>。

珊瑚礁的人为修复, 理论和实践已证明其科学可行性。已开展实践且不乏成功范例的是珊瑚移植(Coral Transplantation), 即利用珊瑚无性繁殖方式实现珊瑚断枝重生并成长。相比珊瑚体上珊瑚的分枝, 珊瑚断枝生长得更快<sup>[67]</sup>, 是增量生长。移植的珊瑚断枝成活率可以很高, 如细柱滨珊瑚(*P. cylindrica*)移植20个月后的成活率为80%—100%<sup>[68]</sup>。涠洲岛珊瑚断枝培养结果显示, 一年成活率: 风信子鹿角珊瑚(*A. hyacinthus*)为20%—80%, 粗野鹿角珊瑚(*A. humilis*)为25%—49%<sup>[69]</sup>(图5)。在礁石上进行珊瑚移植, 是恢复受损珊瑚群落的良方。充足的



图5 涠洲岛上利用珊瑚断枝培植的鹿角珊瑚

Fig. 5 *Acropora* spp. transplanted with coral fragments at Weizhou Island

可见光可促进珊瑚移植体生长, 稳定、低能的海况也有助于移植体附着、成活和融合<sup>[70]</sup>。

由于涠洲岛珊瑚礁已退化, 恢复力弱, 自然修复不足, 且远离其他珊瑚幼体源头, 与邻近珊瑚礁生态关联水平低, 所以自然修复过程必然缓慢得多<sup>[71]</sup>。珊瑚礁的人为修复, 在自然修复能力丧失后方宜进行。应区划为先, 依据珊瑚礁现状和生态、环境条件, 在水平和垂直方向上作出空间安排, 并考虑时间维度。修复的目的在于实现珊瑚礁结构多样化, 生态功能和服务最大化。其次, 经济须可行, 如果经济上不合算, 就违背了修复的初衷。珊瑚礁修复应主流化, 而非脱离社会经济发展主流的孤立行动和计划, 并要使利益相关者受益。例如, 可综合考虑珊瑚礁修复、人工鱼礁建设、防浪潜构设置等, 谋求生态修复、资源增殖、环境改善等多方面的增益, 营造多方共赢的局面, 追求生态文明建设目标引导下的涠洲岛高质量可持续发展。

实现人类世的珊瑚礁可持续需要发展社会-生态宏观生态学, 在珊瑚礁生态学领域内开辟一条崭新的道路。在人类世, 跨越时空的珊瑚礁生态系统所面临的影响, 不仅源自生物物理驱动力, 还有社会经济及文化驱动力, 它们之间的相互作用效应需要加以确定。现存珊瑚礁模式的恢复力和强度也需要进行测试, 以探索该模式能否应对当今珊瑚礁的动态。如果不能, 那么就发展新的珊瑚礁社会-生态模式<sup>[72]</sup>。

### 参考文献

- [1] KLEYPAS J A, MCMANUS J W, MENEZ L A B. Environmental limits to coral reef development: Where do we draw the line? [J]. *American Zoologist*, 1999, 39(1): 146-159.
- [2] 姚衍桃, HARFF J, MEYER M, 等. 南海西北部末次盛冰期以来的古海岸线重建[J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2009, 39(6): 753-762.
- [3] 亓发庆, 黎广钊, 孙永福, 等. 北部湾涠洲岛地貌的基本特征[J]. *海洋科学进展*, 2003, 21(1): 41-50.
- [4] 余克服, 蒋明星, 程志强, 等. 涠洲岛 42 年来海面温度变化及其对珊瑚礁的影响[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(3): 506-510.
- [5] 黎广钊, 梁文, 农华琼, 等. 涠洲岛珊瑚礁生态环境条件初步研究[J]. *广西科学*, 2004, 11(4): 379-384.
- [6] 汤超莲, 周雄, 郑兆勇, 等. 未来海平面上升对涠洲岛珊瑚礁的可能影响[J]. *热带地理*, 2013, 33(2): 120-123.
- [7] 韩丽君, 郑新庆, 蓝文陆, 等. 近 10 年涠洲岛周边海域表层海水营养盐含量变化特征[J]. *应用海洋学学报*,



