

王明威, 周榆鹏, 黄学勇, 等. 广西涠洲岛造礁石珊瑚生长特性与人工礁体适配性研究[J]. 海洋学报, 2026, 48(x): 1–13. doi:
Wang Mingwei, Zhou Yupeng, Huang Xueyong, et al. Study on Growth Characteristics of Hermatypic Stony Corals and Their Compatibility
with Artificial Reefs in Weizhou Island, Guangxi[J]. Haiyang Xuebao, 2026, 48(x): 1–13. doi:

广西涠洲岛造礁石珊瑚生长特性与 人工礁体适配性研究

王明威¹, 周榆鹏^{1,2}, 黄学勇^{1*}, 彭梦娇¹, 黄光贤^{1,2}, 宛强^{1,2},
谭荣华¹, 林文彬³, 余克服^{1,4}, 黄雯^{1*}

(1. 广西大学 广西南海珊瑚礁研究重点实验室/珊瑚礁研究中心/海洋学院, 广西 南宁 530004; 2. 广西大学 资源环境与材料学院, 广西 南宁 530004; 3. 广西北海涠洲岛文化旅游集团有限公司, 广西 北海 536004; 4. 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广东 广州 511458)

摘要: 珊瑚礁生态修复被国际上认为是扭转珊瑚礁退化趋势的关键技术和重要途径, 需因地制宜筛选本土修复珊瑚物种与适配人工礁体。本研究以广西涠洲岛退化珊瑚礁区为对象, 通过 10 个月人工苗圃培育监测与 18 个月梯形、桌形、圆台形 3 种混凝土人工礁体移植实验, 系统探究造礁石珊瑚生长适应性与礁体适配性。结果显示: 4 种供试珊瑚 10 个月的存活率均超 85%, 美丽鹿角珊瑚 (*Acropora muricata*) 与风信子鹿角珊瑚 (*Acropora hyacinthus*) 存活率均达 100%, 风信子鹿角珊瑚在部分时段活组织投影面积增长速率更高, 美丽鹿角珊瑚在存活稳定性、三维形态建成及工程应用潜力方面综合表现更优, 可作为核心修复物种。3 种礁体中, 梯形人工礁 18 个月珊瑚存活率达 92%, 显著高于圆台形 (77%) 和桌形 (60%); 面对环境压力实际光量子产量、净光合速率等各生理指标对礁体形状响应呈现显著特异性, 梯形人工礁体抗高温、台风胁迫及损伤恢复能力更强。本研究确立了以“美丽鹿角珊瑚为主要修复物种、扎带捆绑为固定方式、金属苗床为培育载体、梯形人工礁体为定居基底”的珊瑚礁生态修复模式, 为我国亚热带台风频发海域的珊瑚礁生态修复工作提供了科学依据与实用技术参考。

关键词: 造礁石珊瑚; 人工礁体; 珊瑚移植; 生态修复; 涠洲岛

中图分类号: 文献标志码: A 文章编号: 0253-4193(2026)x-0001-13

1 引言

珊瑚礁具有生物多样性、海岸防护、固碳减排等多重核心生态功能^[1], 对全球海洋生态平衡与人类可持续发展意义重大^[2-3]。然而, 在全球气候变化(海水升温、酸化)与过度捕捞、海洋污染、海岸开发等人类活动的复合胁迫下^[2,4], 全球珊瑚礁正加速退化, 活

珊瑚覆盖度持续下降^[5], 其自然恢复过程受阻甚至停滞^[6-8], 亟需通过人工修复技术辅助恢复其生态服务功能^[9-10]。

我国南海是全球珊瑚礁的重要分布区^[11], 涠洲岛作为南海珊瑚礁分布的北缘, 其珊瑚礁生态系统不仅是北部湾生态屏障的核心组成部分^[12], 更承载着研究亚热带珊瑚礁适应性及抗逆性的独特科学价值^[14], 可

收稿日期: 2026-02-06; 修订日期: 2026-03-31。

基金项目: 广西科技基地与人才专项(桂科 AD25069075); 广西自然科学基金(2023GXNSFAA026510)。

作者简介: 王明威(2000—), 男, 在读研究生, 主要从事珊瑚礁生态修复研究。E-mail: 1412846281@qq.com

* 通信作者: 黄学勇, 讲师, 主要从事珊瑚礁生态监测与修复研究工作。E-mail: huangxueyong@gxu.edu.cn; 黄雯, 副教授, 硕士生导师, 主要从事珊瑚礁生态修复和珊瑚温度适应机制研究工作。E-mail: wenhuang@gxu.edu.cn

能是南海珊瑚为适应全球变暖北向迁移的避难所。该海域珊瑚礁曾具备较高的覆盖水平,1991年之前平均活造礁石珊瑚覆盖度近70%,但此后呈持续快速下降趋势。2005年全岛平均活珊瑚覆盖率降至23.17%,2007–2008年进一步降至17.6%,2015年跌至30余年最低值仅为5.75^[13]。2015年起当地开始系统开展珊瑚礁保护与珊瑚礁生态修复工作,2018年活珊瑚覆盖率较2015年小幅回升。该区域年均受3~4个台风直接或间接影响,为我国华南沿海台风高频影响海域,受极端风浪、沉积物再悬浮等台风衍生胁迫与近岸人类活动的双重扰动,珊瑚礁退化态势显著、修复技术难度突出,是我国亚热带海域珊瑚礁生态修复的典型重难点区域^[14]。

珊瑚移植与人工礁体投放是珊瑚礁生态修复的核心技术路径,其中“珊瑚园艺”技术已在全球多地取得良好成效^[15–18]。但现有研究多聚焦人工礁体材料筛选(如混凝土、钢材等),针对不同形状礁体对珊瑚附着、生长及抗逆性影响的系统性研究仍较匮乏^[19–23];同时,不同造礁石珊瑚的生长特性与环境适应性差异显著,适宜涠洲岛的修复物种筛选与礁体适配性研究尚需深化。这些研究缺口限制了珊瑚礁修复技术的针对性与有效性,难以满足该海域珊瑚礁修复的实践需求^[27]。在全球生态约束不断加剧的背景下,珊瑚礁修复愈发凸显出不可替代的关键作用^[24],如何实现珊瑚礁修复的规模化、标准化与可复制推广,已成为国际研究的核心议题^[25]。

基于此,本研究以涠洲岛北部退化珊瑚礁区为研究区域,通过10个月人工苗圃培育监测与18个月不同形状(梯形、桌形、圆台形)混凝土人工礁体移植实验,系统开展造礁石珊瑚生长适应性筛选与人工礁体适配性评估。研究旨在明确适宜该区域的核心修复珊瑚物种、优化人工礁体构型参数,构建适配热带、亚热带台风频发海域的珊瑚礁生态修复模式,为涠洲岛珊瑚礁保护与修复提供科学依据和技术支撑,推动我国珊瑚礁生态修复理论与实践的创新发展。

2 材料与方法

2.1 研究区域

研究区域位于广西北海涠洲岛北部海域(21°10'N, 109°15'E),属亚热带季风气候区,年平均海面温度24.55℃,年平均海水盐度31.9‰,水质与气候条件适宜造礁石珊瑚生长繁育。该区域珊瑚礁面积约为2990 hm²,占广西珊瑚礁总面积的97.5%,但受台风频发与近岸人类活动复合干扰,生态系统退化严重,是

我国南方台风频发海域珊瑚礁修复的典型研究区。

本研究在该区域开展30 hm²退化珊瑚礁生态修复工程,实验区域水深4~8 m,采用人工礁体投放与珊瑚移植相结合的技术路径。为精准反映自然海域珊瑚生长及抗逆特性,珊瑚苗圃与人工礁体均布设于离岸1.5 km的区域,直接暴露于台风等自然胁迫环境中。

