

李璐瑶, 李文涛, 李艳平, 等. 钢—混立方体人工藻礁附着生物的定殖效果及其群落演替特征研究[J]. 海洋学报, 2026, 48(x): 1–15, doi:
LI Lu-yao, LI Wen-tao, LI Yan-ping, et al. Study on the colonization dynamics and successional trajectories of sessile organisms on steel-concrete cubic artificial algal reefs[J]. Haiyang Xuebao, 2026, 48(x): 1–15, doi:

钢—混立方体人工藻礁附着生物的定殖效果及其群落演替特征研究

李璐瑶, 李文涛, 李艳平, 赵祺, 张沛东*

(中国海洋大学海水养殖教育部重点实验室, 青岛 266003)

摘要: 针对海藻场修复中人工藻礁单一材料生境异质性不足、生物附着效果较差的问题, 本研究设计了一种钢材—混凝土异质型复合材料藻礁, 制作礁体 12 个并于 2021 年 8 月投放至荣成马山里海域, 于 2021 年 11 月、2022 年 6 月和 9 月及 2023 年 5 月和 8 月, 分别对钢材和混凝土大型附着藻类和附着动物以及投礁区关键环境因子进行了跟踪监测。结果显示: (1) 两种材料对大型藻类的建植效果存在显著不同, 其中混凝土的大型藻类生物量显著高于钢材, 整个监测周期平均达到钢材的 1.7 倍 ($P<0.05$); (2) 大型附着藻类群落结构主要受季节和礁龄的双重驱动, 呈现出由绿藻门向褐藻门的演替规律, 红藻门主要出现在演替的过渡期但未形成稳定的优势阶段, 在投礁后 20 个月形成了以裙带菜 (*Undaria pinnatifida*) 为绝对优势种 ($Y=0.99$) 的稳定顶级群落; (3) 不同材料对附着动物的定殖效果存在显著差异, 钢材的附着动物生物量显著高于混凝土, 平均是其 8.3 倍 ($P<0.05$)。结果表明, 在同一礁体单元内, 混凝土更有利于大型藻类建植, 钢材则更有利于附着动物定殖, 二者组合使用不仅能够同步促进大型藻类和附着动物定殖的双效提升, 从而实现了材料的功能互补, 还可显著提高附着生物的生物量与多样性水平, 为人工藻礁建礁材料筛选提供了新思路。

关键词: 人工藻礁; 材料筛选; 大型藻类; 群落演替; 附着效果

中图分类号: S953.1

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2026)x-0001-15

1 引言

海藻场是全球最广布的海洋植被型生境之一, 其分布面积约为 $(1.5\sim 2.0)\times 10^6$ km², 覆盖了 25%~30% 的世界海岸线, 在水质改善、维持海洋生物多样性、养护渔业资源和参与全球碳循环等方面具有极其重要的生态服务价值^[1-2]。其中, 海藻场对氮、磷移除量分别可达 $41\sim 124$ g N·m⁻²·yr⁻¹ 与 $2\sim 16$ g P·m⁻²·yr⁻¹, 体现了其重要的水质调节与生态缓冲功能^[3]; 在碳封存方面, 全球海藻场的碳埋藏量约为 $61\sim 268$ Tg C·yr⁻¹^[4],

约为海草床年埋藏量的 6.3 倍^[5]、红树林沉积碳埋藏量的 6.6 倍^[6], 被认为是沿海碳汇的重要组成部分。

然而, 在全球气候变化(如海水升温、酸化)^[7]和人类活动(如海岸开发、污染输入)^[8]等多重胁迫下, 全球海藻场正面临系统性退化危机。联合国环境规划署(UNEP)报告指出, 过去 50 年间全球近 60% 的海藻场已出现显著退化^[1], 不仅导致近岸生物多样性丧失, 更对依赖海藻资源的沿海渔业、养殖业造成直接冲击。随着海藻场退化日趋严重, 有关海藻场的保护修复已成为国际关注的热点。联合国将 2021—2030