- 2015, 34(1): 65-72.
- [8] 陈继艺, 陈旭阳, 张春华, 等. 涠洲岛珊瑚礁海洋公园海域营养盐含量变化及富营养化研究[J]. 海洋湖沼通报, 2018, 6: 166-174.
- [9] 梁文, 张春华, 叶祖超, 等. 广西涠洲岛造礁珊瑚种群结构的分布[J]. 生态学报, 2011, 31(1): 39-46.
- [10] LATYPOV Y Y. The study of species richness in coral communities of Vietnam [J]. *Environment and Ecology Research*, 2017, 5(3): 204-211.
- [11] LATYPOV Y Y. Reef-building corals and reefs of Vietnam: 2. the Gulf of Tonkin [J]. *Russian Journal of Marine Biology*, 2003, 29(11): 34-45.
- [12] 练健生, 黄晖, 黄良民, 等. 三亚珊瑚礁及其生物多样性[M]. 北京: 海洋出版社, 2010.
- [13] 赵美霞, 余克服, 张乔民, 等. 三亚鹿回头石珊瑚物种多样性的空间分布[J]. 生态学报, 2008, 28(4): 1419-1428.
- [14] 黄晖, 尤丰, 练健生, 等. 海南岛西北部海域珊瑚礁造礁石珊瑚种类组成与分布[J]. 海洋科学, 2012, 36(9): 64-74.
- [15] 黄晖, 张浴阳, 练健生, 等. 徐闻西岸造礁石珊瑚的组成及空间分布[J]. 生物多样性, 2011, 19(5): 505-510.
- [16] LATYPOV Y Y, DAUTOVA T N. Species composition of corals in silty shallows of the Bai Thu Long Archipelago (Gulf of Tonkin, South China Sea) [J]. *Russian Journal of Marine Biology*, 2005, 31(S1): S41-S48.
- [17] VERON J E N, DEVANTIER L M, TURAK E, et al. Delineating the Coral Triangle [J]. *Galaxea, Journal of Coral Reef Studies*, 2009, 11(2): 91-100.
- [18] LATYPOV Y Y. Results of thirty years of research on corals and reefs of Vietnam [J]. *Open Journal of Marine Science*, 2016, 6(2): 283-292.
- [19] 邹仁林, 陈友璋. 我国浅水造礁石珊瑚地理分布的初步研究[M]//中国科学院南海海洋研究所. 南海海洋科学集刊: 第4集. 北京: 科学出版社, 1983: 89-96.
- [20] 王道儒, 王华接, 李元超, 等. 雷州半岛珊瑚幼虫补充来源初步研究[J]. 热带海洋学, 2011, 30(2): 26-32.
- [21] 王国忠, 吕炳全, 全松青. 现代碳酸盐和陆源碎屑的混合沉积作用——涠洲岛珊瑚岸礁实例[J]. 石油与天然气地质, 1987, 8(1): 15-25.
- [22] 沙庆安, 李菊英, 王尧. 广西涠洲岛全新世上升海滩沉积及其成岩作用[J]. 沉积学报, 1986, 4(2): 39-46.
- [23] 梁文, 黎广钊, 范航清, 等. 广西涠洲岛珊瑚礁物种多样性研究[J]. 海洋通报, 2010, 29(4): 412-416, 420.
