



热带海洋学报  
*Journal of Tropical Oceanography*  
ISSN 1009-5470, CN 44-1500/P

## 《热带海洋学报》网络首发论文

题目： 聚焦退化珊瑚礁关键造礁石珊瑚类群的补充与恢复——以三亚西岛为例  
作者： 梁宇娴，刘骋跃，俞晓磊，张浴阳，练文科，陈伦举，黄晖  
网络首发日期： 2023-11-03  
引用格式： 梁宇娴，刘骋跃，俞晓磊，张浴阳，练文科，陈伦举，黄晖. 聚焦退化珊瑚礁关键造礁石珊瑚类群的补充与恢复——以三亚西岛为例[J/OL]. 热带海洋学报. <https://link.cnki.net/urlid/44.1500.P.20231102.1520.004>



**网络首发：**在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认：**纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

# 聚焦退化珊瑚礁关键造礁石珊瑚类群的补充与恢复—以三亚西岛为例

梁宇娴<sup>1, 2, 3</sup>, 刘骋跃<sup>1, 2, 3</sup>, 俞晓磊<sup>1, 2, 3</sup>, 张浴阳<sup>1, 2, 3</sup>, 练文科<sup>1</sup>, 陈伦举<sup>1</sup>, 黄晖<sup>1, 2, 3</sup>

1. 中国科学院热带海洋生物资源与生态重点实验室(中国科学院南海海洋研究所), 广东 广州 510301;
2. 三亚海洋科学综合(联合)实验室; 海南省热带海洋生物技术重点实验室, 三亚海洋生态环境与工程研究院, 海南 三亚 572000;
3. 海南三亚海洋生态系统国家野外科学观测研究站; 中国科学院海南热带海洋生物实验站, 海南 三亚 572000

**摘要:** 在全球变化和人类活动不断加剧的背景下, 海南三亚西岛的珊瑚礁正处于退化状态。造礁石珊瑚群落以团块状为主, 分枝状珊瑚严重退化, 对环境敏感的鹿角珊瑚属占比降低, 且数量、种类明显减少。基于此, 本研究聚焦关键物种—鹿角珊瑚属(*Acropora* sp.)的补充和恢复, 利用无性繁殖的珊瑚开展珊瑚礁生态修复试验。期望通过补充鹿角珊瑚属种类和数量, 改善西岛造礁石珊瑚群落, 促进受损珊瑚礁生态系统的功能恢复, 维护西岛及周边海域生态稳定, 本研究首先通过苗圃培育技术, 利用珊瑚树形苗圃和浮床式苗圃共培育鹿角珊瑚种苗 2500 株, 经 6 个月的培育后, 获得 6221 株大小为(13.1 ± 1.7)cm 的珊瑚用于底播移植; 随后采用铆钉法将上述珊瑚移植至西岛近岸原生礁石。结果表明: 移植 8 个月后, 移植珊瑚的存活率高达 98%, 珊瑚平均大小为(19 ± 0.17)cm, 平均生长速率为(0.73 ± 0.17)厘米·(月·株)<sup>-1</sup>, 修复区活造礁石珊瑚覆盖率提高至 43.83%, 其中鹿角珊瑚属的覆盖率为 10.55%; 移植 20 个月后, 移植珊瑚的存活率为 93%, 珊瑚平均大小为(26.2 ± 5.7)cm, 平均生长速率为(0.60 ± 0.28)厘米·(月·株)<sup>-1</sup>, 修复区活造礁石珊瑚覆盖率提高至 61.49%, 其中鹿角珊瑚属的覆盖率为 15.93%。总体来说, 本研究选择的珊瑚种类合适, 采用的珊瑚苗圃培育技术和铆钉法珊瑚底播移植技术可靠, 西岛退化珊瑚礁区鹿角珊瑚恢复效果显著。本研究可为我国典型近岸退化珊瑚礁生态系统的保护和修复提供参考, 并为未来我国珊瑚礁修复技术发展提供理论和技术支撑。

**关键词:** 三亚西岛; 珊瑚礁; 修复; 关键类群; 鹿角珊瑚属

## Focusing on supplementing and restoring degraded coral reefs with key groups of reef-building coral- paradigms in restoration of Xidao Island's coral reef

LIANG Yuxian<sup>1</sup>, LIU Chengyue<sup>1,2,3</sup>, YU Xiaolie<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Yuyang<sup>1,2,3</sup>, LIAN Wenke<sup>1</sup>, CHEN Lunju<sup>1</sup>, HUANGHui<sup>1,2,3</sup>

1. Laboratory of Tropical Marine Bio-resources and Ecology(South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences), Guangzhou 510301, China;
2. CAS-HKUST Sanya Joint Laboratory of Marine Science Research, Key Laboratory of Tropical Marine Biotechnology of Hainan Province, Sanya Institute of Ocean Eco-Environmental Engineering, SCSIO, Sanya 572000, China;
3. Sanya National Marine Ecosystem Research Station; Tropical Marine Biological Research Station in Hainan, Chinese Academy of Sciences, Sanya 572000, China

**Abstract:** Under the context of global change and increasing human activities, the coral reefs of Xidao Island in Sanya, Hainan, are experiencing degradation. The reef community mainly consists of massive coral colonies, with branching corals severely degraded. The proportion, quantity and diversity of the environmentally sensitive *Acropora* sp. have significantly declined. In light of this, this study focuses on the supplementation and restoration of key species (*Acropora* sp.) and conducts coral reef ecological restoration experiments using asexual propagation. The aim is to improve the coral community of Xidao Island by supplementing the *Acropora* coral species and numbers, thereby promoting the functional recovery of the damaged coral reef ecosystem and maintaining ecological stability in the vicinity of Xidao Island. Initially, using coral garden techniques, coral tree nurseries and floating bed nurseries were used to cultivate 2,500 seedlings of *Acropora* sp. corals. After 6 months of cultivation, 6,221 corals with an average size of (13.1±1.7) cm were obtained for outplanting. Subsequently, the corals were transplanted to the nearshore native reef of Xidao Island using rivet method. The results showed that after 8 months of transplantation, the survival

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(41976120, 42276124); 国家重点研发计划项目(2021YFC31005001)

**作者简介:** 梁宇娴(1992年-), 女, 广东省湛江市人, 科研助理, 研究方向为珊瑚礁生态学。email: liangyuxian17@mailsucas.ac.cn

**通信作者:** 黄晖, email: huanghui@scsio.ac.cn

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (41976120, 42276124); National Key Research and Development Program (2021YFC31005001)

**Corresponding author:** HUANG Hui. email: huanghui@scsio.ac.cn

rate of transplanted corals reached 98%. The average size of corals was  $(19\pm 0.17)$  cm, with an average growth rate of  $(0.73\pm 0.17)$  cm/month/colony. The coral cover in the restoration area increased to 43.83%, with *Acropora* sp. corals accounting for 10.55% of the coverage. After 20 months of transplantation, the survival rate of transplanted corals was 93%. The average size of corals was  $(26.2\pm 5.7)$  cm, with an average growth rate of  $(0.60\pm 0.28)$  cm/month/colony. The coral cover in the restoration area increased to 61.49%, with *Acropora* sp. corals accounting for 15.93% of the coverage. Overall, this study demonstrates that the selected coral species, coupled with the coral nursery cultivation and rivet transplantation techniques, are effective in restoring *Acropora* corals in the degraded coral reef areas of Xidao Island. This research can serve as a reference for the protection and restoration of typical nearshore degraded coral reef ecosystems in China, providing theoretical and technical support for the future development of coral reef restoration techniques in the country. This study can serve as a reference for the protection and restoration of typical degraded coastal coral reef ecosystems in China and provide theoretical and technical support for the future development of coral reef restoration technologies in China.