2.2 苗圃珊瑚移植

2.2.1 珊瑚样品采集与处理

本研究选取4种涠洲岛本地优势造礁石珊瑚为研究对象。涵盖涠洲岛珊瑚礁修复最常用种类和历史优势种:美丽鹿角珊瑚(*Acropora muricata*)和风信子鹿角珊瑚(*Acropora hyacinthus*),以及现存核心优势种:十字牡丹珊瑚(*Pavona decussata*)和澄黄滨珊瑚(*Porites lutea*)。通过自携式水下呼吸器(Self-contained Underwater Breathing Apparatus, SCUBA)潜水采集每种珊瑚健康母株各5株,在作业交通艇上采用标准化切割处理:块状/片状珊瑚分割为25 cm²左右的均匀小块,枝状珊瑚剪切为4~8 cm带完整生长点的断枝,每株母株均匀分割出4个断枝/小块,最终获得每种珊瑚各20株无损伤、规格一致的实验样品。苗圃布设时,将来自不同母株的实验个体完全随机、均匀分散布置,以降低母株遗传背景与空间效应对实验结果的干扰。

2.2.2 苗圃构建与珊瑚移植

珊瑚苗圃采用钢筋与镀锌铁丝网焊接而成,结构尺寸为3 m×2 m×0.5 m,通过铁锤将四角钢筋垂直敲击打入海床30 cm实现固定,确保苗圃在风浪环境中稳固。采用扎带捆绑法进行珊瑚移植,将处理后的珊瑚小块与断枝均匀固定于苗圃网格上,相邻珊瑚样品间距≥15 cm,避免生长竞争与机械摩擦。(图1a)

2024年1月完成珊瑚移植后,随即于2024年1月至10月开展为期10个月的连续生长监测,核心监测指标包括:珊瑚存活率、珊瑚活组织投影面积、珊瑚活组织长度(仅针对枝状珊瑚)、实际光量子产量(ΦPS II)、呼吸速率及净光合速率,监测频率为每2个月1次。

2.3 不同形状人工礁体珊瑚移植

2.3.1 人工礁体设计

实验选用3种混凝土浇筑的人工礁体,具体规格如下:梯形人工礁(2 m×2 m×0.72 m)、桌形人工礁(2 m×1.5 m×0.65 m)及圆台人工礁(底面直径1.2 m、高1.1 m)(图1)。礁体表层预设直径2 cm、深度5 cm的珊瑚定植孔,其中梯形人工礁与桌形人工礁的定植孔布设于礁体顶面,圆台人工礁的定植孔则布设于顶面与侧面,

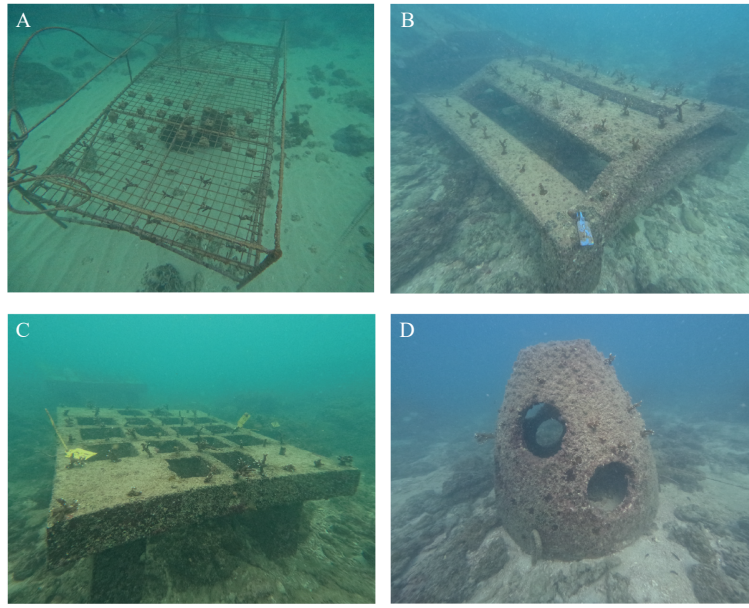


图 1 金属苗床及人工礁体的水下图片

Fig. 1 Underwater photographs of metal seedbeds and artificial reefs

(a) 金属苗床; (b) 梯形人工礁; (c) 桌形人工礁; (d) 圆台人工礁。

(a) metal seedbed; (b) Trapezoidal artificial reef; (c) Table-shaped artificial reef; (d) Truncated cone-shaped artificial reef.

用于珊瑚断枝的固定与定植。所有礁体均采用 C30 混凝土浇筑, 表面经粗糙化处理以提升生物附着性。

2.3.2 珊瑚移植与实验设计

选取生长状态一致的美丽鹿角珊瑚断枝作为移植材料。移植时将珊瑚断枝插入礁体预留的珊瑚定植孔(插入 1~2 cm), 采用双组分环氧树脂胶剂加固, 确保与礁体紧密贴合。

实验设计遵循随机对照与区组设计原则, 礁体投放前已开展现场底质、水深、水动力及沉积环境调查, 确保 3 种礁体布设区域水深(4~8 m)、底质类型、沉积条件与水动力环境高度一致。本实验选取梯形、桌形及圆台形人工礁体各 5 个, 每种礁体呈一字形排开布设, 同种礁体间距为 2 m, 不同类型礁体位置相邻、环境条件均质, 最大限度排除空间位置、水深、底质、水动力等环境因素对实验结果的干扰。每个人工礁体随机选取 20 株初始规格一致(4±0.5 cm)的美丽鹿角珊瑚。2024 年 1 月完成珊瑚移植后, 随即于 2024 年 1 月至 2025 年 6 月开展为期 18 个月的生长动态监测, 重点测定珊瑚存活率、纵向活组织长度及实际光量子产量; 呼吸速率与净光合速率指标在每种礁体中各选取 5 株珊瑚进行测定, 每 3 个月监测 1 次。

2.4 存活率与生长率测量

2.4.1 存活率监测

潜水记录珊瑚存活状态(组织完全脱离或整株丢失视为死亡), 存活率按以下公式计算:

$$\text{存活率: } S = \frac{N_n}{N_0} \times 100\%, \quad (1)$$

式中, S 为存活率(%), N_n 为调查时存活个体数, N_0 为初始移植个体总数。

2.4.2 活组织投影面积(活组织长度)测定

采用“水下摄影-图像分析法”测定活组织投影面积: 将不锈钢角尺(精度 0.1 cm)与珊瑚样品置于同一平面, 使用 Olympus Tough TG-6 相机垂直拍摄, 拍摄距离约为 30 cm, 确保光线均匀。实验室通过 ImageJ 1.8.0 软件分析照片中珊瑚活组织投影面积, 像素分辨率校准为 0.01 cm²。

针对枝状的风信子鹿角珊瑚与美丽鹿角珊瑚, 额外测量珊瑚活组织长度: 使用角尺(精度 0.1 cm)测量珊瑚最长分枝的活组织生长长度(根据珊瑚固定方式分为纵向活组织长度和横向活组织长度)。根据不同时期珊瑚增长量比较珊瑚生长增比, 生长速率与生长增比按以下公式计算:

$$\text{月平均生长速率: } G = \frac{S_n - S_{n-1}}{D} \times 30, \quad (2)$$

式中, G 为珊瑚月平均生长速率(cm²/月或 cm/月), S_n 为本次调查珊瑚活组织投影面积(或珊瑚活组织长度 L_n), S_{n-1} 为上次调查珊瑚活组织投影面积(或珊瑚活组织长度 L_{n-1}), D 为两次调查间隔天数。

$$\text{生长增比: } R_L = \frac{L_n - L_0}{L_0} \times 100\%, \quad (3)$$

式中, R_L 为活组织长度生长增比 L , %, L_n 为本次调查珊瑚活组织长度, L_0 为初始活组织长度。

2.5 生理指标测定

2.5.1 实际光量子产量测定

采用 DIVING-PAM-II 水下叶绿素荧光仪进行原位测定,该指标反映光系统 II (PS II) 反应中心实际原初光能捕获效率^[28]。苗圃实验中,对每种珊瑚的所有实验个体均进行测定;人工礁体实验中,每种礁体随机选取 5 株珊瑚进行测定。将光导纤维探头垂直对准珊瑚表面,调节电信号阻尼与增益参数,控制探头与珊瑚表面距离使 Ft 值稳定在 250~350 区间,点击 START 键启动测定,所获 Y (II) 值即为实际光量子产量。