收稿日期: 2026-02-04; 修订日期: 2026-04-27。

基金项目: 国家重点研发计划课题(2023YFD2401101)。

作者简介: 李璐瑶(2000—), 女, 山东临沂人, 主要从事海藻场退化机制与修复理论。E-mail: Liliyao20321@163.com

* 通信作者: 张沛东(1975—), 男, 教授; 研究方向为海洋牧场生境构建理论与技术。E-mail: zhangpdsg@ouc.edu.cn

年定义为“生态系统恢复十年”,明确提出海藻场、红树林、珊瑚礁等关键生态系统的全面修复目标^[9]。

人工藻礁建设作为一种积极的海洋生态修复方式,通过投放人工构筑物,为海藻和其他附着生物提供生境支持,已成为全球修复受损海藻场的主流技术手段^[10]。其中,建礁材料是影响人工藻礁建设效果的关键因素之一。例如,张磊等^[11]对比分析了多种材料模型礁的建植效果,发现混凝土与煤灰材料的藻类平均盖度分别为65.7%与65.0%,是橡胶、玻璃钢、鲍壳与牡蛎壳材料藻类平均盖度的1.4~3.7倍,表明材料类型对藻类建植具有显著影响。在混凝土材料方面,材料表面改性同样显著影响藻类建植效果, Lee等^[12]于2020年1月至11月在韩国釜山近岸开展的现场监测表明,牡蛎壳覆面混凝土处理组藻类覆盖度于1月已达10%~80%,而混凝土对照组未发现藻类附着;至11月牡蛎壳覆面混凝土处理组藻类覆盖度是对照组的1.5倍。Harlin与Lindbergh^[13]通过海区挂板试验发现,粗糙颗粒基质上的角叉菜(*Chondrus crispus*)和石莼(*Ulva lactuca*)覆盖度分别达到79.5%和85.2%,是光滑基质的160倍和85倍。这些结果表明,藻礁材料的建植效果与材料本身性质和礁体表面粗糙度均密切相关。然而,现有藻礁材料的研究尚缺乏不同材料在同一礁体结构单元内的同步量化对比,而且目前多数研究仅采用海区挂板实验,亦缺乏实际藻礁规格的海区投放实验研究。

人工藻礁投放后,大型附着藻类的群落结构随建礁时间延长和季节变化等发生明显演替,并受水温和营养盐等多种因素驱动。Jung与Choi^[14]在韩国东海开展的跨年度调查中发现,人工藻礁上附着大型藻类达到85种,但表现出由机会种向多年生种的逐渐演替,且藻类的平均生物量为 $312.63\sim 1909.72\text{ g m}^{-2}$,波动幅度大。在济州岛多孔型人工藻礁的研究示范中,发现人工藻礁的附着藻类总体由丝状藻阶段向多年生大型藻类阶段不断演替,且在演替过程中出现了超过25种具有渔业资源养护作用的藻类类群,其中包括昆布(*Ecklonia cava*)等典型多年生褐藻^[15]。然而,现有人工藻礁的藻类演替规律研究仍存在周期短、关键环境因子缺乏等不足。Earp等^[16]通过对387个海藻场的恢复效果分析发现,85%的实验监测时间未超过12个月,且多数实验对水温与光照等关键环境因子仅提供有限信息或缺乏量化记录,从而未能充分解析藻类演替的驱动要素。

为此,本研究基于“基质异质性(Substrate Heterogeneity)”假说^[17],设计了一种钢材—混凝土立方体人

工藻礁,制作实验礁12个于2021年8月投放至山东省荣成市马山里海域,并于2021年11月、2022年6月和9月及2023年5月和8月,对礁体大型附着藻类和附着动物以及投礁区关键环境因子进行了跟踪监测,对比了钢材与混凝土的附着效果,解析了礁体大型附着藻类和附着动物的群落演替规律及其关键环境驱动要素。研究结果可为海藻场的精准修复策略制定提供理论依据与技术支撑。

2 材料与方法

2.1 实验海区

实验海区位于山东省荣成市马山里海域($122^{\circ}33'58.3''\text{E}-122^{\circ}34'36.5''\text{E}$, $37^{\circ}18'\text{N}-37^{\circ}19'\text{N}$)(图1)。该海域属典型岩礁性海岸带,地形平坦开阔,底质以平坦岩石为主,局部区域岩石表面覆盖薄层泥沙(厚度 $< 5\text{ cm}$),底质坚硬且承载力强^[18-19]。采用SDW-III海流计在投礁区现场实测平均流速约 0.13 m s^{-1} ,水流较为平缓。礁体投放点在最低潮时水深约2 m,便于礁体布放定位与后续取样监测。

2.2 人工藻礁结构与投放

依据《人工鱼礁建设技术规范》(SC/T 9416—2014)^[20]中“适配生物特性、结构稳固、几何效应最大化”的核心原则,本研究在常用立方体人工藻礁的基础上,设计了一种钢材—混凝土立方体人工藻礁(图2)。