**Key words:** Xidao Island in Sanya; coral reef; restoration, key group; *Acropora* sp.

珊瑚礁是地球上生物多样性及生产力最高的生态系统之一，被认为是海洋中的热带雨林，在海洋生态平衡、渔业资源养护、海洋生物多样性维持、生态旅游观光、海洋药物开发及海岸线保护等方面具有重要价值(Fisher et al, 2015; Brandl et al, 2019; Cox et al, 2021)。造礁石珊瑚作为珊瑚礁生态系统的主要钙化生物之一，是珊瑚礁生态系统重要的框架生物，对于维持珊瑚礁生态系统的生物多样性以及物质循环和能量流动具有决定性作用(Moberg and Folke 1999)。但在近年来，世界范围内的珊瑚礁一方面受到人类活动(如过度捕捞、沿岸开发等)的严重干扰和破坏(Hughes et al, 2017a; Woodhead et al, 2019)，另一方面还受到海水升温 and 酸化等全球气候变化的影响(Hoegh-Guldberg et al, 2008; Hughes et al, 2017b)。

在全球气候变化和人类活动不断加剧双重因素的影响下，我国范围内的珊瑚礁受到海水升温(Li et al, 2012; Qin et al, 2020)、酸化(Liu et al, 2014; Yuan et al, 2018)、污染物(Ding et al, 2019; Yang et al, 2020)等威胁不断增加，珊瑚礁资源遭到严重破坏(Yu, 2012; Hughes et al, 2013)。最近的调查数据显示，我国珊瑚礁的退化趋势没有改变，活造礁石珊瑚覆盖率仍逐年下降，对于我国珊瑚礁生态系统的健康评价结果表明，目前我国珊瑚礁生态系统和造礁石珊瑚群落基本处于“一般”或“差”的状况(黄晖等, 2021)。以海南三亚的珊瑚礁生态系统为例，2018年的调查表明，尽管该区域珊瑚礁群落的自然属性依旧维持，但珊瑚礁群落功能已出现受损，造礁石珊瑚群落退化明显，其具体表现为鹿角珊瑚属物种在群落中的占比出现明显下降(黄晖等, 2021)。

在全球珊瑚礁均退化严重的严峻形势下，利用人工干预的珊瑚礁生态修复方法，是恢复珊瑚

礁生态系统功能的重要手段(Boström-Einarsson et al, 2020)。将造礁石珊瑚的无性增殖技术与底播移植技术相结合的方法是国际上珊瑚礁生态系统人工修复的主流手段，该技术在本世纪初兴起(Lee et al, 2008)，后经一些改良(Omori, 2014)，在近年来被广泛应用。造礁石珊瑚的无性增殖技术利用了其无性繁殖的特性，在避免大量采集野外珊瑚造成对珊瑚供体破坏的基础上，为后续珊瑚底播移植提供了大量种苗(Ishida-Castañeda et al, 2020)。目前造礁石珊瑚的无性增殖手段包括利用浮床、框架等平台的原位增殖手段，和利用人工模拟系统的室内或半原位增殖手段(Omori, 2019)。造礁石珊瑚的底播移植则是将培育出的珊瑚个体通过一定的固定方式移植在珊瑚礁区底质上。目前造礁石珊瑚的底播移植技术包括扦插法、移植钉法、水下胶法和人工礁体法等(Omori, 2019)。利用无性增殖的珊瑚开展珊瑚礁生态修复，在我国也被广泛应用。如李元超等于西沙赵述岛海域投放人工礁基并开展珊瑚移植实验，比较了人工修复区和自然恢复区一年后的修复效果(李元超等, 2014)。张浴阳等于三亚蜈支洲岛底播移植了6000株珊瑚，经过3年的监测，验证了在我国近岸退化珊瑚礁中利用生态修复技术恢复珊瑚礁生态是可行和有效的(张浴阳等, 2021)。

西岛位于三亚市西南部，总面积2.8km<sup>2</sup>。西岛周边海域拥有丰富的珊瑚礁资源，被划入海南三亚国家级珊瑚礁自然保护区。但受到早期的非法开采、过度捕捞，以及近年来的旅游开发和渔业养殖等诸多因素的影响，西岛珊瑚礁生态系统遭到严重破坏，活珊瑚覆盖率持续下降(吴钟解等, 2015)。此外，根据本学科组以及黄建中等人在近年来的调查发现，西岛东部和南部珊瑚礁处于重度退化状态，西岛西部珊瑚礁处

于轻度退化状态, 其退化现状主要由人类活动干扰引起(黄建中 等, 2020)。该研究还发现西岛造礁石珊瑚群落发生了显著变化, 由1966年以佳丽鹿角珊瑚(*Acropora pulchra*)、鼻形鹿角珊瑚(*Acropora nasuta*)、粗糙菊花珊瑚(*Coelastrea aspera*)和角枝蔷薇珊瑚(*Montipora angulata*)等为优势种的健康群落, 转变为以丛生盔形珊瑚单一物种为优势种的不健康群落(邹仁林 等, 1966; 黄建中 等, 2020)。在珊瑚礁健康评价体系中, 鹿角珊瑚属物种因其生态功能更为重要, 且对环境变化更为敏感, 是珊瑚礁及造礁石珊瑚群落健康评价重要指标之一(孙有方 等, 2018)。因此, 鹿角珊瑚等珊瑚在近年来的快速退化, 表明西岛近岸珊瑚礁生态系统结构简单化, 造礁石珊瑚群落功能下降。基于此, 本研究以西岛珊瑚礁退化的严峻现状为背景, 聚焦关

键物种(鹿角珊瑚属)的补充和恢复, 利用无性培植的珊瑚开展珊瑚礁生态修复试验。期望通过补充鹿角珊瑚属种类和数量, 改善西岛珊瑚礁群落, 促进受损珊瑚礁生态系统的功能恢复, 维护西岛及周边海域生态稳定。

## 1 材料与方法

### 1.1 珊瑚礁生态修复区选定

为了选定西岛珊瑚礁生态修复区, 整理西岛珊瑚群落分布调查资料得到, 西岛西北侧造礁石珊瑚平均覆盖率30%以上, 但是造礁石珊瑚优势种类以丛生盔形珊瑚为代表的块状珊瑚, 鹿角珊瑚覆盖率低(中国科学院南海海洋研究所, 2011; 2013; 黄建中等, 2020), 同时西岛西侧风浪较小且底质以礁石为主便于珊瑚的底播移植, 因此本研究选择了西岛西侧作为珊瑚礁生态修复区(如图1), 水深为2~4m。

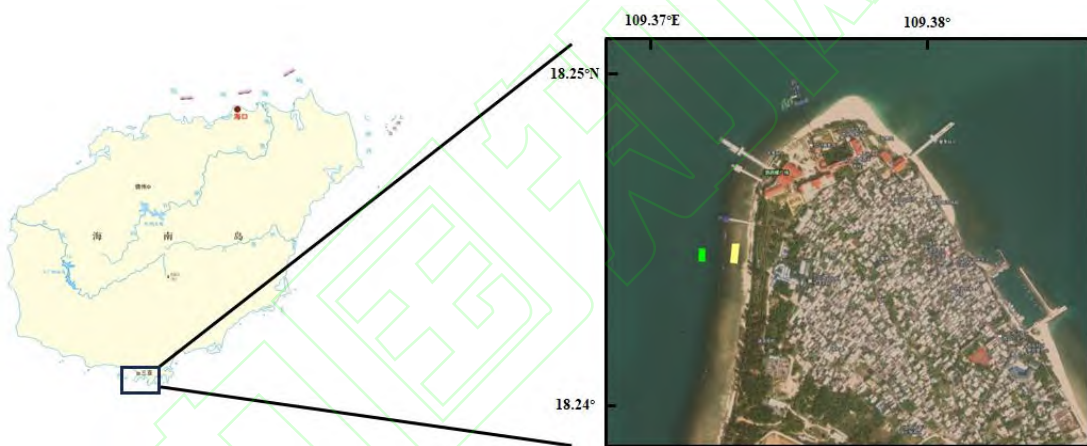


图1 珊瑚苗圃区和修复区位置(绿色方框为苗圃区, 黄色方框为修复区)

该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2019)3333号的标准地图制

Fig. 1 Location of coral nursery and restoration areas (Green box is the coral nursery area, yellow box is the restoration area)

### 1.2 珊瑚礁生态调查方法

本研究分别在2019年7月和2022年3月对西岛西侧进行珊瑚礁生态调查工作, 采用国际上通用的截线样条法开展珊瑚礁生态调查, 具体步骤包括: 使用GPS确定调查站位, 由持有资质的调查人员通过SCUBA水肺潜水, 在2~4m水深处平行于岸线, 随机布设6条长10m的样带, 使用gopro由0m端至10m端对每条样带进行拍摄。回到实验室后进行样带判读, 每0.1m为一个样点, 每10m共计100个样点, 记录指标包括由其它和造礁石珊瑚(属), 可计算不同珊瑚属和活造礁石珊瑚覆盖率, 作为反映珊瑚礁生态健康的指标。