2.5.2 呼吸速率与光合速率测定

采用珊瑚原位代谢测量仪 (CISME) 进行水下原位测定,苗圃实验中,每种珊瑚随机选取 3 株样品进行测定;人工礁体实验中,每种礁体随机选取 5 株珊瑚进行测定。测定完成后,导出 CISME 主机中的 csv 数据文件,导入仪器配套 Excel 数据处理表格,自动生成呼吸与光合过程中 O₂ 和 CO₂ 浓度变化趋势图。根据 O₂ 浓度变化斜率及以下公式计算呼吸速率 (R) 与光合速率 (P),珊瑚样品表面积采用铝箔法测定:

$$R(P) = \frac{K_{O_2} V \times 60}{A} \quad (4)$$

式中, R(P) 为呼吸(光合)作用速率 (μmol O₂·cm⁻²·h⁻¹),

K_{O₂} 为 O₂ 浓度变化的斜率, V 为循环水体体积 (L), A 为珊瑚样品表面积 (cm²)。

2.6 数据处理

通过 IBM SPSS Statistics 26 软件对数据进行正态分布检验、方差齐性检验及球形性检验 (Mauchly's Test of Sphericity),对珊瑚个体不同时间点的重复测量数据,采用重复测量方差分析 (Repeated-measures ANOVA) 分析时间效应、组间效应及二者交互效应,若不满足球形性检验则采用 Greenhouse-Geisser 校正;事后通过 Duncan's multiple comparison 多重比较法进行组间两两验证。所有实验数据以“均数±标准差 (SD)”表示,显著性水平设定为 P<0.05。使用 Origin 2025b 软件绘制数据图表,所有图像的整理、排版均在 Adobe Illustrator 2025 软件中进行。

3 结果与分析

3.1 苗圃中不同造礁石珊瑚的生长特性与生理响应

3.1.1 存活率与生长动态

10 个月连续监测结果显示,供试的 4 种造礁石珊瑚在涠洲岛北部退化珊瑚礁区均表现出良好的环境适应能力 (图 2),存活率均维持在 85% 以上,显示出该区域人工苗圃培育技术体系的有效性 (图 3a)。其中,风信



图 2 金属苗床上四种珊瑚的生长情况

Fig. 2 Growth performance of four coral species on metal seedbeds

(a) 澄黄滨珊瑚; (b) 十字牡丹珊瑚; (c) 风信子鹿角珊瑚; (d) 美丽鹿角珊瑚。

(a) *Porites lutea*; (b) *Pavona decussata*; (c) *Acropora hyacinthus*; (d) *Acropora muricata*.

子鹿角珊瑚与美丽鹿角珊瑚全程无死亡记录,存活率达 100%;澄黄滨珊瑚存活率为 90%;十字牡丹珊瑚死亡率相对最高,最终存活率为 85%,但仍处于较高水平。

生长表现上,两种鹿角珊瑚的生长优势极为显著(图 3b)。2024 年 1 月至 10 月实验期间,美丽鹿角珊瑚活组织投影面积从 11.9 cm² 增长至 166.3 cm²,风信子鹿角珊瑚活组织投影面积从 12.9 cm² 增长至 220.5 cm²,二者均实现十余倍增长,活组织投影面积显著高于十字牡丹珊瑚和澄黄滨珊瑚($P<0.05$),这与枝状珊瑚光合利用效率高、营养运输能力强的形态功能特性密切相关。从生长速率动态来看,4 种珊瑚的活组织投影面积生长趋势基本一致:1-4 月为生长适应期,所有珊瑚生长速率均低于 1 cm²/月;4-6 月进入快速生长期,风信子鹿角珊瑚与美丽鹿角珊瑚的生长速率显著提升($P<0.05$),且显著高于块状的澄黄滨珊瑚与片状的十字牡丹珊瑚($P<0.05$);8-10 月风信子鹿角珊瑚生长速率达到峰值,为 39.6 cm²/月,显著高于美丽鹿角珊瑚的 28.5 cm²/月($P<0.05$)。

金属苗床上枝状珊瑚为横向固定,针对枝状的风信子鹿角珊瑚与美丽鹿角珊瑚,额外测量珊瑚活组织长度(图 3c)。美丽鹿角珊瑚活组织长度从 7.4 cm 增长至 21.5 cm,风信子鹿角珊瑚活组织长度从 6.79 cm 增长至 18.2 cm,二者长度生长呈现相似的阶段性特征:1-4 月珊瑚生长缓慢,4-10 月生长速率显著上升($P<0.05$),4-6 月达到生长峰值,分别为 1.7 cm/月和 2.1 cm/月。值得注意的是,整个监测周期内,美丽鹿角珊瑚的活组织长度始终显著高于风信子鹿角珊瑚

($P<0.05$),且 6 月后每次监测的活组织长度均显著高于前一次($P<0.05$),体现出更稳定的持续增长潜力。

3.1.2 生理指标响应特征

不同造礁石珊瑚的光合系统功能、代谢强度及能量分配策略存在显著种间差异,其生理指标的时间动态的分化^[26],直观反映了各物种对涠洲岛近岸环境胁迫的适应能力差异(图 4)。

实际光量子产量作为表征珊瑚共生虫黄藻光合系统 II (PS II)活性的核心指标,其时间动态呈现明显的物种特异性(图 4a):澄黄滨珊瑚全程呈持续下降趋势,反映其光合系统对环境变化的耐受性较弱;十字牡丹珊瑚表现为“先降后升”的波动特征,体现一定的胁迫恢复潜力;风信子鹿角珊瑚在 8 月后趋于稳定,而美丽鹿角珊瑚 8 月后略有下降,显示两种鹿角珊瑚光合系统稳定性更优。值得注意的是,4 种珊瑚在 7 月的实际光量子产量均 >0.5 ,处于健康光合水平,且显著高于 10 月($P<0.05$),这与夏季高温导致的光合系统胁迫密切相关。

净光合速率的时间动态则显示(图 4b),后期(10 月)风信子鹿角珊瑚与美丽鹿角珊瑚的净光合速率显著高于另两种珊瑚($P<0.05$),且两种鹿角珊瑚均呈现“先降后升”的趋势。呼吸速率反映珊瑚基础代谢强度,其种间分化显著(图 4c),7 月时,风信子鹿角珊瑚与美丽鹿角珊瑚的呼吸速率显著高于澄黄滨珊瑚与十字牡丹珊瑚($P<0.05$),这与枝状珊瑚更高的生长需求和代谢活性相符;其中美丽鹿角珊瑚呼吸速率呈“先降后升”的波动特征,提示其可通过调控代谢强度

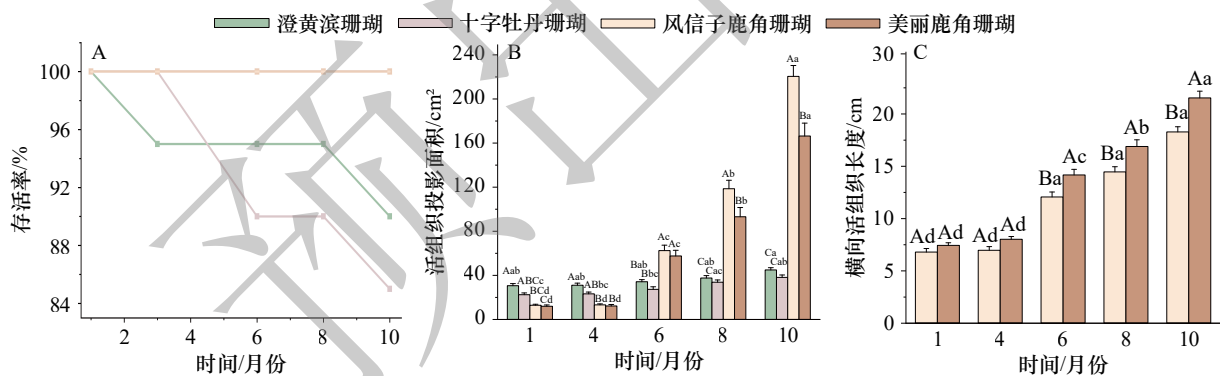


图 3 金属苗床上四种珊瑚存活及生长情况

Fig. 3 Survival and growth performance of four coral species on metal seedbed

(a) 珊瑚存活率; (b) 珊瑚活组织投影面积; (c) 两种鹿角珊瑚横向活组织长度。(注: 误差线为样本值的标准偏差。大写字母 A/B/C 表示同一时间点不同珊瑚物种间差异显著($P<0.05$); 小写字母 a/b/c 表示同一物种不同时间点间差异显著($P<0.05$)。统计分析采用重复测量方差分析(Repeated-measures ANOVA)与 Duncan 多重比较。)

(a) Coral survival rate; (b) Projected area of coral living tissue; (c) Horizontal live tissue length of two Acropora coral species. (Note: Error bars represent the standard deviation (SD) of the sample means. Uppercase letters (A/B/C) indicate significant differences among coral species at the same time point ($P<0.05$); lowercase letters (a/b/c) indicate significant differences within the same coral species across different time points ($P<0.05$). Statistical analyses were performed using repeated-measures ANOVA followed by Duncan's multiple comparison test.)