藻礁单体外部尺寸 $1.2\times 1.2\times 1.2\text{ m}$ (长 \times 宽 \times 高),由两部分构成:(1)钢框架主体:采用Q235低碳钢板(厚度5 mm)焊接成立方体框架,作为骨架结构,为提高通透性并增强内部水体交换,框架侧面设置规则开孔(孔径10 cm)与开放式空腔构型(孔径、数量与排布见图2(B);通透性系数为0.10);(2)内置水平钢材板和混凝土板:在钢框架内部沿垂向布设5块水平板($100\text{ cm}\times 20\text{ cm}\times 3\text{ cm}$;长 \times 宽 \times 高),为保证材料效应可比,两种材料水平板尺寸一致,上层和中层设置钢板与混凝土板各1块,底层设置混凝土板1块,仅作为礁体支撑件不取样。

共制作12个规格一致的实验礁体,养护28 d后于2021年8月投放于山东省荣成市马山里海域,12个礁体平铺布设为3列4行,礁体间距2 m。布设与投放过程遵循SC/T 9416—2014的现场施工与安全要求^[20]。

2.3 样品采集与处理

海区调查分别于2021年11月、2022年6月、2022年9月和2023年5月、2023年8月进行,在大潮低潮时进行现场测量、水样以及礁体附着生物样品的

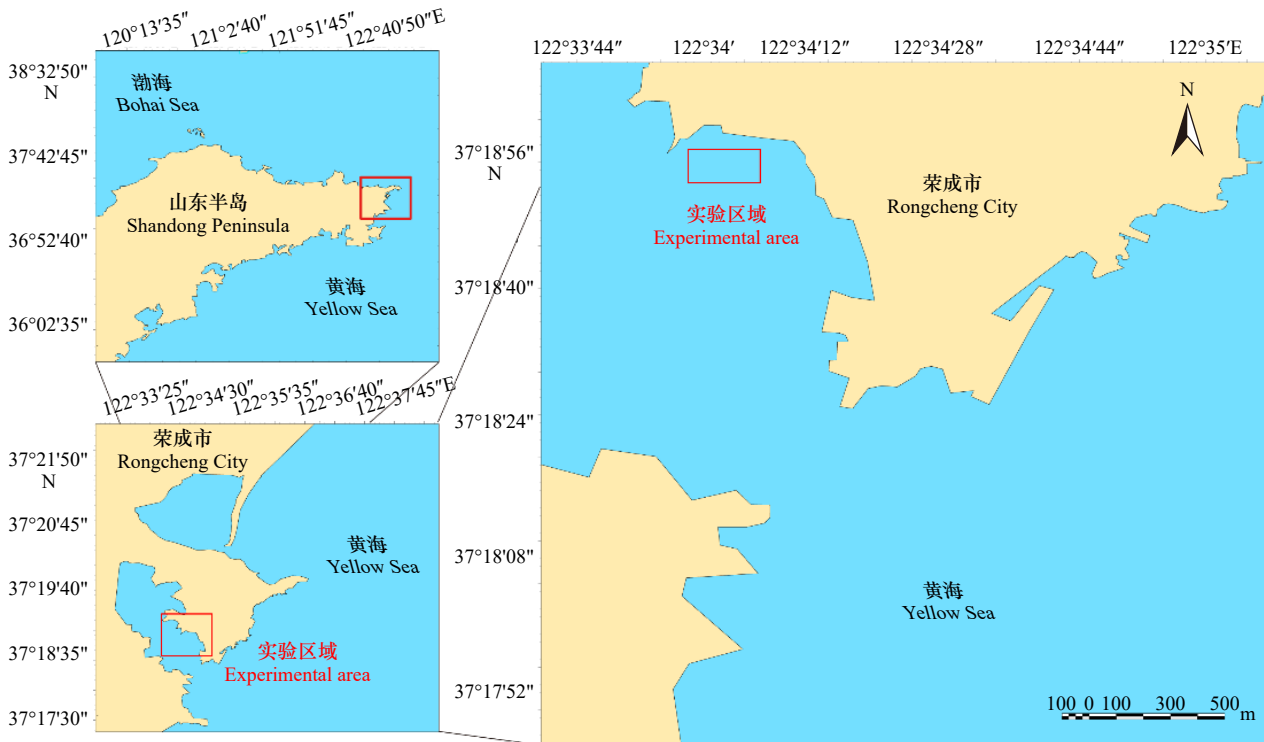


图 1 实验区域

Fig. 1 The experimental area

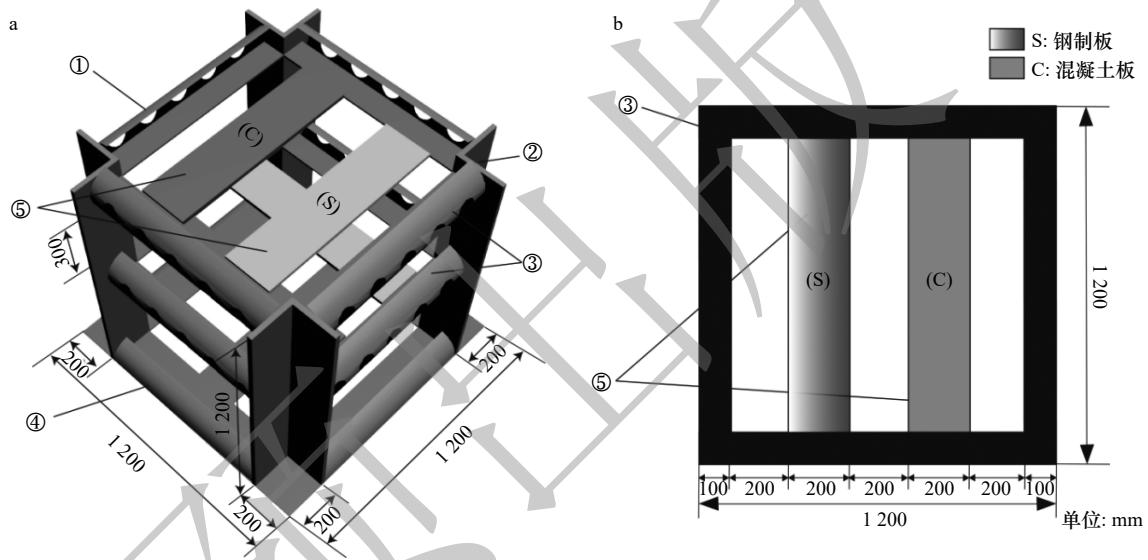


图 2 人工藻礁立体结构示意图(A)与内部结构俯视图(B)

Fig. 2 Schematic diagram (A) and internal structural perspective (B) of the artificial algal reef

注: ①为水体交换孔(Φ80 mm); ②为钢制立柱; ③为半圆形钢板构件(Φ200 mm); ④为1/4圆弧无孔钢板底座; ⑤为不同材料水平板。