### 1.3 珊瑚的来源

(1)移植珊瑚来源和物种选择: 本研究所有的样品采集于由具有中华人民共和国水生野生动物(石珊瑚)人工繁育许可证和特许捕捉证的单位中国科学院南海海洋研究所的蜈支洲岛珊瑚苗圃, 共计2500株8~10cm大小的珊瑚断枝。本研究选择的珊瑚物种主要包括佳丽鹿角珊瑚(*Acropora pulchra*)、简单鹿角珊瑚(*Acropora austera*)、美丽鹿角珊瑚(*Acropora muricata*)、风信子鹿角珊瑚(*Acropora hyacinthus*)。

(2)珊瑚种苗培育方法: 采用珊瑚园艺养殖方法(Rinkevich, 2014; 2015), 通过在西岛野外构建悬挂在水体中层的珊瑚培育方式。在2021年



4—5月,通过建设90座5层1m的树形苗圃和3座2m×2m的浮床式的珊瑚苗圃,将采集到的2500株8~10cm大小的珊瑚断枝切割为5~8cm的断枝(5~8cm为珊瑚培育的适宜规格,在保证高存活率的前提下,减少了对供体珊瑚的损耗),悬挂在3m左右的水层,进行繁育和驯化。其中每座树形苗圃能培育珊瑚50株,每座浮床式苗圃培育100株珊瑚。

#### 1.4 底播移植的方法

经过6个月的西岛野外珊瑚苗圃培育,产出15cm大小的珊瑚。在2021年10月,潜水员通过SCUBA水肺潜水,用剪刀将树形苗圃的珊瑚剪下,在浮床上的珊瑚,则使用凿子或剪刀,从底部将珊瑚敲下,并将珊瑚分割成6~10cm大小,用于底播移植。本研究选定的修复区底质类型为礁石底,在具体移植过程中,选择的基底主要为裸露的礁

石,基底上无活造礁石珊瑚分布,且与周边活造礁石珊瑚保持距离在30cm以上。选择技术成熟的铆钉(η形移植钉)移植法进行移植(图2),η形移植钉为长度6.4~8cm、具有长短脚,两脚间相距0.6~2cm。移植珊瑚前,先使用nemo水下电钻在珊瑚礁底质上钻出小洞,并将塑料胶粒放入小洞,η形移植钉的长脚放入塑料胶粒后,其短脚触及珊瑚礁底质,要确保移植钉插入小洞的胶粒后能稳固且不易被拔出。然后进行珊瑚移植固定,将要移植的珊瑚长轴与珊瑚礁底质垂直方向放入移植钉的双脚间,让珊瑚尽量靠紧移植钉体上的短刺或锯齿,再用塑料扎带将珊瑚绑缚在移植钉上,调整扎带陷入移植钉两侧的凹槽后再用力系紧,确保珊瑚不会脱落。最新的研究表明,η形移植钉相较于普通直钉,可防止风浪导致的珊瑚摆动(Huang et al, 2023)。



图2 η形珊瑚移植钉及其移植效果

Fig. 2 η-shaped coral transplantation nail and its transplantation effect

#### 1.5 珊瑚礁生态修复效果评估方法

目前常用于评价珊瑚礁生态修复效果指标主要以珊瑚生长速率和存活率为主(Guest et al, 2015; Elisa et al, 2016)。珊瑚存活率数据分析采用随机抽样的方法,在珊瑚苗圃培育6个月后,随机抽样4座树形苗圃和2个浮床苗圃。其中每座树形苗圃统计珊瑚50株,每座浮床苗圃统计珊瑚100株,即每种苗圃检查200株珊瑚,计算珊瑚存活率。在珊瑚移植后的第8个月和20个月,在本研究的珊瑚礁生态修复区共抽取3组移植后的珊瑚,每组50株,记录珊瑚有无死亡并计算其存活率。此外,随机抽样6组(每组5株)大小接近的移植珊瑚,固定金属数字标牌用以识别,在移植完成后(0月)、移植后的第8个月和第20个月测量珊瑚大小,并计算珊瑚生长速率。珊瑚大小通过在水

下使用标尺结合相机拍摄后在室内采用ImageJ软件测量,以每株珊瑚的主枝长度衡量其大小。

珊瑚存活率=活造礁石珊瑚数量/造礁石珊瑚总数

珊瑚生长速率=  $T_n - T_0 / t$

$T_0$ : 初始移植珊瑚的大小;  $T_n$ : 8个月和20个月后移植珊瑚的大小;  $t$ : 珊瑚移植的时间。

#### 1.6 数据分析

本研究利用独立样本T检验和单因素方法分析进行数据统计分析,采用软件SPSS 21.0和SigmaPlot12.5分别进行数据统计分析和作图。

## 2 结果

### 2.1 珊瑚苗圃的培育效果

于2021年10月对2021年5月建设完的树形和浮床珊瑚苗圃进行存活率统计。结果如图3-5所

示: 随机选取 2 个浮床珊瑚苗圃, 共 200 株珊瑚, 结果表明浮床珊瑚苗圃上珊瑚存活率为  $95\% \pm$

$1\%$ ; 选取 4 座树形珊瑚苗圃, 共 200 株珊瑚, 结果表明树形珊瑚苗圃上珊瑚存活率为  $93\% \pm 2\%$ .

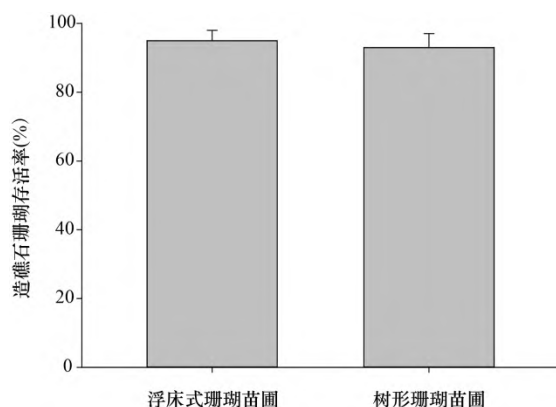


图 3 树形苗圃和浮床苗圃的造礁石珊瑚存活率

Fig. 3 Survival rate of reef-building corals in tree nurseries and floating bed nurseries