- [24] LATYPOV Y Y. Species composition and structure of coral community of a platform reef at Bach Long Vi Island in the South China Sea [J]. *Russian Journal of Marine Biology*, 2008, 34: 249-253.
- [25] HARRISON P L, BABCOCK R C, BULL G D, et al. Mass spawning in tropical reef corals [J]. *Science*, 1984, 223(4641): 1186-1189.
- [26] GRAHAM E M, BAIRD A H, CONNOLLY S R. Survival dynamics of scleractinian coral larvae and implications for dispersal [J]. *Coral Reefs*, 2008, 7(3): 529-539.
- [27] 刘敬合, 黎广钊, 农华琼. 涠洲岛地貌与第四纪地质特征[J]. 广西科学院学报, 1991, 7(1): 27-36.
- [28] 王敏干, 王丕烈, 麦海莉. 广西北部湾涠洲岛珊瑚初步调查[R]. 南宁: 广西海洋局, 1998.
- [29] 广西壮族自治区海岸带和海涂资源综合调查领导小组. 广西壮族自治区海岸带和海涂资源综合调查报告第四卷 海洋生物[R]. 南宁: 广西壮族自治区海岸带和海涂资源综合调查领导小组, 1986.
- [30] 黄金森, 张元林. 北部湾涠洲岛珊瑚海岸沉积[C]//珊瑚礁论文集——参加碳酸盐比较沉积学学术讨论会, 1986: 21-25.
- [31] 黄晖, 马斌儒, 练健生, 等. 广西涠洲岛海域珊瑚礁现状及其保护策略研究[J]. 热带地理, 2009, 29(4): 307-312, 318.
- [32] 周浩郎, 黎广钊. 涠洲岛珊瑚礁健康评估[J]. 广西科学院学报, 2014, 30(4): 238-247.
- [33] 李淑, 余克服, 施祺, 等. 海南岛鹿回头石珊瑚对高温响应行为的实验研究[J]. 热带地理, 2008, 28(6): 534-539.
- [34] 李淑, 余克服, 施祺, 等. 造礁石珊瑚对低温的耐受能力及响应模式[J]. 应用生态学报, 2009, 20(9): 2289-2295.
- [35] YING H, COOKE I, SPRUNGALA S, et al. Comparative genomics reveals the distinct evolutionary trajectories of the robust and complex coral lineages [J]. *Genome Biology*, 2018, 19(1): 175-199.
- [36] 余克服, 黎广钊, 梁群, 等. 涠洲岛、斜阳岛珊瑚礁自然保护区(拟建)综合考察报告[R]. 南宁: 广西海洋局, 2001.
- [37] 梁文, 黎广钊, 张春华, 等. 20年来涠洲岛珊瑚礁物种多样性演变特征研究[J]. 海洋科学, 2010, 34(12): 78-87.
- [38] 王文欢. 近30年来北部湾涠洲岛造礁石珊瑚群落演变及影响因素[D]. 南宁: 广西大学, 2017.
- [39] 陈刚, 赵美霞, 刘斌, 等. 基于 Reef Check 调查的涠洲岛珊瑚礁生态状况评价[J]. 热带地理, 2016, 36(1): 66-71.
- [40] ARNOLD S N, STENECK R S, MUMBY P J. Running the gauntlet: Inhibitory effects of algal turfs on the