Note: ① a water exchange aperture (diameter: 80 mm); ② a load-bearing structural steel column; ③ a semi-circular steel plate component (diameter: 200 mm);

④ a quarter-circular, non-porous steel base plate; and ⑤ a horizontally oriented composite plate composed of different materials.

采集。每次采样前由潜水员对礁体的整体结构完整性、空间位置及姿态稳定性进行现场检查, 确认礁体未见明显倾倒、位移或结构破损后再开展后续采样。

2.3.1 环境因子

现场对礁体投放区域的主要环境因子进行测量。使用 YSI 650 多参数水质仪测定水温(精度±0.1℃)和

溶解氧(DO, 精度±0.01 mg L⁻¹), HI98130 便携式 pH 计测定酸碱度(精度±0.01), LS10T 光学盐度计测定盐度(精度±0.1), SDW-III 海流计测定流速(精度±0.01 m s⁻¹), 各指标连续测 3 次取均值; 水文观测流程参照《海洋调查规范 第 2 部分: 海洋水文观测》(GB/T 12763.2-2007)执行^[21]。

使用 2 L 采水器采集距礁体上方约 0.5 m 的海水, 采用预灼烧 Whatman 玻璃纤维滤膜 (GF/F, 47 mm, 450℃ 灼烧 4 h) 过滤后, 装入预处理的聚乙烯瓶 (10% 盐酸浸泡 24 h), -20℃ 冷冻保存。参照《海洋监测规范 第 4 部分: 海水分析》(GB 17378.4-2007)^[22], 用分光光度法测定海水的亚硝酸氮 ($\text{NO}_2\text{-N}$)、硝酸氮 ($\text{NO}_3\text{-N}$)、氨氮 ($\text{NH}_4\text{-N}$) 及活性磷酸盐 ($\text{PO}_4\text{-P}$) 含量, 总溶解无机氮 (DIN) 为 3 种无机氮之和。