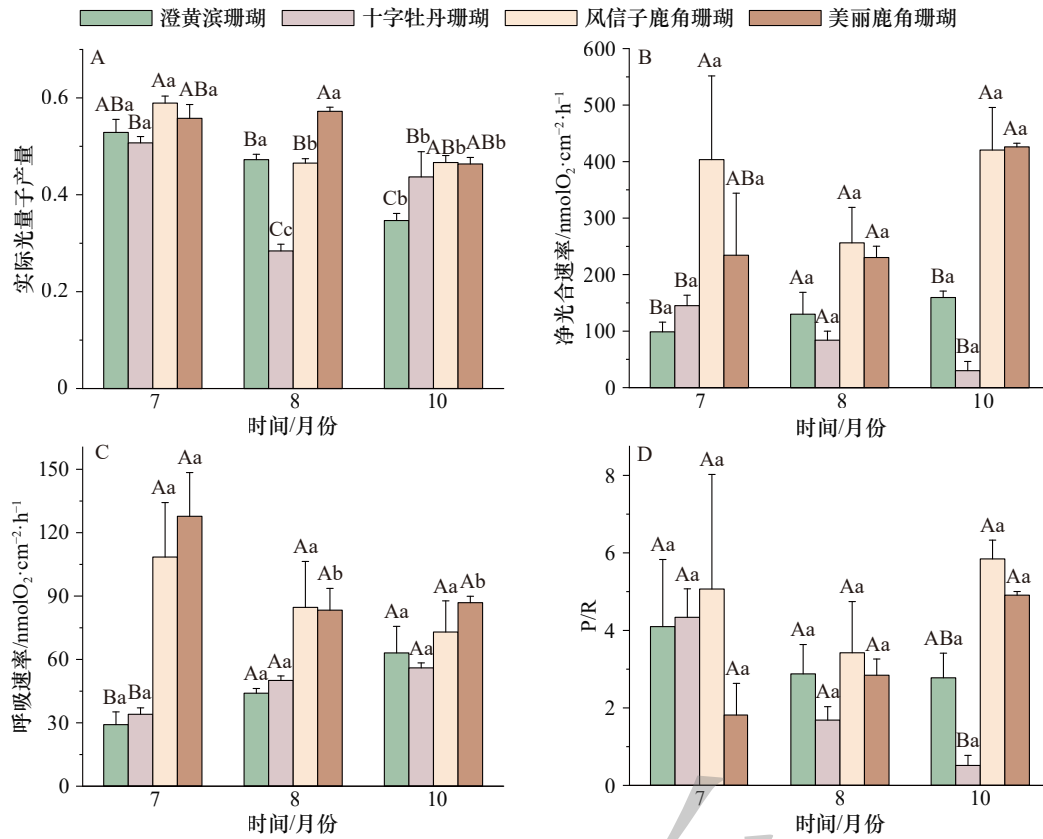


图 4 四种珊瑚生理指标变化

Fig. 4 Changes in Coral Physiological Indicators

(a)实际光子产量;(b)净光合作用速率;(c)呼吸速率;(d)总光合速率与呼吸速率的比值。(注:误差线为样本值的标准偏差。大写字母 A/B/C 表示同一时间点不同珊瑚物种间差异显著 ($P<0.05$);小写字母 a/b/c 表示同一物种不同时间点间差异显著 ($P<0.05$)。统计分析采用重复测量方差分析 (Repeated-measures ANOVA) 与 Duncan 多重比较。)

(a) Actual quantum yield; (b) Photosynthesis rate; (c) Respiration rate; (d) Ratio of photosynthesis rate to respiration rate. (Note: Error bars represent the standard deviation (SD) of the sample means. Uppercase letters (A/B/C) indicate significant differences among coral species at the same time point ($P<0.05$); lowercase letters (a/b/c) indicate significant differences within the same coral species across different time points ($P<0.05$). Statistical analyses were performed using repeated-measures ANOVA followed by Duncan's multiple comparison test.)

应对环境变化。

光合速率与呼吸速率比值(P/R)直接反映珊瑚的能量积累能力,其种间差异与时间趋势进一步凸显了物种适应策略的分化(图 4d):风信子鹿角珊瑚全程维持最高 P/R 水平,能量积累优势显著;十字牡丹珊瑚 8-10 月 P/R 值最低,且 10 月显著低于两种鹿角珊瑚 ($P<0.05$),能量供给不足限制其生长潜力。时间趋势上,澄黄滨珊瑚、十字牡丹珊瑚 P/R 呈持续下降,提示其能量积累能力随环境变化逐渐弱化;风信子鹿角珊瑚呈“先降后升”,而美丽鹿角珊瑚持续上升,表明后者在长期监测中能量分配策略更优,更利于生长与抵抗环境压力。

3.2 不同形状人工礁体对美丽鹿角珊瑚生长与抗逆性的影响

3.2.1 存活率与生长速率差异

18 个月原位移植监测结果表明,人工礁体构型对

美丽鹿角珊瑚的存活率、生长状态及形态建成具有显著调控作用,不同构型礁体间差异显著(图 5)。生长形态特征方面,三种礁体上珊瑚的生长表现与损伤修复能力呈现显著分化:梯形人工礁(图 5a)上珊瑚生长表现最优,得益于其结构稳定性与良好的水流交换条件,珊瑚从基底萌发新枝干,形成密集的灌木状构型,其投影面积与附着稳固性均显著优于其他两种礁体;桌形人工礁(图 5b)珊瑚生长异质性显著,部分个体主干能正常萌发分枝并实现快速生长,但另有部分个体受礁体平面结构导致的沉积物堆积影响,生长缓慢甚至死亡,最终整体覆盖度较低;圆台人工礁(图 5c)的侧面移植缺乏有效防护,易受浪流携带的沙石撞击,导致珊瑚生长受限,主干分枝数量少,仅能在移植或折损个体的基底萌发少量侧枝,整体生长态势平缓。

从存活率来看,2024 年 1 月至 2025 年 6 月的连



图 5 三种人工礁体上美丽鹿角珊瑚生长情况

Fig. 5 Growth performance of *Acropora muricata* on three types of artificial reefs

(a) 梯形人工礁; (b) 桌形人工礁; (c) 圆台人工礁。

(a) Trapezoidal artificial reef; (b) Table-shaped artificial reef; (c) Truncated cone-shaped artificial reef.