- processes of coral recruitment [J]. Marine Ecology Progress Series, 2010, 414: 91-105.
- [41] BIRRELL C L, MCCOOK L J, WILLIS B L. Effects of algal turfs and sediment on coral settlement [J]. Marine Pollution Bulletin, 2005, 51(1/2/3/4): 408-414.
- [42] LITTLER M M, LITTLER D S. Factors controlling relative dominance of primary producers on biotic reefs [J]. Proceeding of the 5th International Coral Reef Congress, 1985, 5: 35-39.
- [43] GOATLEY C H R, BONALDO R M, FOX R J, et al. Sediments and herbivory as sensitive indicators of coral reef degradation [J]. Ecology and Society, 2016, 21(1): 29-40.
- [44] JOHANNES R E, BETZER S B. Introduction: Marine communities respond differently to pollution in the tropics than at higher latitudes [J]. Elsevier Oceanography Series, 1975, 12: 1-12.
- [45] DONE T J. Simulation of recovery of pre-disturbance size structure in populations of *Porites* spp. damaged by the crown of thorns starfish *Acanthaster planci* [J]. Marine Biology, 1988a, 100: 51-61.
- [46] ENDEAN R, CAMERON A M. Ecocatastrophe on the Great Barrier Reef [J]. Proc 5th Int Coral Reef Symp, 1985, 5: 309-314.
- [47] DONE T J. An assessment of coral reefs in Mauritius [R]. COMARAF Ser Doc 2, 1988b.
- [48] DONE T J. Phase shifts in coral reef communities and their ecological significance [J]. Hydrobiologia, 1992, 247: 121-132.
- [49] 张惠雅, 黄荣永, 余克服. 涠洲岛活珊瑚覆盖率变化的仿真分析[J]. 热带地理, 2019, 39(3): 329-336.
- [50] HATA T, MADIN J S, CUMBO V R, et al. Coral larvae are poor swimmers and require fine-scale reef structure to settle [J]. Science Reports, 2017, 7(1): 1-9. DOI: 10.1038/s41598-017-02402-y.
- [51] TEBBETT S B, GOATLEY C H R, BELLWOOD D R. Clarifying functional roles: Algal removal by the surgeonfishes *Ctenochaetus striatus* and *Acanthurus nigrofuscus* [J]. Coral Reefs, 2017a, 36: 803-813.
- [52] MARSHALL A, MUMBY P J. Revisiting the functional roles of the surgeonfish *Acanthurus nigrofuscus* and *Ctenochaetus striatus* [J]. Coral Reefs, 2012, 31: 1093-1101. DOI: 10.1007/s00338-012-0931-y.
- [53] PURCELL S W, BELLWOOD D R. A functional analysis of food procurement in two surgeonfish species, *Acanthurus nigrofuscus* and *Ctenochaetus striatus* (Acanthuridae) [J]. Environmental Biology of Fishes, 1993, 37: 139-159.
- [54] POLUNIN N V C, HARMELIN-VIVIEN M, GALZIN R. Contrasts in algal food processing among five herbivorous coral-reef fishes [J]. Journal of Fish Biology, 1995, 47(3): 455-465.
- [55] WILSON S K, BELLWOOD D R, CHOAT J H, et al. Detritus in the epilithic algal matrix and its use by coral reef fishes [J]. Oceanography and Marine Biology, 2003, 41: 279-309.
- [56] COMEROS-RAYNAL MT, CHOAT J H, POLIDORO B A, et al. The likelihood of extinction of iconic and dominant herbivores and detritivores of coral reefs: The parrotfishes and surgeonfishes [J]. PLoS One, 2012, 7(7): 1-13. DOI: 10.1371/journal.pone.0039825.
- [57] BELLWOOD D R. A phylogenetic study of the parrotfishes: Family Scaridae (Pisces: Labroidae), with a revision of genera [J]. Records of the Australian Museum Supplement, 1994, 20: 1-86.
- [58] BELLWOOD D R, CHOAT J H. A functional analysis of grazing in parrotfishes (family Scaridae): The ecological implications [J]. Environmental Biology of Fishes, 1990, 28: 189-214.
- [59] HOEY A S, BELLWOOD D R. Cross shelf variation in the role of parrotfishes on the Great Barrier Reef [J]. Coral Reefs, 2008, 27(1): 37-47.
- [60] FOX R J, BELLWOOD D R. Quantifying herbivory across a coral reef depth gradient [J]. Marine Ecology Progress Series, 2007, 339: 49-59.
- [61] MANTYKA C S, BELLWOOD D R. Direct evaluation of macro algal removal by herbivorous reef fishes [J]. Coral Reefs, 2007a, 26: 435-442.
- [62] MANTYKA C S, BELLWOOD D R. Macroalgal grazing selectivity among herbivorous coral reef fishes [J]. Marine Ecology Progress Series, 2007b, 325: 177-185.
- [63] BONALDO, R M, BELLWOOD D R. Dynamics of parrotfish grazing scars [J]. Marine Biology, 2009, 156: 771-777.
- [64] WILLIAMS I D, KINDINGER T L, COUCH C S, et al. Can herbivore management increase the persistence of Indo-pacific coral reefs? [J]. Frontiers in Marine Science, 2019, 6: 1-15. DOI: 10.3389/fmars.2019.00557.
- [65] YOUNG T P. Restoration ecology and conservation biology [J]. Biological Conservation, 2000, 92(1): 73-83.
- [66] EDWARDS A J. Reef rehabilitation manual [M]. Cape Ferguson: Australian Institute of Marine Science, 2010.
- [67] FANG L S, CHEN Y J, CHEN C S. Why do the white tip of stony coral grow so fast without zooxanthella?