2.3.2 礁体附着生物

采用影像记录与定量取样相结合的方式。由潜水员携带水下相机对所有礁体录像 (记录时长 ≥ 3 min) 并拍照, 影像资料主要用于礁体姿态稳定性检查、附着生物空间分布观察以及优势类群和覆盖特征的辅助判读, 不作为独立的定量统计数据纳入分析。然后随机选取 3 个礁体作为重复样点进行生物采集。取样板为礁体内部上层与中层的水平板 (水平板样式见图 2B), 以保证不同材料在相近层位条件下进行比较。为避免对后续调查造成干扰, 每次调查在每块水平板上更换取样位置, 且相邻两次取样样方间距不少于 10 cm 并避开既往刮取痕迹。在各钢材与混凝土水平板均分别随机布设 3 个样方 (10 cm \times 10 cm), 用不锈钢刮刀采集样方框内的附着生物, 将同一礁体同一材料采集的 6 个样方样本合并为 1 个复合样, 分别装入 1 mm 网眼尼龙袋, 带回实验室进行物种鉴定与生物量测定, 在数据整理时按总量/6 换算为平均单样方值, 用于后续统计分析。大型藻类参照《黄、渤海及东海常见大型海藻图鉴》鉴定^[23], 然后置于 60℃ 烘箱烘干至恒重测定干重; 大型附着动物参照《黄海底栖动物常见种形态分类图谱》进行种类鉴定^[24], 使用体式显微镜辅助观察, 吸干水分后记录个体数并测定湿重。样方为子样, 礁体为统计重复单位 (每时间点每材料, $n=3$)。

2.4 数据处理与分析

生物量采用如下公式计算:

$$P = W/s$$

式中, P 为总生物量 ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$), W 为总重 (g) 其中藻类用干重、动物用湿重, s 为样方面积 (m^2)。

采用 Shannon-Wiener 多样性指数 (H')、Margalef 物种丰富度指数 (D)、Pielou 均匀度指数 (J) 进行生物多样性分析, 通过群落优势度 (Y) 确定藻类群落生物量优势种类 (优势种: $Y \geq 0.02$), 采用 Jaccard 相似系数 (G) 分析不同群落相似性:

$$H' = - \sum_{i=1}^s p_i \log_2 p_i$$

$$D = (S - 1) / \text{Ln}N$$

$$J = H' / \text{Ln}S$$

$$Y = (N_i / N) f_i$$

$$G = a / (a + b + c)$$

式中, S 为总物种数量; P_i 为种类 i 生物量占总生物量的比例; N 为总生物量; f_i 为出现率, 即种类 i 出现的次数占总次数的百分比; a 为共有种数, b 、 c 为两种基质各自特有种数。大型附着动物的多样性指数需用个体数运算。

数据录入 Excel 2021, Grubbs 检验剔除异常值 ($\alpha=0.05$), 结果以平均值 \pm 标准差 ($\text{mean} \pm \text{SD}$) 表示。使用 SPSS 25.0 做独立样本 t 检验与单因素方差分析, 考虑到不同调查期选取的礁体并非同一批个体, 藻类物种数 (richness) 等计数型指标的时间效应采用非参数多组比较 (Kruskal-Wallis) 检验; 为减少同一礁体内材料配对对时间检验的影响, 将同一礁体钢材与混凝土的物种数取均值作为独立观测值参与时间效应分析。各调查期内钢材与混凝土物种数差异采用配对 Wilcoxon 检验, 并采用 Benjamini-Hochberg (BH) 方法对多时间点比较的 P 值进行校正, 显著性水平设为 $P < 0.05$ 。大型藻类群落结构的多元统计分析在 PRIMER 6.0 中完成。对数据进行样品总量标准化作四次根转换 (fourth root), 基于 Bray-Curtis 系数构建相似性矩阵; 在此基础上采用组平均法 (group average) 进行层次聚类, 进行非度量多维尺度排序 (nMDS), 以 $\text{Stress} < 0.2$ 为可靠。组间差异采用双因子交叉 ANOSIM 进行检验, 并结合 MVDISP 对组内离散度进行辅助判断, 以区分组间位置差异与组内离散度差异对统计结果的影响。

3 结果

3.1 环境因子

监测期间, 人工藻礁投放区域的关键环境因子呈现明显的时空变化特征 (表 1)。水温 (T) 受季节更替影响显著 ($P < 0.05$), 波动范围为 15.10~25.30℃。流速与盐度在不同调查时段间存在显著差异 ($P < 0.05$), 分别于 2022 年 9 月和 2021 年 11 月达到峰值。溶解氧 (DO) 含量为 6.59~12.56 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 于 2023 年 5 月达到最大值。pH 值维持在 7.22~8.50 之间, 整体呈弱碱性, 但 2023 年 8 月显著低于其余调查时间。在营养盐方面, 无机氮 (DIN) 浓度范围为 0.28~0.55 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均为 0.384 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 活性磷酸盐 ($\text{PO}_4\text{-P}$) 浓度范围为 0.003~0.020 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均为 0.0114 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。参照