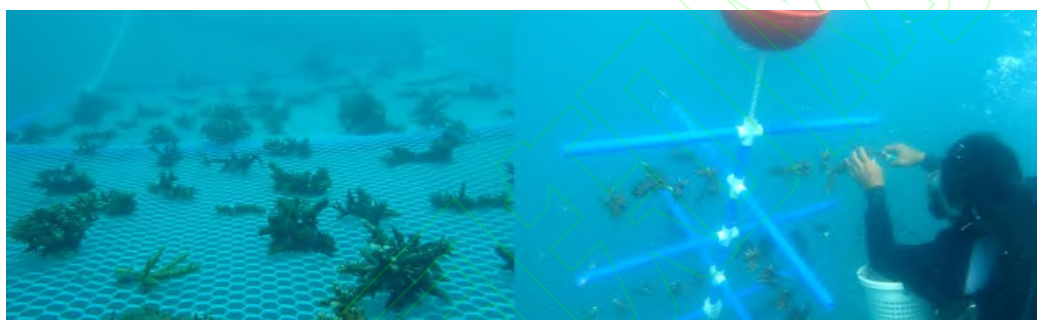


图 4 珊瑚苗圃建设初期

Fig. 4 Initial stage of coral nurseries construction

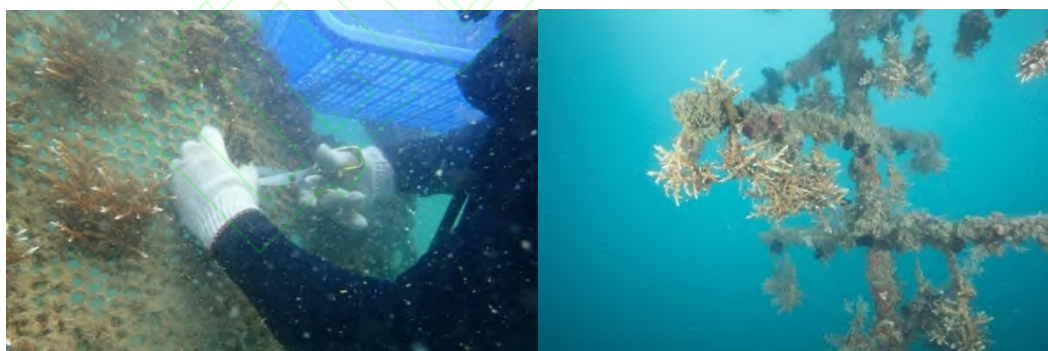


图 5 珊瑚苗圃培育 6 个月后效果

Fig. 5 Effect of coral nursery cultivation after 6 months

## 2.2 珊瑚底播移植的效果

2021 年 10 月利用珊瑚铆钉移植的方法在修复区共移植珊瑚数量 6221 株, 移植工作完成后随机抽查 6 组, 每组 5 株珊瑚, 测量统计珊瑚大小平均为  $(13.1 \pm 1.7)$  厘米·株<sup>-1</sup>, 分枝少, 多为单枝。为了检验西岛珊瑚礁生态修复中铆钉移植法珊瑚

断枝移植效果, 在珊瑚移植完成 8 个月和 20 个月后监测其存活率、珊瑚大小和生长速率。2022 年 5 月通过抽查 3 组, 每组 50 株珊瑚, 统计发现经过 8 个月的生长, 移植珊瑚的存活率为 98%, 另外随机测量 6 组, 每组 5 株珊瑚大小, 测量统计珊瑚大小平均为  $(19.0 \pm 1.7)$  厘米·株<sup>-1</sup>, 与初始的

珊瑚大小对比, 8 个月后珊瑚大小显著增加, 平均生长速率为 $(0.73 \pm 0.17)$  厘米·(月·株)<sup>-1</sup>。通过观察发现, 经过 8 个月生长, 珊瑚生长状况良好, 新增加分支数量明显增多, 并且珊瑚已经附着在礁石上, 2023 年 5 月, 移植 20 个月后, 利用相同的方法, 统计发现, 移植珊瑚存活率为 93%, 珊瑚大小平均为 $(26.2 \pm 5.7)$ 厘米·株<sup>-1</sup>, 新增加分支数量

明显增多, 其中计算其移植后期 2022 年 5 月—2023 年 5 月一年内珊瑚平均生长速率为 $(0.60 \pm 0.38)$ cm/(月株), 移植后 2021 年 11 月—2023 年 5 月 20 个月内珊瑚平均生长速率为 $(0.65 \pm 0.24)$ 厘米·(月·株)<sup>-1</sup>。整体来看, 移植后珊瑚平均生长速率前期(前 8 个月)和后期(后 12 个月)不具有显著差异, 珊瑚平均生长速率较稳定。