- [J]. *Marine Biology*, 1989, 103: 359-363.
- [68] GOMEZ E D, CABAITAN P C, YAP H T, et al. Can coral cover be restored in the absence of natural recruitment and reef recovery? [J]. *Restoration Ecology*, 2014, 22(4): 142-150.
- [69] 王欣, 高霆伟, 陈骁, 等. 涠洲岛园艺式珊瑚苗圃的架设与移植[J]. *广西科学*, 2017, 24(5): 462-467.
- [70] NAVA H, FIGUEROA-CAMACHO A G. Rehabilitation of damaged reefs: Outcome of the use of recently broken coral fragments and healed coral fragments of pocilloporid corals on rocky boulders [J]. *Marine Ecology*, 2017, 38(5): e12456. DOI: 10.1111/maec.12456.
- [71] PEARSON R G. Recovery and recolonization of coral reefs [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1981, 4(1): 105-122.
- [72] WILLIAMS G J, GRAHAM N A J, JOUFFRAY J B, et al. Coral reef ecology in the Anthropocene [J]. *Functional Ecology*, 2019, 33: 1014-1022.

---

## Reflections on the Characteristics, Evolution and Protection and Rehabilitation Strategies of the Coral Reefs at Weizhou Island

ZHOU Haolang, WANG Xin, LIANG Wen

(Guangxi Key Lab of Mangrove Conservation and Utilization, Guangxi Mangrove Research Center, Guangxi Academy of Sciences, Beihai, Guangxi, 536000, China)

**Abstract:** The coral reefs at Weizhou Island were first formed in the last marine transgression about 7 000 years ago. It is a typical marginal coral reefs that occurred at the most northern edge of coral reef distribution area along the coast of Mainland China. It lacks coral ecological connectivity with other coral reefs in the region, and its characteristics are different from tropical coral reefs. That is, mass corals dominate. For more than 20 years, coral reefs at Weizhou Island have continued to degenerate with mass mortality of branching corals, and the coverage of stony corals has dropped sharply. The number of indicator organisms that reflects the good condition of the coral reefs, such as parrotfish and butterfly fish, has remarkably reduced. Although there was no abnormal mortality of corals at Weizhou Island in the last ten years, the natural rehabilitation of coral reefs were not obvious, indicating insufficient coral replenishment. The lack of functional herbivorous fishes indicated that the resilience of coral reefs was weak. The establishment of Weizhou Island Coral Reefs National Marine Park reflected the political will of conserving the coral reefs at Weizhou Island. Only by restoring the number of functional herbivorous fish such as parrotfish, can the inherent resilience of coral reefs be restored and enhanced, thereby promoting the natural recovery of coral reefs at Weizhou Island. Artificial rehabilitation can take the method of coral fragment transplantation, and build a coral reef that can respond to human interference and continuous evolution of corals with the goal of achieving ecological, economic and social benefits

**Key words:** Weizhou Island, coral reefs, characteristics, change, conservation, rehabilitation, strategy