表 1 水体环境指标调查结果
Table 1 Investigation results of water environmental indicators

指标 Parameter	2021.11	2022.06	2022.09	2023.05	2023.08
温度T(°C)	15.87 ± 0.15 ^d	24.93 ± 0.32 ^a	21.53 ± 0.25 ^c	15.40 ± 0.30 ^d	23.67 ± 0.38 ^b
盐度Sal(‰)	31.97 ± 0.06 ^d	29.57 ± 0.64 ^a	29.70 ± 0.36 ^{ab}	30.23 ± 0.06 ^{bc}	30.40 ± 0.17 ^c
流速V(m·s ⁻¹)	0.13 ± 0.01 ^{ab}	0.14 ± 0.02 ^{ab}	0.15 ± 0.01 ^b	0.13 ± 0.01 ^{ab}	0.12 ± 0.02 ^a
溶解氧DO(mg L ⁻¹)	7.60 ± 0.01 ^c	7.43 ± 0.04 ^d	6.68 ± 0.08 ^e	12.56 ± 0.02 ^a	9.06 ± 0.09 ^b
pH值	8.47 ± 0.06 ^a	8.30 ± 0.10 ^a	8.47 ± 0.15 ^a	8.46 ± 0.04 ^a	7.31 ± 0.09 ^b
PO ₄ ³⁻ -P(mg L ⁻¹)	0.020 ± 0.001 ^a	0.012 ± 0.001 ^b	0.016 ± 0.001 ^a	0.003 ± 0.001 ^c	0.006 ± 0.002 ^c
无机氮DIN(mg L ⁻¹)	0.35 ± 0.01 ^b	0.28 ± 0.03 ^c	0.34 ± 0.01 ^c	0.55 ± 0.07 ^a	0.40 ± 0.03 ^b

注: 小写字母表示不同调查时间之间存在显著差异($P < 0.05$)。

Note: Lowercase letters indicate statistically significant differences across survey time ($P < 0.05$).

近岸海域富营养化评价中 DIN 的阈值分级, 研究海域 DIN 均值处于 0.3~0.4 mg·L⁻¹ 区间, 且 2023 年 5 月达到 0.55 mg·L⁻¹, 表明监测期内研究海域 DIN 整体处于相对较高水平^[25]。按平均值折算, 研究海域 DIN 与 PO₄³⁻-P 的摩尔比约为 74.6, 明显高于 Redfield 比值的 16 : 1^[26]。

3.2 大型附着藻类

3.2.1 种类组成

五次调查在钢材和混凝土两种材料共采集和鉴定出大型藻类 3 门 12 属 14 种(表 2), 其中绿藻门(Chlorophyta) 5 属 7 种, 占总物种数的 50.0%, 包括肠浒苔(*Enteromorpha intestinalis*)、刺松藻(*Codium fragile*)

表 2 人工藻礁大型附着藻类名录
Table 2 Species composition of macroalgae associated with artificial algal reefs

门 Phylum	种类 Species	2021.11		2022.06		2022.09		2023.05		2023.08		温度性质 Temperature adaptation nature
		S	C	S	C	S	C	S	C	S	C	
绿藻门 Chlorophyta	肠浒苔 <i>Enteromorpha intestinalis</i>	+							+			CT
	缘管浒苔 <i>Enteromorpha linza</i>	+	+					+	+			WT
	假根羽藻 <i>Bryopsis corticulans</i>	+	+									WT
	孔石莼 <i>Ulva pertusa</i>			+	+	+	+	+	+	+		WT
	刺松藻 <i>Codium fragile</i>										+	WT
	硬毛藻 <i>Chaetomorpha antennina</i>					+	+					WT
	线形硬毛藻 <i>Chaetomorpha linum</i>			+	+	+	+	+	+	+		WT
	小珊瑚藻 <i>Corallina pilulifera</i>	+	+									ST
红藻门 Rhodophyta	角叉菜 <i>Chondrus ocellatus</i>							+	+			WT
	多管藻 <i>Polysiphonia urceolata</i>								+			LB
	繁枝蜈蚣藻 <i>Grateloupia ramosissima</i>								+			WT
	龙须菜 <i>Asparagus schoberioides</i>										+	WT
褐藻门 Phaeophyta	水云 <i>Ectocarpus siliculosus</i>	+										CT
	裙带菜 <i>Undaria pinnatifida</i>							+	+	+	+	WT

注: S表示钢材, C表示混凝土, +表示采到藻类, WT表示暖温带种类, CT表示冷温带种类, ST表示亚热带种类, LB表示亚寒带种类。

Note: S = steel; C = concrete; "+" denotes presence of the corresponding macroalgal species; WT = warm temperate; CT = cold temperate; ST = sub tropical; LB = lower boreal.