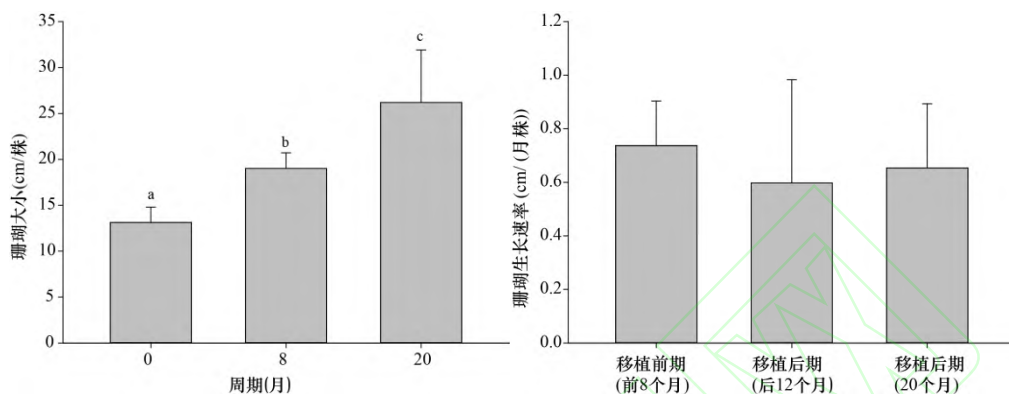


图 5 不同时期底播移植珊瑚大小和生长速率

Fig. 5 Size and growth rate of corals at different stages of transplantation

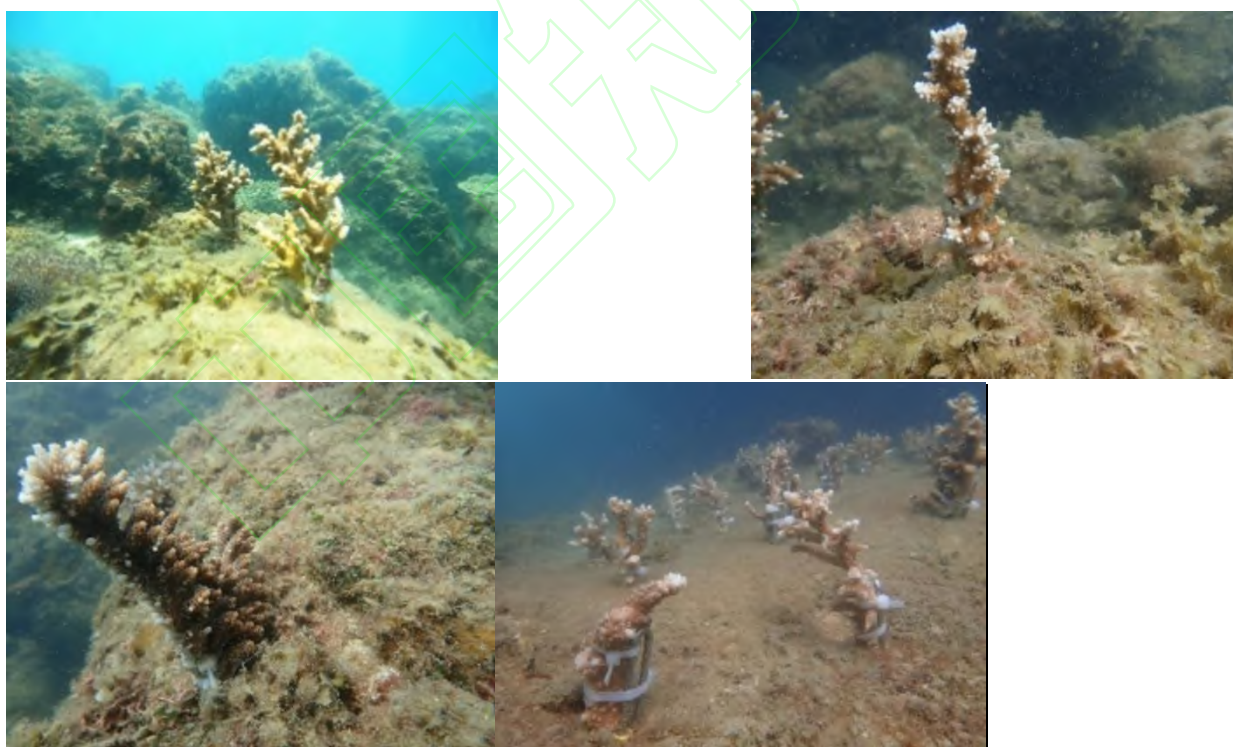


图 6 底播移植初始期的珊瑚

Fig. 6 Corals at the initial stage of transplantation



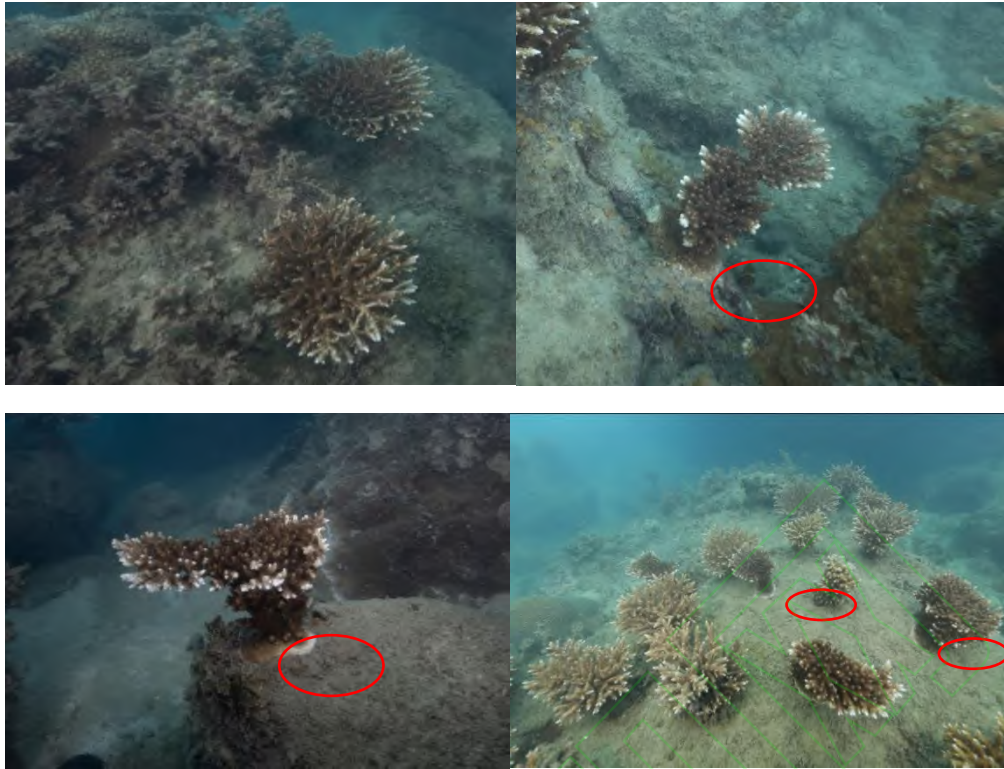


图 7 底播移植 8 个月后的珊瑚(红色圈表示珊瑚已经附着于礁石)  
Fig. 7 Corals after 8 months of transplantation (red circle indicates that the coral has attached to the reef)

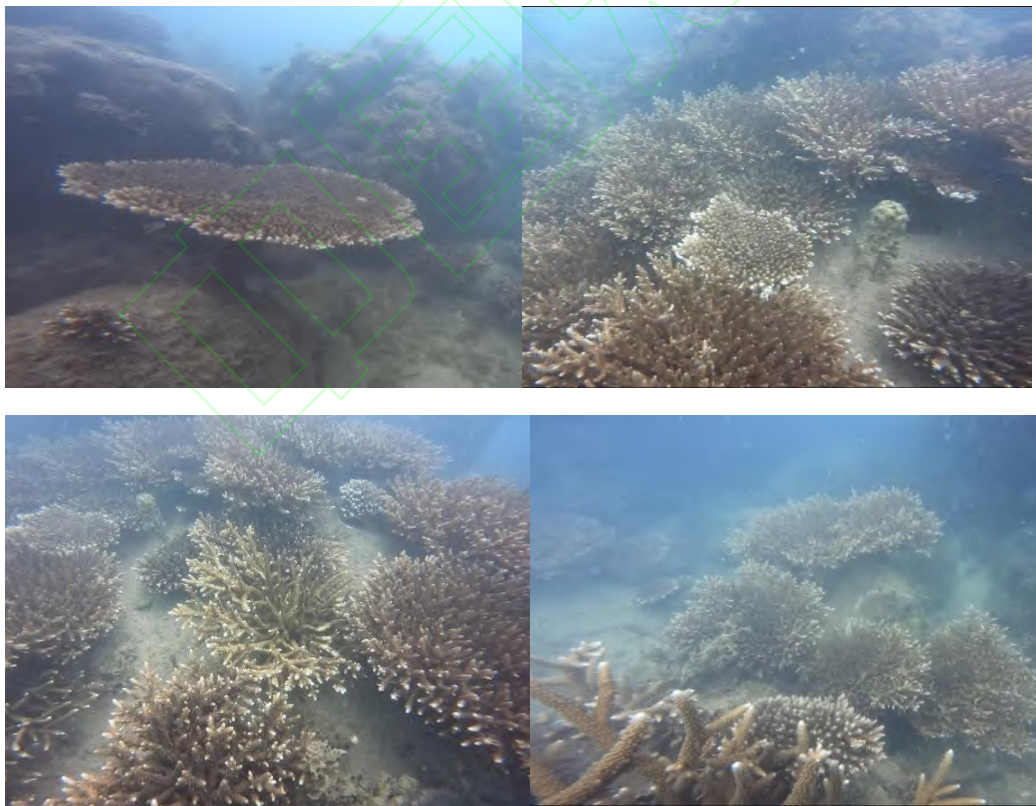


图 8 底播移植 20 个月后的珊瑚  
Fig. 8 Corals after 20 months of transplantation



在修复前与修复后第 8、20 个月, 本研究对修复区在底播移植不同时期的活造礁石珊瑚覆盖率, 以及不同类群造礁石珊瑚(鹿角珊瑚属、盔形珊瑚属、蔷薇珊瑚属)的覆盖率进行了调查统计(图 9-10)。根据前期调查数据, 修复区珊瑚覆盖率平均为 39.83%, 优势种为盔形珊瑚属(*Galaxea* sp.), 覆盖率达 26.17%, 鹿角珊瑚属的覆盖率为 0%, 未发现鹿角珊瑚属分布, 分布的珊瑚种类主要为团块状珊瑚, 缺少分枝状珊瑚。为了检验西岛珊瑚礁生态修复效果, 2022 年 5 月, 在西岛珊瑚修复区布设 6 条 10m 样带。对珊瑚的覆盖率进行统计分析, 结果显示, 经过 8 个月的生长, 对比于修复前, 修复后造礁石珊瑚的覆盖率提高至 43.83%, 优势种仍为盔形珊瑚属(覆盖率为 21.7%), 但是鹿角珊瑚属的覆盖率恢复至 10.55%, 显著高于修复前。作为对比, 2022 年 3 月在西岛西北侧非修复区布设了 6 条 10m 样带, 监测活造礁石珊瑚覆盖率, 结果显示非修复区活造礁石珊瑚覆盖率为 47.33%, 优势种为盔形珊瑚属(*Galaxea* sp.)和蔷薇珊瑚属(*Montipora* sp.), 覆盖率分别为 17.83% 和 16.33%, 而鹿角珊瑚属覆盖率低, 仅为 1.67%。与非修复区造礁石珊瑚群落组成相比, 修复区修复后的鹿角珊瑚属覆盖率显著更高。为了长期监测珊瑚礁生态修复效果, 2023 年 5 月(修复后第 20 个月)以相同的方法监测珊瑚礁生态修复区活造礁石珊瑚覆盖率, 结果显示活造礁石珊瑚覆盖率为 61.49%, 尽管优势种仍为盔形珊瑚属, 覆盖率达 40.19%, 但鹿角珊瑚属覆盖率已增至 15.93%, 有效达到了修复目标, 验证了本次修复实验的长期可靠性。

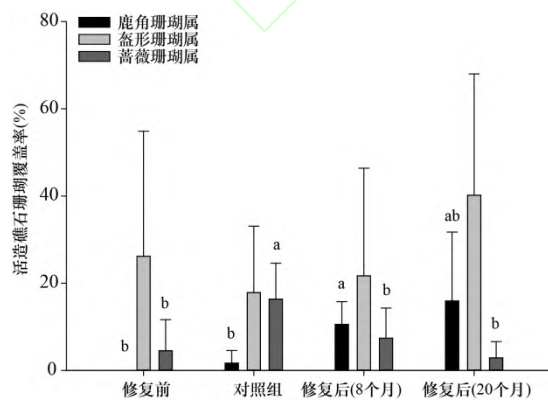


图 9 不同类群造礁石珊瑚的覆盖率  
Fig. 9 Coverage rate of reef-building corals in different genera