续监测显示, 梯形人工礁上珊瑚表现出最优的存活稳定性, 最终存活率高达 92%; 圆台人工礁次之, 存活率为 77%; 桌形人工礁存活率最低, 仅为 60%(图 6a)。值得注意的是, 随监测周期推进, 三种礁体间的存活率差异呈逐步扩大趋势, 反映出不同构型礁体在长期环境胁迫下的稳定性差异, 也印证了礁体结构设计对珊瑚存活的关键支撑作用。

珊瑚长度生长动态呈现明显的阶段性特征: 三种礁体上珊瑚长度生长增比(图 6b)均表现为“先升后降再升”的趋势, 且在 2024 年 6 月均实现约 1 倍的长度增长, 其中圆台人工礁珊瑚此时段生长增比最高。2024 年 6-10 月, 受夏季高温与超强台风“摩羯”胁迫影响, 三种礁体上珊瑚长度均出现负增长(图 6c); 2024 年 10 月至 2025 年 1 月, 圆台人工礁上珊瑚仍维

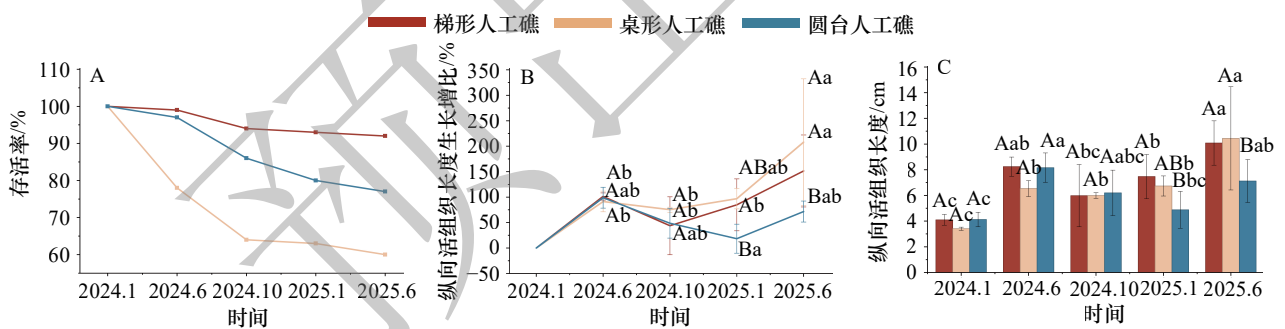


图 6 三种人工礁体上美丽鹿角珊瑚存活及生长情况

Fig. 6 Survival and growth performance of *Acropora muricata* on three types of artificial reefs

(a) 珊瑚存活率; (b) 珊瑚活组织长度生长增比; (c) 珊瑚纵向活组织长度。(注: 误差线为样本值的标准偏差。大写字母 A/B/C 表示同一时间点不同珊瑚物种间差异显著 ($P < 0.05$); 小写字母 a/b/c 表示同一物种不同时间点间差异显著 ($P < 0.05$)。统计分析采用重复测量方差分析 (Repeated-measures ANOVA) 与 Duncan 多重比较。)

(a) Coral survival rate; (b) Growth increment ratio of coral living tissue length; (c) Coral live tissue length. (Note: Error bars represent the standard deviation (SD) of the sample means. Uppercase letters (A/B/C) indicate significant differences among coral species at the same time point ($P < 0.05$); lowercase letters (a/b/c) indicate significant differences within the same coral species across different time points ($P < 0.05$). Statistical analyses were performed using repeated-measures ANOVA followed by Duncan's multiple comparison test.)

持负增长态势,而梯形与桌形人工礁珊瑚逐步恢复生长。2025年6月统计显示,圆台人工礁上珊瑚平均纵向长度显著低于其余两种礁体($P<0.05$),梯形人工礁与桌形人工礁上珊瑚最终平均纵向长度无显著差异($P>0.05$),但梯形人工礁珊瑚的生长稳定性与形态完整性更优。

3.2.2 生理指标对礁体形状响应

不同形状人工礁体通过调控珊瑚生长微环境,显著影响珊瑚光合系统功能、钙化代谢及能量分配策略,各生理指标对礁体形状的响应呈现显著特异性(图7)。实际光量子产量作为反映珊瑚共生虫黄藻光合系统II(PS II)活性的核心指标^[28],时间动态呈明显礁体依赖性阶段性特征(图7a)。2024年7-10月,三种礁体珊瑚实际光量子产量均呈“先降后升”的胁迫响应:7月均处于较高水平,8月受高温胁迫显著下降($P<0.05$),其中桌形人工礁珊瑚实际光量子产量降至 0.42 ± 0.03 (<0.5 ,表明光合系统受胁迫显著),显著低于梯形人工礁(0.55 ± 0.02 , $P<0.05$);10月水温回落,

桌形人工礁与圆台礁实际光量子产量显著回升($P<0.05$),梯形人工礁维持稳定。2025年2-5月,三者均呈“先升后降”趋势,5月达峰值,且显著高于2月($P<0.05$),梯形人工礁峰值持续时间更长,光合系统稳定性更优。

净光合速率的形状依赖性差异更为显著(图7b)。2024年梯形人工礁珊瑚净光合速率持续上升,9月显著高于7月($P<0.05$),光合适应能力更强;桌形人工礁珊瑚7月净光合速率最高,显著高于梯形人工礁($P<0.05$),但8月后持续下降,9月显著低于梯形人工礁($P<0.05$);圆台人工礁无显著时间变化($P>0.05$)。2025年2至4月三者相近且逐步上升($P>0.05$),5月梯形人工礁与桌形人工礁显著高于4月($P<0.05$)。

呼吸速率反映珊瑚基础代谢强度,动态变化具明显礁体特异性(图7c)。桌形与圆台人工礁珊瑚呼吸速率呈“先升后降”趋势,8月高温胁迫降至最低,其中桌形人工礁8月呼吸速率显著低于7月($P<0.05$);梯形人工礁珊瑚呼吸速率逐步下降,7-8月显著降低

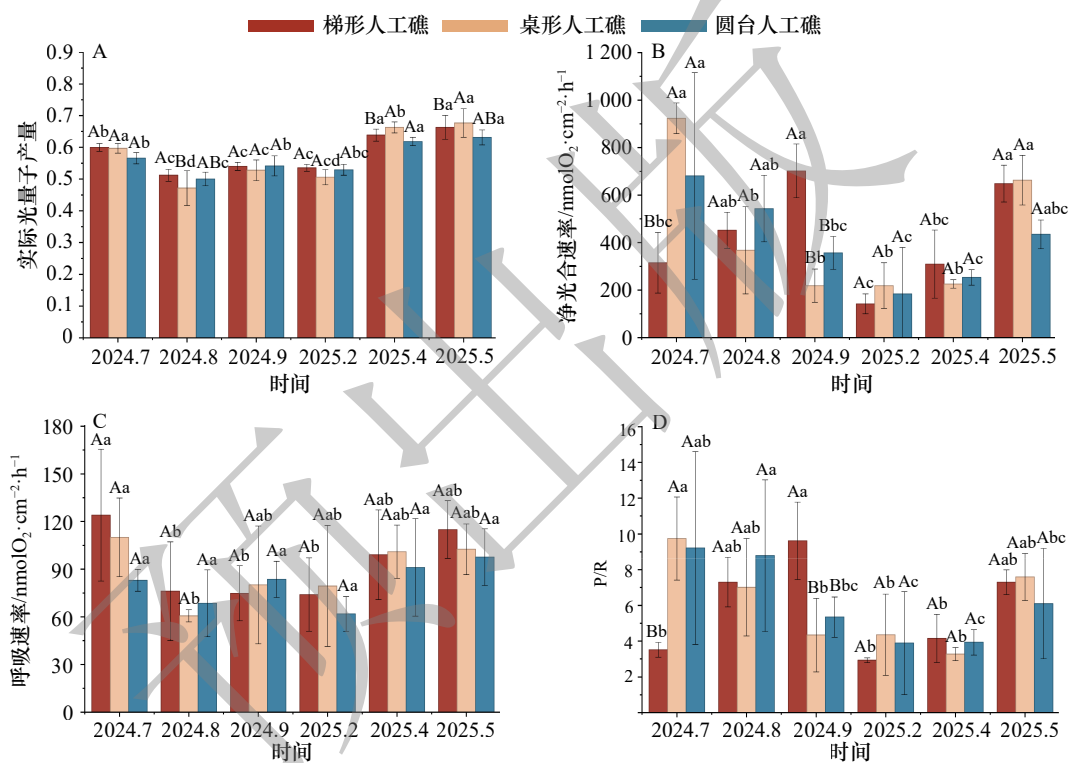


图7 不同礁体上美丽鹿角珊瑚的生理指标变化

Fig. 7 Variations in physiological indices of *Acropora muricata* on different reef types

(a)实际光量子产量;(b)净光合作用速率;(c)呼吸速率;(d)总光合速率与呼吸速率的比值。(注:误差线为样本值的标准偏差。大写字母A/B/C表示同一时间点不同珊瑚物种间差异显著($P<0.05$);小写字母a/b/c表示同一物种不同时间点间差异显著($P<0.05$)。统计分析采用重复测量方差分析(Repeated-measures ANOVA)与Duncan多重比较。)

(a) Actual quantum yield; (b) Net photosynthesis rate; (c) Respiration rate; (d) Ratio of photosynthesis rate to respiration rate. (Note: Error bars represent the standard deviation (SD) of the sample means. Uppercase letters (A/B/C) indicate significant differences among coral species at the same time point ($P<0.05$); lowercase letters (a/b/c) indicate significant differences within the same coral species across different time points ($P<0.05$). Statistical analyses were performed using repeated-measures ANOVA followed by Duncan's multiple comparison test.)