等;红藻门(Rhodophyta)5属5种,占比35.7%,主要种类为小珊瑚藻(*Corallina pilulifera*)、角叉菜(*Chondrus ocellatus*)、龙须菜(*Asparagus schoberioides*);褐藻门(Phaeophyta)2属2种,占比14.3%,包括水云(*Ectocarpus siliculosus*)与裙带菜(*Undaria pinnatifida*)。

区系性质分析表明,附着藻类以暖温带种为主(10种,71.43%),代表种类为孔石莼(*Ulva pertusa*)、缘管浒苔(*Enteromorpha linza*)、裙带菜等;兼有少量冷温带成分(如水云),这与黄渤海海藻区系的典型特征相吻合。绿藻作为先锋物种,在不同材质礁体上均表现出较高的出现频率。大型附着藻类的种类数呈现显著的季节性波动($P<0.05$),且两种材料的变化趋势基本一致。藻类种类数在投礁初期较少,随着群落演替,于2023年5月达到峰值,此时混凝土与钢材表面的藻类种类数分别为7种与6种,至2023年8月呈下降趋势。各调查期内钢材与混凝土表面藻类物种数差异均不显著($P>0.05$)。

两种材料在整个监测周期内累计记录的藻类总物种数均为11种,但其群落组成在不同基质间存在明显差异,且这种差异具有时间阶段性。基于物种出现数据统计,同期钢材与混凝土的共有种数为1~5种,Jaccard相似系数在0.20~1.00之间波动:2022年6月与2022年9月两种材料的物种组成完全一致($G=1.00$),而2023年8月差异最大($G=0.20$),表现为钢材与混凝土之间仅共享1种藻类、同时出现较多特有种(钢材特有3种、混凝土特有1种);峰值期(2023年5月)两种材料物种组成亦存在分化(共有种5种;钢材特有种1种、混凝土特有种2种; $G=0.625$)。

3.2.2 生物量

不同材料上的藻类生物量在各监测时间表现出显著差异($P<0.05$),如图3所示。投礁第二年后藻类生物量明显提升,于2023年5月达到最高值,其中混凝土的大型附着藻类生物量($5318.48\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$)是钢材

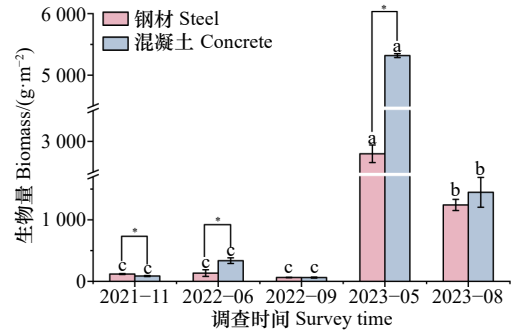


图3 不同材料大型附着藻类生物量的变化

Fig. 3 Temporal changes in macroalgal biomass across substrate materials

注:误差棒上小写字母表示相同材料不同时间之间存在显著差异,*表示相同时间不同材料之间存在显著差异($P<0.05$)。

Note: Lowercase letters on error bars denote significant differences among sampling times within each substrate material; and asterisks (*) denote significant differences between substrate types at each sampling time ($P<0.05$).

大型附着藻类生物量的1.9倍($P<0.05$)。从年度增长来看,2023年8月钢材与混凝土的大型附着藻类生物量,分别是2022年6月的9.3倍与4.3倍。

两种材料大型附着藻类生物量的对比显示,2022年6月与2023年5月混凝土的大型附着藻类生物量显著高于钢材($P<0.05$)。整个监测周期内,混凝土大型附着藻类平均生物量达 $1449.82\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$,是钢材的1.7倍;特别在2023年5月,其大型附着藻类生物量是钢材的1.9倍,附着变化情况见图4。

3.2.3 优势种

两种材料大型附着藻类优势种的演替规律一致,均呈现绿藻门逐渐向褐藻门的演替(表3、表4)。2021年11月(投礁后3个月)以绿藻门的假根羽藻($Y=0.49\sim0.50$)和缘管浒苔($Y=0.30\sim0.42$)为优势种;至2022年6月(投礁后10个月),绿藻门的孔石莼成为绝对优势种($Y=1.00$);2023年5月(投礁后21个月),褐藻门的裙带菜取代孔石莼成为第一优势种($Y=0.99$),此时裙带菜的生物量在两种材料大型附着