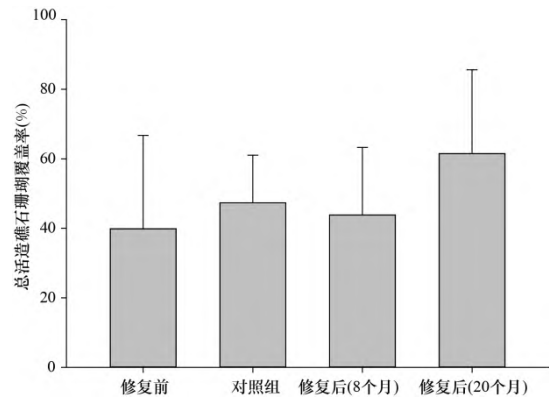


图 10 底播移植不同时期的活造礁石珊瑚覆盖率  
Fig. 10 Coverage of coral transplantation at different stages

### 3 讨论

随着珊瑚礁生态不断退化, 珊瑚礁生态修复受到了人们的关注, 生态修复项目也逐渐增加, 相关技术得到了不断改进和优化, 但由于海洋环境复杂和珊瑚生长环境条件要求严苛, 因此珊瑚礁生态修复工程需要根据修复区的生态环境和生物种类进行调整, 将不同修复技术组合应用在不同的海域(Lionel et al, 2017)。本研究根据修复海域的环境, 选择了合适的苗圃和底播移植工艺, 为西岛以及我国其他海域的珊瑚礁生态修复提供参考。

分枝状鹿角珊瑚因其生长速度快和结构复杂可增加生态系统空间复杂度的特点, 为目前珊瑚礁生态修复最常选用的种类。目前珊瑚礁生态修复研究工作有 59%选择分枝状珊瑚, 仅 18%选择块状珊瑚(Bostrom-Einarsson et al, 2020)。在西岛缺乏分枝状鹿角珊瑚的背景下, 通过增加鹿角珊瑚属物种数量和覆盖率, 可提高西岛珊瑚礁健康程度, 是西岛珊瑚礁生态系统保护和恢复的关键。但从另一方面来说, 鹿角珊瑚属相对于其他珊瑚更易受环境变化(如高温)的影响, 为环境敏感种, 被认为是在未来气候持续变暖情况下最先消失的种类(Conti-Jerpe et al, 2020)。且在近年来, 海南岛周边因水温过高导致的珊瑚(尤其是鹿角珊瑚属)白化事件频发(Lyu et al, 2022), 选择以鹿角珊瑚属作为西岛近岸珊瑚礁生态修复的修复对象风险较高。因此, 本研究在选择鹿角珊瑚属作为修复对象时, 具体选择了 4 种在西岛本地存在的种类, 以确保培育和移植的珊瑚对西岛近岸海域环境的

适应性。

珊瑚苗圃工艺对于珊瑚移植工作具有重要的意义, 可避免采集野外珊瑚从而损坏原生礁石的珊瑚资源, 同时珊瑚苗圃可减少敌害生物如核果螺、大型海藻、沉积物等不利因素对珊瑚的影响, 为珊瑚培育提供有利的生存条件, 从而提高珊瑚存活率, 是珊瑚适应修复区环境的重要步骤 (Epstein et al, 2003; Rinkevich, 2005)。为了提高苗圃培育技术的适用范围, 以及最大限度地提高珊瑚存活率和生长, 各种类型的苗圃被开发以适应更广泛的培育需求。已报道广泛使用的珊瑚苗圃总体可归为漂浮式苗圃与固定式苗圃两大类 (Levy et al, 2010; Shafir et al, 2004; Shafir et al, 2008), 其中漂浮式苗圃通常漂浮在水层中, 包括缆绳苗圃、浮床苗圃和树形苗圃等; 固定式苗圃通常固定在海底, 包括框架式苗圃和托举式苗圃等。先前 Xia(2022)和 Liu(2023)等在蜈支洲海域使用固定式苗圃成功培育了近 2000 株鹿角珊瑚。但鉴于西岛近岸海域水体较为浑浊, 适合构建框架式苗圃的沙地底质分布过深(>6m), 因此不适合构建框架式珊瑚培育苗圃。基于此, 本实验选择构建漂浮式苗圃以培育珊瑚, 主要包括树形和浮床两种苗圃, 这两种苗圃均是將珊瑚悬挂到 3 米左右的水深进行培育。树形苗圃的优点在于, 珊瑚悬挂在绳子上, 可随着海浪的摆动, 减少悬浮物对珊瑚的影响; 树形苗圃的缺点在于, 对于其维护的成本较高, 且珊瑚长成后相邻珊瑚之间会发生碰撞, 可能引起珊瑚脱落死亡。浮床苗圃的优点在于, 珊瑚处于更稳定的环境生长, 长成后不需要分苗, 后期维护成本低; 浮床苗圃的缺点在于, 其结构容易引起悬浮物的沉积, 珊瑚受悬浮物影响较大。本次实验结果表明, 树形苗圃和浮床式苗圃珊瑚的存活率不具有显著差异, 珊瑚存活率均达到 90%以上, 生长状况良好。本研究表明, 两种漂浮式苗圃培育珊瑚的存活率均达到 90%, 说明树形和浮床珊瑚苗圃培育技术均适用于西岛海域珊瑚礁生态修复。分析其主要原因是, 本次实验珊瑚苗圃培育时间为 5 月份, 为水质较清、光线充足和非台风时期, 有利于珊瑚前期的切口恢复, 提高存活率。以上结果说明了本次实验选择的树形和浮床式苗圃均适合于沙质底质、建设苗圃时间以 3—6 月份最佳, 并且本次

实验建设的苗圃位于珊瑚修复区的附近, 对移植珊瑚具有驯化作用, 有利于珊瑚适应移植区环境, 提高移植珊瑚的存活率。

珊瑚礁生态修复区底质类型为沙底和礁石混合, 在原生礁石上选择铆钉移植法, 在分枝状造礁石珊瑚覆盖率低的礁石上, 利用铆钉提供珊瑚固着点, 移植鹿角珊瑚, 从而提高活珊瑚覆盖率。相较于以往珊瑚礁生态修复研究, Bostrom-Einarsson 等人(2020)对珊瑚移植的存活率进行统计, 发现鹿角珊瑚存活率在 60%~70%之间, 在新加坡珊瑚移植项目中, 一般珊瑚移植的存活率为 70%~80%(Lionel et al, 2017)。张浴阳利用铆钉移植方法于 2017 年在蜈支洲移植造礁石珊瑚一年后, 珊瑚存活率为 75%以上。并且部分研究发现, 随着移植时间的增加, 珊瑚存活率降低(Boch et al, 2019)。相较于以往研究, 本次实验珊瑚存活率较高, 并且 8 月份和 20 月份的珊瑚存活率不存在显著差异, 究其原因, 本研究选择的修复区珊瑚敌害生物少, 另外本次修复工作完成后, 在恶劣天气如台风、热白化事件和冬季后, 对修复区进行了多次的维护, 减轻了不利环境和污损生物对珊瑚的影响, 这与目前提出需要对珊瑚修复进行长期监测维护的建议相符(Zheng et al, 2021; Won and Liva, 2023)。本实验监测移植后珊瑚时间为第 8 个月和第 20 个月。结果发现, 8 个月后珊瑚已稳固附着于礁石上(图 7)。一般来说, 珊瑚附着于礁石上后, 才认为珊瑚生长比较稳定, 因此珊瑚移植时间应避免台风高发和海浪过大的季节, 预留足够长时间待其附着于礁石上, 避免珊瑚脱落死亡。本研究珊瑚底播移植工作在 2021 年 10 月份开展, 避开了三亚台风高发期。因此在移植第 8 个月后, 珊瑚均能够稳固附着在礁石上。此外, 移植后第 20 个月, 珊瑚个体明显增大, 且仍稳固在礁石上(图 8)。而 2022 年夏季有多个台风影响三亚, 说明前期稳固后的移植珊瑚能够抵御恶劣天气。上述结果也表明本研究在珊瑚修复过程中选择的方法和时机是合适的, 可为后续开展其他珊瑚礁生态修复工作提供借鉴。

鹿角珊瑚属在造礁石珊瑚群落健康评价指标中, 为环境敏感代表类群, 鹿角珊瑚属覆盖率占比重设定最高, 是珊瑚礁健康评价的重要指标(孙有方 等, 2018)。受气候变化和人类活动的双重