($P < 0.05$), 随后维持稳定。2025年2月三者均达最低值, 之后逐步上升, 梯形人工礁呼吸速率始终处于中等水平, 代谢稳定性突出。

光合速率与呼吸速率比值(P/R)反映珊瑚能量积累能力, 进一步凸显礁体形状的调控作用(图7d)。梯形人工礁珊瑚P/R持续上升, 2024年7月显著低于桌形人工礁与圆台礁, 10月上升并高于其余两种礁体; 桌形人工礁与圆台礁P/R整体呈“先升后降”趋势, 圆台人工礁波动更明显, 桌形人工礁能量积累恢复较慢。2025年环境适宜期, 梯形人工礁P/R始终维持较高水平, 能量供给与生长潜力更优。

4 讨论

4.1 涠洲岛珊瑚礁修复的适宜物种筛选

4.1.1 四种造礁石珊瑚生长差异

存活率与生长速率是表征珊瑚礁修复成效的关键指标, 直接决定修复效率与生态系统稳定性^[29]。本研究中美丽鹿角珊瑚和风信子鹿角珊瑚10个月内存活率均达100%, 块状澄黄滨和片状十字牡丹珊瑚存活率亦超85%, 显著高于西沙赵述岛($< 10%$)^[30]、三亚(约60%)^[31]等海域同类实验的结果, 这与修复技术体系优化密切相关。扎带捆绑法操作便捷、附着稳定性强, 可降低风浪环境中珊瑚断枝脱落风险^[32]; 钢筋铁丝网构建的金属苗床兼具透水性与抗风浪能力, 适配近岸动态环境^[33], 二者协同支撑了珊瑚的高存活表现。

造礁石珊瑚生长潜力与其形态功能特性密切相关^[34], 枝状珊瑚因营养运输效率高、光照利用面积大, 生长速率普遍优于块状、片状类群^[17], 本研究结果与之契合。风信子鹿角珊瑚以平面横向生长为主, 生长速率峰值更高, 利于快速覆盖礁体; 美丽鹿角珊瑚呈立体纵向生长, 灌木状形态可构建复杂三维微生境, 为礁栖生物提供栖息庇护, 生态功能更具综合性。结合存活稳定性、形态建成、抗逆恢复能力及与人工礁体的适配性, 美丽鹿角珊瑚综合表现更优, 可作为涠洲岛及同类海域核心修复物种。

单一物种修复易导致群落结构单一化, 会增加疾病传播与极端环境扰动风险。故可采用核心种结合辅助种混合修复模式, 以美丽鹿角珊瑚为核心构建三维礁体结构, 搭配风信子鹿角珊瑚提升覆盖效率, 辅以十字牡丹珊瑚、澄黄滨珊瑚增强群落抗逆性, 形成结构复杂、功能互补的修复群落, 保障生态系统长期稳定性。

4.1.2 四种造礁石珊瑚生理指标分析

实际光量子产量是珊瑚光合系统II(PS II)活性

的敏感指示器, 其波动直接反映环境胁迫强度^[35]。本研究中8月部分珊瑚实际光量子产量显著下降(< 0.5), 与涠洲岛夏季近岸海域水温升高(平均29.8℃)密切相关——水温升高会抑制PS II反应中心活性, 降低光能转化效率, 与Higuchi等^[36]研究结论一致。同期珊瑚生长速率及钙化率同步降低, 印证了“海水升温削弱珊瑚钙化酶活性”的认知^[37], 提示珊瑚能量分配已从“生长积累”向“胁迫抵抗”偏移。

2024年9月16级台风“摩羯”引发的机械损伤与沉积物覆盖, 进一步重构了珊瑚能量分配策略。台风导致的组织损伤需消耗大量能量修复, 沉积物覆盖增加了珊瑚清理代谢成本^[38]。种间差异上, 枝状鹿角珊瑚高生长需求依赖更高光合-呼吸代谢水平^[39-40], 但对高温、机械损伤敏感性更强, 8月两种鹿角珊瑚光合与呼吸速率显著下降, 而澄黄滨珊瑚、十字牡丹珊瑚代谢指标无明显波动, 可能是因为块状珊瑚组织厚度大、能量储存策略优, 对短期环境波动耐受性更强^[40]。

珊瑚共生体系可通过动态调整实际光量子产量、光合与呼吸速率等关键生理指标, 优化能量分配应对高温、台风等环境胁迫, 但长期持续胁迫会显著削弱其生长潜力。

4.2 台风频发海域人工礁体的优化方向与适配性机制

热带、亚热带台风频发海域的珊瑚礁修复, 核心难点在于如何抵御极端气候扰动、优化珊瑚生长微环境^[41]。人工礁体作为珊瑚移植的关键载体, 其构型特征(形状、结构稳定性)直接决定微环境调控能力, 进而影响珊瑚附着、生长及抗逆性^[19]。

从抗台风稳定性来看, 极端气候事件对礁体结构及珊瑚存活的扰动尤为突出。本研究采用C30混凝土浇筑并辅以钢钎锚固(嵌入海床30 cm)的设计, 显著提升了礁体整体抗风浪能力, 有效降低了台风导致的礁体失稳、倾斜风险, 避免了因礁体损坏引起的珊瑚丢失。同时, 46~110 cm的移植高度设计, 避开了近海底质沉积物堆积带, 大幅降低了珊瑚被泥沙掩埋、机械磨损的概率^[42]。对比底播礁石上小型珊瑚因沉积物覆盖、砂石扰动导致的生长受限问题, 人工礁体通过微环境调控, 为珊瑚生长提供了相对稳定的庇护空间, 凸显了针对性设计的实践价值。监测结果显示, 3种人工礁体上珊瑚平均存活率达82.33%, 其中梯形人工礁珊瑚存活率高达92%, 显著高于圆台(77%)与桌形(60%), 证明了礁体结构设计的合理性与抗逆性优势。生理指标层面, 2024年8月高温期, 桌形人工礁珊瑚实际光量子产量仅为 0.42 ± 0.03 (< 0.5), 表明光合系统受胁迫显著, 而梯形人工礁珊瑚该指

标达 0.55 ± 0.02 , 显著高于其余两种礁体 ($P < 0.05$), 反映其光合系统稳定性更强, 抗高温胁迫能力更优。

水流动力学特性是调控珊瑚生长微环境的核心因素, 直接影响营养盐输送、代谢废物排出及沉积物清理效率^[43]。涠洲岛所在的北部湾北部近岸海域以不规则半日潮为主, 该区域受冬季东北季风、夏季西南季风与台风的叠加影响, 浪流耦合作用显著, 近岸礁区因地形遮蔽易形成水流滞缓区与沉积物堆积带。已有流场模拟研究表明, 梯形人工礁的拱形导流结构可通过改变局部流场梯度, 使礁体周围形成稳定的绕流与上升流, 相较于平面或圆柱形礁体结构, 其礁体表面水流交换效率可有效提升^[44]。本研究中梯形人工礁的拱形结构具备更优的导流特性, 能够将主流向水流均匀导流至礁体各定植面, 形成稳定且流速适宜的水流场, 既保障了珊瑚光合作用所需的充足溶解氧与营养盐运输, 又能通过持续的水流动力降低礁体表面沉积物滞留率、促进沉积物再悬浮与运输, 避免沉积物覆盖珊瑚光合组织, 同时有效减少附生藻类的竞争压力。而桌形人工礁的平面结构易导致局部水流滞缓, 沉积物堆积风险升高, 圆台人工礁的侧面移植面缺乏有效水流缓冲, 易受风浪携带的泥沙撞击, 二者均难以形成适宜珊瑚生长的稳定微环境^[20], 这也是其珊瑚存活率与生长状态不及梯形人工礁的重要原因。