影响, 珊瑚礁生态系统退化严重, 在受损珊瑚礁区内(如西岛), 一般表现为鹿角珊瑚种类数量和覆盖率下降, 优势种大多变为团块状珊瑚。鹿角珊瑚呈枝状, 成体鹿角珊瑚结构复杂, 相比于团块状珊瑚具有更好的生态功能(Goergen et al, 2018)。先前研究表明, 鹿角珊瑚退化海域的生态功能缺失不是其他种属珊瑚能够填补的(Young et al, 2012; Watt-Pringle et al, 2022), 因此对鹿角珊瑚的保护和恢复尤为重要。在本研究中, 修复后第20个月, 针对鹿角珊瑚的修复实验结果表明(图9, 图10): 修复区内鹿角珊瑚属覆盖率(15.93%)与修复实验开始前(0%), 以及与未修复区(1.67%)相比均显著更高; 修复区内造礁石珊瑚覆盖率(61.49%)也明显高于修复实验开始前(39.83%)和未修复区(47.33%)。鹿角珊瑚覆盖率的显著升高表明修复后修复区内造礁石珊瑚覆盖率更高, 珊瑚礁生态系统生境复杂程度更高, 生态功能得到显著提升。另外值得注意的是, 本研究中鹿角珊瑚属覆盖率的提升并没有影响到修复区内原先优势种(盔形珊瑚属、蔷薇珊瑚属)的覆盖率。而与本研究不同的是, Lustic 等(2020)的实验表明, 在修复过程中, 鹿角珊瑚属与其他种类珊瑚间的竞争关系可导致它们的生长均受到抑制。因此, 本研究表明移植至西岛修复区的鹿角珊瑚在修复后具有较好的适应性和恢复力, 且这种适应与恢复过程并没有影响本地其他种类珊瑚的正常生长。考虑到本研究中鹿角珊瑚在移植过程中, 其基底主要为裸露的礁石, 基底上无活造礁石珊瑚分布, 且与周边活造礁石珊瑚保持距离在30cm以上。这应当是本实验中鹿角珊瑚快速适应与恢复的重要因素, 也可

为后续开展其他珊瑚礁生态修复工作提供借鉴。综上, 本研究关注的鹿角珊瑚在修复后具有较好的适应性和恢复力, 修复后显著提高了修复区内珊瑚礁生态系统的生态功能。

#### 4 结论

为改善西岛珊瑚礁退化的严峻现状, 补充和恢复关键造礁石珊瑚(鹿角珊瑚属)物种资源。本研究首先利用两种漂浮式珊瑚苗圃培育获得6221株鹿角珊瑚 $[(13.1 \pm 1.7)\text{cm}]$ , 随后采用铆钉法将上述珊瑚移植至西岛近岸原生礁石。8个月后, 移植珊瑚的存活率达98%, 珊瑚平均大小为 $(19 \pm 0.17)\text{cm}$ , 平均生长速率为 $(0.73 \pm 0.17)\text{厘米}\cdot\text{月}^{-1}$ , 修复区活造礁石珊瑚覆盖率提高至43.83%, 其中鹿角珊瑚属的覆盖率为10.55%; 移植20个月后, 移植珊瑚的存活率为93%, 珊瑚平均大小为 $(26.2 \pm 5.7)\text{cm}$ , 平均生长速率为 $(0.60 \pm 0.28)\text{厘米}\cdot\text{月}^{-1}$ , 修复区造礁石珊瑚覆盖率提高至61.49%, 其中鹿角珊瑚属的覆盖率为15.93%。总体来说, 本研究选择的珊瑚种类适应于西岛珊瑚礁环境, 种苗培育方法的珊瑚存活率高, 达到繁育珊瑚种苗的效果; 原生礁石上铆钉移植的方法可靠, 修复后鹿角珊瑚适应和恢复能力较好。本研究根据西岛造礁石珊瑚群落退化现状, 选择关键类群鹿角珊瑚属作为移植珊瑚物种, 有效恢复了受损海域的环境敏感珊瑚种类, 提高珊瑚礁生态系统的生态功能。本研究可为我国典型近岸退化珊瑚礁生态系统的保护和修复提供参考, 并为未来我国珊瑚礁修复技术发展提供理论和技术支撑。

#### 参考文献 References

- 黄晖, 尤丰, 练健生, 等. 2012. 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, 36(9): 64-74. HUANG HUI, YOU FENG, LIAN JIANGSHENG, et al. 2012. Composition and distribution of scleractinian coral in the northwest of Hainan Island[J]. Marine Sciences, 36(9):64-74.
- 黄晖, 陈竹, 黄林韬等, 2021.中国珊瑚礁状况报告 2010-2019[M]. 北京: 海洋出版社: 1-127.
- 黄建中, 魏宇衡, 顾志峰, 等. 2020. 海南西岛珊瑚群落变化及其影响因素. 热带海洋学报, 39(6): 103-113. HUANG JIANGZHONG, WEI YUHENG, GU ZHIFENG, et al. 2020. Coral community change and its influencing factors in Ximaozhou Island of Hainan[J]. Journal of Tropical Oceanography, 39(6): 103-113.
- 李元超, 兰建新, 郑新庆, 等. 2014. 西沙赵述岛海域珊瑚礁生态修复效果的初步评估[J]. 应用海洋学学报, 33(3): 348-353. LI YUANCHAO, LAN JIANXIN, ZHENG XINQING, et al. 2014. Preliminary assessment of the coral reef restoration in areas of Zhaoshu Island, Xisha Islands[J]. Journal of Applied Oceanography, 33(3): 348-353.
- 吴钟解, 吴瑞, 王道儒, 等. 2011. 海南岛东、南部珊瑚礁生态健康状况初步分析[J]. 热带作物学报, 32(1): 122-130. WU ZHONGJIE, WU RUI, WANG DAORU, et