台风后的损伤恢复能力, 是衡量人工礁体适配性的关键指标。2024年9月台风“摩羯”扰动后, 梯形人工礁上保留生长点的珊瑚几乎全部实现损伤修复, 且在原有生长点基础上萌发多个枝干, 形成灌木状生长形态, 显著提升了珊瑚自身的结构稳定性与抗干扰能力。生理指标监测显示, 该礁体珊瑚在10月光合速率与呼吸速率比值(P/R)显著高于其余两种礁体, 表明其能量积累能力与损伤恢复潜力更优。这一优势源于两方面: 一是梯形人工礁体结构稳定性强, 减少了台风导致的二次损伤; 二是优良的水流交换特性,

适合美丽鹿角珊瑚的生长偏好。此外, 梯形人工礁上珊瑚分枝萌发数量更多, 能够加速礁体三维结构构建, 进而提升修复区生态系统的复杂性与稳定性, 为礁栖生物提供更多栖息庇护空间, 推动修复群落向更成熟的生态状态演替。

需强调的是, 本研究中3种礁体直接暴露于台风等自然胁迫环境, 珊瑚生长不可避免受到极端气候影响, 最终长度处于相对较低水平, 但梯形人工礁与桌形人工礁上珊瑚最终长度相近, 且均显著高于圆台人工礁, 进一步印证了梯形人工礁体在保障珊瑚生长潜力方面的优势。

5 结论

本研究以涠洲岛北部退化珊瑚礁区为对象, 通过10个月人工苗圃培育监测与18个月不同形状人工礁体移植实验, 系统探究了造礁石珊瑚生长适配性、环境胁迫响应及人工礁体优化方向。结果表明, 4种供试珊瑚存活率均达85%以上, 美丽鹿角珊瑚与风信子鹿角珊瑚存活率均为100%, 风信子鹿角珊瑚生长速率优势明显, 美丽鹿角珊瑚在存活稳定性、三维形态建成、抗逆恢复及与人工礁体适配性方面综合表现更优, 是该区域核心修复物种; 扎带捆绑移植方式与金属苗床适配近岸环境, 保障了育苗成效。面对高温、台风等环境胁迫, 珊瑚可通过调控实际光量子产量等生理指标优化能量分配, 进而增强自身抗逆能力。3种混凝土人工礁体中, 梯形人工礁稳定性与水流交换条件最优, 18个月珊瑚存活率达92%, 显著高于圆台人工礁(77%)和桌形人工礁(60%), 且抗干扰与损伤恢复能力更强。综上, 本研究确立了以“美丽鹿角珊瑚为修复物种、扎带捆绑为固定方式、金属苗床为培育载体、梯形人工礁体为定居基底”的珊瑚礁生态修复模式, 为涠洲岛及我国南方沿海热带、亚热带台风频发海域的珊瑚礁生态修复提供了科学依据与可复制的实践参考。

参考文献:

- [1] Rottmueller M E, Storlazzi C D, Frick F. Coral reef restoration can reduce coastal contamination and pollution hazards[J]. *Communications Earth & Environment*, 2025, 6(1): 50.
- [2] 余克服. 珊瑚礁科学概论[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
Yu Kefu. Introduction to the Science of Coral Reefs[M]. Beijing: Science Press, 2018.
- [3] 赵美霞, 余克服, 张乔民. 珊瑚礁区的生物多样性及其生态功能[J]. *生态学报*, 2006, 26(1): 186-194.
Zhao Meixia, Yu Kefu, Zhang Qiaomin. Review on coral reefs biodiversity and ecological function[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(1): 186-194.
- [4] Pockley P. Global warming identified as main threat to coral reefs[J]. *Nature*, 2000, 407(6807): 932-932.
- [5] Bellwood D R, Hughes T P, Folke C, et al. Confronting the coral reef crisis[J]. *Nature*, 2004, 429(6994): 827-833.
- [6] Hughes T P, Barnes M L, Bellwood D R, et al. Coral reefs in the Anthropocene[J]. *Nature*, 2017, 546(7656): 82-90.

- [7] Eddy T D, Lam V W Y, Reygondeau G, et al. Global decline in capacity of coral reefs to provide ecosystem services[J]. *One Earth*, 2021, 4(9): 1278–1285.
- [8] Carpenter K E, Abrar M, Aeby G, et al. One-third of reef-building corals face elevated extinction risk from climate change and local impacts[J]. *Science*, 2008, 321(5888): 560–563.
- [9] Rinkevich B. Restoration strategies for coral reefs damaged by recreational activities: the use of sexual and asexual recruits[J]. *Restoration Ecology*, 1995, 3(4): 241–251.
- [10] Rinkevich B. Steps towards the evaluation of coral reef restoration by using small branch fragments[J]. *Marine Biology*, 2000, 136(5): 807–812.
- [11] 余克服. 南海珊瑚礁及其对全新世环境变化的记录与响应[J]. 中国科学: 地球科学, 2012, 42(8): 1160–1172.
Yu Kefu. Coral reefs in the South China Sea: their response to and records on past environmental changes[J]. *Science China Earth Sciences*, 2012, 55(8): 1217–1229.
- [12] Huang Dawei, 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.
- [13] 王文欢. 近 30 年来北部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.
Wang Wenhuan. Evolution and influential factors of coral community over past three decades in Weizhou Island reef, Beibu Gulf[D]. Nanning: Guangxi University, 2017.
- [14] 王文欢, 余克服, 王英辉. 北部湾涠洲岛珊瑚礁的研究历史、现状与特色[J]. 热带地理, 2016, 36(1): 72–79.
Wang Wenhuan, Yu Kefu, Wang Yinghui. A review on the research of coral reefs in the Weizhou Island, Beibu Gulf[J]. *Tropical Geography*, 2016, 36(1): 72–79.
- [15] Epstein N, Bak R P M, Rinkevich B. Strategies for gardening denuded coral reef areas: the applicability of using different types of coral material for reef restoration[J]. *Restoration Ecology*, 2001, 9(4): 432–442.
- [16] Epstein N, Bak R P M, Rinkevich B. Applying forest restoration principles to coral reef rehabilitation[J]. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 2003, 13(5): 387–395.
- [17] Soong K, Chen T A. Coral transplantation: regeneration and growth of *Acropora* fragments in a nursery[J]. *Restoration Ecology*, 2003, 11(1): 62–71.
- [18] Williams S L, Sur C, Janetski N, et al. Large-scale coral reef rehabilitation after blast fishing in Indonesia[J]. *Restoration Ecology*, 2019, 27(2): 447–456.
- [19] 黄钰准, 张军, 黄晖, 等. 系统设计视角下的珊瑚移植用人工礁体设计[J]. 设计, 2023, 36(10): 143–147.
Huang Yuzhun, Zhang Jun, Huang Hui, et al. Artificial reef design from the perspectives of systematic design[J]. *Design*, 2023, 36(10): 143–147.
- [20] 王磊. 人工鱼礁的优化设计和礁区布局的初步研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2007.
Wang Lei. Primary study on optimize design and distribution of the artificial reef[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2007.
- [21] Connell S D, Glasby T M. Do urban structures influence local abundance and diversity of subtidal epibiota? A case study from Sydney Harbour, Australia[J]. *Marine Environmental Research*, 1999, 47(4): 373–387.
- [22] Anderson M J, Underwood A J. Effects of substratum on the recruitment and development of an intertidal estuarine fouling assemblage[J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 1994, 184(2): 217–236.
- [23] Al-Horani F A. Sustainable resources of corals for the restoration of damaged coral reefs in the Gulf of Aqaba, Red Sea[J]. *Life Science Journal*, 2013, 10(3): 352–360.
- [24] Peixoto R S, Voolstra C R, Baums I B, et al. The critical role of coral reef restoration in a changing world[J]. *Nature Climate Change*, 2024, 14(12): 1219–1222.
- [25] Gibbs M T, Gibbs B L, Newlands M, et al. Scaling up the global reef restoration activity: avoiding ecological imperialism and ongoing colonialism[J]. *PLoS One*, 2021, 16(5): e0250870.
- [26] Platz M C, Arias M E, Byrne R H. Reef metabolism monitoring methods and potential applications for coral restoration[J]. *Environmental Management*, 2022, 69(3): 612–625.
- [27] Ladd M C, Miller M W, Hunt J H, et al. Harnessing ecological processes to facilitate coral restoration[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2018, 16(4): 239–247.
- [28] 周洁, 施祺, 余克服. 三亚造礁石珊瑚虫黄藻光合作用效率的日周期及其调控因素[J]. 热带海洋学报, 2014, 33(1): 81–89.
Zhou Jie, Shi Qi, Yu Kefu. Exploration of factors that influence photosynthetic efficiency of symbiotic zooxanthellae of scleractinian corals in a Sanya fringing reef[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2014, 33(1): 81–89.
- [29] 郑新庆, 张涵, 陈彬, 等. 珊瑚礁生态修复效果评价指标体系研究进展[J]. 应用海洋学学报, 2021, 40(1): 126–141.
Zheng Xinqing, Zhang Han, Chen Bin, et al. Advance of indicator system for the evaluation of coral reef restoration effectiveness[J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2021, 40(1): 126–141.
- [30] 李元超, 兰建新, 郑新庆, 等. 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, 2014, 33(3): 348–353.
Li Yuanchao, Lan Jianxin, Zheng Xinqing, et al. Preliminary assessment of the coral reef restoration in areas of Zhaoshu Island, Xiasha Islands[J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2014, 33(3): 348–353.

- [31] 陈刚,熊仕林,谢菊娘,等. 三亚水域造礁石珊瑚移植试验研究[J]. 热带海洋, 1995, 14(3): 51–57.
Chen Gang, Xiong Shilin, Xie Juniang, et al. A study on the transplantation of reef-building corals in Sanya waters, Hainan province[J]. *Tropic Oceanology*, 1995, 14(3): 51–57.
- [32] García-Baciero A, García-Herrero A, Horcajo-Berná E, et al. The art of sticking: attaching methods affect direct transplantation success[J]. *Thalassas: An International Journal of Marine Sciences*, 2024, 40(1): 133–145.
- [33] 王欣,高霆炜,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.
Wang Xin, Gao Tingwei, Chen Xiao, et al. The construction and transplantation of coral gardening nursery in Weizhou Island[J]. *Guangxi Sciences*, 2017, 24(5): 462–467.
- [34] Holbrook S J, Brooks A J, Schmitt R J. Variation in structural attributes of patch-forming corals and in patterns of abundance of associated fishes[J]. *Marine and Freshwater Research*, 2003, 53(7): 1045–1053.
- [35] Chabanet P, Ralambondrainy H, Amanieu M, et al. Relationships between coral reef substrata and fish[J]. *Coral Reefs*, 1997, 16(2): 93–102.
- [36] Higuchi T, Yuyama I, Nakamura T. The combined effects of nitrate with high temperature and high light intensity on coral bleaching and antioxidant enzyme activities[J]. *Regional Studies in Marine Science*, 2015, 2: 27–31.
- [37] McNeil B I, Matear R J, Barnes D J. Coral reef calcification and climate change: the effect of ocean warming[J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(22): L22309.
- [38] Li Xiubao, Huang Hui, Lian Jiansheng, et al. Coral community changes in response to a high sedimentation event: a case study in southern Hainan Island[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(9): 1028–1037.
- [39] Borell E M, Yuliantri A R, Bischof K, et al. The effect of heterotrophy on photosynthesis and tissue composition of two scleractinian corals under elevated temperature[J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2008, 364(2): 116–123.
- [40] Dellisanti W, Tsang R H L, Ang P Jr, et al. Metabolic performance and thermal and salinity tolerance of the coral *Platygyra carnosa* in Hong Kong waters[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2020, 153: 111005.
- [41] White K N, Weinstein D K, Ohara T, et al. Shifting communities after typhoon damage on an upper mesophotic reef in Okinawa, Japan[J]. *PeerJ*, 2017, 5: e3573.
- [42] van Treeck P, Schuhmacher H. Artificial reefs created by electrolysis and coral transplantation: an approach ensuring the compatibility of environmental protection and diving tourism[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1999, 49 Suppl 1: 75–81.
- [43] Nakamura T, van Woesik R. Water-flow rates and passive diffusion partially explain differential survival of corals during the 1998 bleaching event[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2001, 212: 301–304.
- [44] 唐衍力,龙翔宇,王欣欣,等. 中国常用人工鱼礁流场效应的比较分析[J]. 农业工程学报, 2017, 33(8): 97–103.
Tang Yanli, Long Xiangyu, Wang Xinxin, et al. Comparative analysis on flow field effect of general artificial reefs in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(8): 97–103.

Study on Growth Characteristics of Hermatypic Stony Corals and Their Compatibility with Artificial Reefs in Weizhou Island, Guangxi

Wang Mingwei¹, Zhou Yupeng^{1,2}, Huang Xueyong¹, Peng Mengjiao¹, Huang Guangxian^{1,2}, Wan Qiang^{1,2},
Tan Ronghua¹, Lin Wenbin³, Yu Kefu^{1,4}, Huang Wen¹

(1. Key Laboratory of South China Sea Coral Reef Research of Guangxi / Coral Reef Research Center / College of Oceanography, Guangxi University, Nanning 530004, Guangxi, China; 2. College of Resources, Environment and Materials, Guangxi University, Nanning 530004, Guangxi, China; 3. Guangxi Beihai Weizhou Island Culture and Tourism Group Co., Ltd., Beihai 536004, Guangxi, China; 4. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou), Guangzhou 511458, Guangdong, China)

Abstract: Coral reef ecological restoration is internationally recognized as a pivotal technology and essential approach to reverse the degradation trend of coral reefs, which requires selecting native coral species for restoration and matched artificial reefs based on local conditions. Taking the degraded coral reef area of Weizhou Island, Guangxi as the research object, this study systematically investigated the growth adaptability of hermatypic stony corals and their compatibility with artificial reefs through a 10-month monitoring program of artificial nursery cultivation and an 18-month transplantation experiment involving three types of concrete artificial reefs (trapezoidal, table-shaped, and truncated conical). The results showed that the 10-month survival rates of all four tested coral

species exceeded 85%. Both *Acropora muricata* and *Acropora hyacinthus* achieved 100% survival. *Acropora hyacinthus* exhibited a higher growth rate of living tissue projection area during some periods, while *Acropora muricata* performed better comprehensively in terms of survival stability, three-dimensional morphology formation, and engineering application potential, and can be used as the core restoration species. Among the three types of artificial reefs, the 18-month survival rate of corals on the trapezoidal artificial reef reached 92%, which was significantly higher than that on the truncated conical reef (77%) and the table-shaped reef (60%). Under environmental stress, physiological indicators including effective quantum yield and net photosynthetic rate showed significant specific responses to reef shapes, with the trapezoidal artificial reef demonstrating superior resistance to high temperature and typhoon stress as well as stronger damage recovery capability. The coral reef ecological restoration model established in this study—featuring *Acropora muricata* as the main restoration species, cable tie binding as the fixation method, metal seedbeds as the cultivation carrier, and trapezoidal artificial reefs as the colonization substrate—provides a scientific basis and practical technical reference for coral reef ecological restoration in typhoon-prone subtropical marine areas of China.

Key words: Hermatypic stony corals; Artificial reefs; Coral transplantation; Ecological restoration; Weizhou Island