- al. 2011. A preliminary study on the status of coral reef health in the southeast coastal region of Hainan Island[J]. Chinese Journal of Tropical Grops, 32(1):122-130.
- 吴钟解, 张光星, 陈石泉, 等. 2015. 海南西瑁洲岛周边海域造礁石珊瑚空间分布及其生态系统健康评价. 应用海洋学学报, 34(1) :133-140. WU ZHONGJIE, ZHANG GUANGXING, CHEN SHIQUAN, et al. 2015. Spatial distribution and ecosystem health assessment of hermatypic coral in surrounding waters of Ximaozhou Island, Hainan[J]. Journal of Applied Oceanography, 34(1) :133-140.
- 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. 生物多样性, 26(3):258-265. SUN YOUFANG, LEI XINMING, LIAN JIANSHENG, et al, 2018. Ecosystem status and healthy assessment of Sanya coral reef national nature reserve. Biodiversity Science[J]. 26(3):258-265.
- 张浴阳, 刘骋跃, 王丰国, 等. 2021. 典型近岸退化珊瑚礁的成功修复案例——蜈支洲珊瑚覆盖率的恢复. 应用海洋学学报, 40(1): 26-33. ZHANG YUYANG, LIU CHENGYUE, WANG FENGGUO, et al. 2021. Successful restoration of typical degraded coastal coral reefs— a restoration of coral coverage at Wuzhizhou Island[J]. Journal of Applied Oceanography, 40(1): 26-33.
- 邹仁林, 马江虎, 宋善文. 1966. 海南岛珊瑚礁垂直分带的初步研究[J]. 海洋与湖沼, 8(2): 153-162. ZOU RENLIN, MA JIANGHU, SONG SHANWEN, 1966. A preliminary study on the vertical zonation of the coral reef of Hainan Island[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 8(2): 153-162
- BRANDL SJ, RASHER DB, CÔTÉ IM, et al. 2019. Coral reef ecosystem functioning: eight core processes and the role of biodiversity[J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 17(8): 445-454.
- BOCH CA, DEVOGELAERE A, BURTON E, et al. 2019. Coral translocation as a method to restore impacted deep-sea coral communities[J]. Frontiers in Marine Science, 6(9).
- BOSTRM-EINARSSON L, BABCOCK RC, BAYRAKTAROV E, et al. 2020. Coral restoration— A systematic review of current methods, successes, failures and future directions[J]. PLoS ONE, 15(1): e0226631.
- CONTI-JERPE IE, THOMPSON PD, WONG CWM, et al. 2020. Trophic strategy and bleaching resistance in reef-building corals[J]. Science Advances, 6(15): eaaz5443.
- COX KD, WOODS MB and REIMCHEN TE. 2021. Regional heterogeneity in coral species richness and hue reveals novel global predictors of reef fish intra-family diversity[J]. Scientific Reports, 11(1): 1-12.
- WON DJ AND LIVA M. 2023. A review of coral reef restoration methods[J]. Journal of Student Research, 12(2).
- DING J, JIANG F, LI J, et al. 2019. Microplastics in the coral reef systems from Xisha Islands of South China Sea[J]. Environmental Science and Technology, 53(14): 8036-8046.
- ELISA B, MEGAN IS, SABAH A, et al. 2016. The cost and feasibility of marine coastal restoration[J]. Ecological Applications, 26(4): 1055–1074.
- EPSTEIN N, BAK RPM and RINKEVICH B. 2003. Applying forest restoration principles to coral reef rehabilitation[J]. Aquatic Conservation Marine and Freshwater Ecosystems, 13(5): 387-395.
- FISHER R, O'LEARY RA, LOW-CHOY S, et al. 2015. Species richness on coral reefs and the pursuit of convergent global estimates[J]. Current Biology, 25(4):500-505.
- GOERGEN EA, GILLIAM DS. 2018. Coral reef restoration and staghorn coral conservation: lessons learned over 10 years of research[G]. Halmos College of Arts and Sciences Nove Southeastern University: Graduate Research Symposium: Oral Presentation.
- GUEST JR, DIZON RM, EDWARDS AJ, et al. 2009. How quickly do fragments of coral "Self - Attach" after transplantation?[J]. Restoration Ecology, 19(2): 234-242.
- HUANG L, YU X, LIU C, et al. 2023. Actions to achieve rapid coral self - attachment: insights from outplanting nails, coral orientation, and substrate biological condition[J]. Restoration Ecology, 31(7): e13958.
- HOEGH-GULDBERG O, MUMBY PJ, HOOTEN AJ, et al. 2008. Coral reefs under rapid climate change and ocean acidification[J]. Science, 318(5857): 1737-1742.
- HUGHES TP, BARNES ML, BELLWOOD DR, et al. 2017a. Coral reefs in the Anthropocene[J]. Nature, 546(7656): 82-90.
- HUGHES TP, HUANG H AND YOUNG MA. 2013. The wicked problem of China's disappearing coral reefs[J]. Conservation Biology, 27(2): 261-269.
- HUGHES TP, KERRY JT, ÁLVAREZ-NORIEGA M, et al. 2017b. Global warming and recurrent mass bleaching of corals[J]. Nature, 543(7645): 373-377.
- ISHIDA-CASTAÑEDA J, PIZARRO V, LÓPEZ-VICTORIA M, et al. 2020. Coral reef restoration in the Eastern Tropical Pacific: feasibility of the coral nursery approach[J]. Restoration Ecology, 28(1): 22-28.
- LEE S, GIDEON L, EDGARDO G, et al. 2008. Fixed and suspended coral nurseries in the Philippines: establishing the first step in the "gardening concept" of reef restoration [J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 358(1): 68-97.
- LEVY G, SHAISH L, HAIM A, et al. 2010. Mid-water rope nursery—Testing design and performance of a novel reef restoration instrument [J]. Ecological Engineering, 36(4):

- 560-569.
- LI XB, LIU S, HUANG H, et al. 2012. Coral bleaching caused by an abnormal water temperature rise at Luhuitou fringing reef, Sanya Bay, China[J]. *Aquatic Ecosystem Health and Management*, 15(2): 227-233.
- LIONEL CS and CHOU LM. 2017. Sustainability matters environmental management in the Anthropocene [M]. Singapore: World Scientific Publishing Co.Pte.Ltd: 3-23.
- LIU X, ZHU W, CHEN R, et al. 2023. Framed reef modules: a new and cost-effective tool for coral restoration[J]. *Restoration Ecology*, e13997.
- LIU Y, PENG Z, ZHOU R, et al. 2014. Acceleration of modern acidification in the South China Sea driven by anthropogenic CO<sub>2</sub>[J]. *Scientific Reports*, 4(6):1-5.
- LUSTIC C, MAXWELL K, BARTELS E, et al. 2020. The impacts of competitive interactions on coral colonies after transplantation: a multispecies experiment from the Florida Keys, US[J]. *Bulletin of Marine Science*, 96(4): 805-818.
- LYU Y, ZHOU Z, ZHANG Y, et al. 2022. The mass coral bleaching event of inshore corals from South China Sea witnessed in 2020: Insight into the causes, process and consequence[J]. *Coral Reefs*, 41(5): 1351-1364.
- MOBERG F and FOLKE C. 1999. Ecological goods and services of coral reef ecosystems[J]. *Ecological Economics*, 29(2): 215-233.
- OMORI M. 2019. Coral restoration research and technical developments: what we have learned so far[J]. *Marine Biology Research*, 15(7): 377-409.
- OMORI M and IWAO K. 2014. Methods of farming sexually propagated corals and outplanting for coral reef rehabilitation; with list of references for coral reef rehabilitation through active restoration measure[J]. Akajima Marine Science Laboratory, Okinawa, Japan, 1-63.
- QIN Z, YU K, LIANG J, et al. 2020. Significant changes in microbial communities associated with reef corals in the southern South China Sea during the 2015/2016 global-scale coral bleaching event[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 125(7): e2019JC015579.
- RINKEVICH B. 2005. Conservation of coral reefs through active restoration measures: recent approaches and last decade progress[J]. *Environmental Science and Technology*, 39(12): 4333-4342.
- RINKEVICH B. 2014. Rebuilding coral reefs: does active reef restoration lead to sustainable reefs? [J]. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 7: 28-36.
- RINKEVICH B. 2015. Novel tradable instruments in the conservation of coral reefs, based on the coral gardening concept for reef restoration[J]. *Journal of Environmental Management*, 162:199-205.
- SHAFIR S, RINKEVICH B. 2008. The underwater silviculture approach for reef restoration: an emergent aquaculture theme[M].// Schwartz SH. *Aquaculture research trends*. New York, USA: Nova Science Publications: 279-295.
- SHAFIR S, VAN RIJN J and RINKEVICH B. 2006. A mid-water coral nursery[C].Okinawa, Japan: Proceedings of the 10th International Coral Reef Symposium: 1674-1679. .
- WATT-PRINGLE R, SMITH D J, AMBO-RAPPE R, et al. 2022. Suppressed recovery of functionally important branching *Acropora* drives coral community composition changes following mass bleaching in Indonesia[J]. *Coral Reefs*, 41(5): 1337-1350.
- WOODHEAD AJ, HICKS CC, NORSTRÖM AV, et al. 2019. Coral reef ecosystem services in the Anthropocene[J]. *Functional Ecology*, 33:1023-1034.
- XIA J, ZHU W, LIU X, et al. 2022. The effect of two types of grid transplantation on coral growth and the in-situ ecological restoration in a fragmented reef of the South China Sea[J]. *Ecological Engineering*, 177: 106558.
- YANG T, DIAO X, CHENG H, et al. 2020. Comparative study of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and heavy metals (HMs) in corals, sediments and seawater from coral reefs of Hainan, China[J]. *Environmental Pollution*, 264:114719.
- YOUNG CN, SCHOPMEYER SA and LIRMAN D. 2012. A review of reef restoration and coral propagation using the threatened genus *Acropora* in the Caribbean and Western Atlantic[J]. *Bulletin of Marine Science*, 88(4): 1075-1098.
- YU KF. 2012. Coral reefs in the South China Sea: Their response to and records on past environmental changes[J]. *Science China Earth Sciences*, 55(8): 1217-1229.
- YUAN XC, YUAN T, HUANG H, et al. 2018. Elevated CO<sub>2</sub> delays the early development of scleractinian coral *Acropora gemmifera*[J]. *Scientific Reports*, 8(1): 1-10.
- ZHENG X, LI Y, LIANG J, et al. 2021. Performance of ecological restoration in an impaired coral reef in the Wuzhizhou Island, Sanya, China[J]. *Journal of Oceanology and Limnology*, 39(1): 135-147.