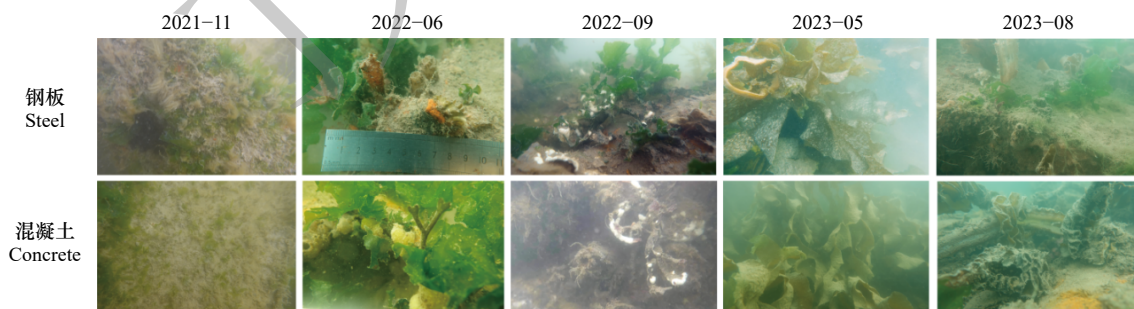


图4 不同材料藻类附着状况的变化

Fig. 4 Temporal changes in macroalgal settlement density across substrate types

表 3 不同材料大型藻类优势种及优势度

Table 3 Dominant macroalgal species and their relative dominance across substrate types

时间 Time	优势种 Dominant species	优势度 Relative dominance	
		钢材 Steel	混凝土 Concrete
2021.11	假根羽藻 <i>Bryopsis corticulans</i>	0.49	0.50
	缘管浒苔 <i>Enteromorpha linza</i>	0.30	0.42
	小珊瑚藻 <i>Corallina pilulifera</i>	0.06	0.08
2022.06	水云 <i>Ectocarpus siliculosus</i>	0.15	—
	孔石莼 <i>Uva pertusa</i>	1.00	1.00
2022.09	孔石莼 <i>Uva pertusa</i>	0.99	0.89
	硬毛藻 <i>Chaetomorpha antennina</i>	—	0.10
2023.05	裙带菜 <i>Undaria pinnatifida</i>	0.99	0.99
	裙带菜 <i>Undaria pinnatifida</i>	0.57	0.97
2023.08	孔石莼 <i>Uva pertusa</i>	0.42	—
	龙须菜 <i>Asparagus schoberioides</i>	—	0.03

藻类生物量的占比均高达 99%，标志着群落优势类群由绿藻向褐藻的转变。对比 2022 年 6 月与 2023 年 8 月的优势种可知，在相似的季节条件下，优势种由孔石莼演替为裙带菜，表明礁龄对大型附着藻类的演替具有显著影响。

3.2.4 群落多样性特征

大型附着藻类的多样性指数随时间推移呈现显著的季节性波动 ($P < 0.05$)，在大多数具有显著差异的监测时间，钢材大型附着藻类的多样性指数高于混凝土 (图 5)。除投礁初期 (2021 年 11 月) 及 2022 年 9 月外，钢材表面大型附着藻类的 Shannon-Wiener 多样性指数 (H')、Margalef 丰富度指数 (D) 与 Pielou 均匀度指数 (J) 均显著高于混凝土 ($P < 0.05$)。特别是在 2023 年 8 月，钢材大型附着藻类的 H' 、 D 和 J 指数分别为混凝土的 3.3 倍、2.5 倍与 1.3 倍。然而，在 2022 年秋季，群落多样性呈现相反趋势，混凝土大型附着藻类的 H' 与 J 指数显著高于钢材 ($P < 0.05$)。此外，在 2023 年春季，仅 Pielou 均匀度指数 (J) 表现出钢材显著高于混凝土 ($P < 0.05$)，而 H' 与 D 指数在两种材料间无统计学差异。

3.2.5 群落结构聚类与排序

基于大型藻类生物量数据的聚类与 nMDS 排序显示，聚类树在 60% 相似性水平处可形成较清晰的分组格局 (图 6A)，且多数重复样品优先聚集于同一分支或相邻分支，显示分组具有较好的稳定性，其中

表 4 不同调查时间两种材料表面绿藻门、红藻门和褐藻门生物量占大型附着藻类总生物量的比例

Table 4 Proportions of Chlorophyta, Rhodophyta and Phaeophyta biomass in the total attached macroalgal biomass on steel and concrete substrates survey times

时间 Time	门 Phylum	占比 Proportion	
		钢材 Steel	混凝土 Concrete
2021.11	绿藻门 Chlorophyta	64.80	92.18
	红藻门 Rhodophyta	6.07	7.82
	褐藻门 Phaeophyta	10.89	—
2022.06	绿藻门 Chlorophyta	100.00	100.00
	红藻门 Rhodophyta	—	—
	褐藻门 Phaeophyta	—	—
2022.09	绿藻门 Chlorophyta	100.00	100.00
	红藻门 Rhodophyta	—	—
	褐藻门 Phaeophyta	—	—
2023.05	绿藻门 Chlorophyta	1.31	0.20
	红藻门 Rhodophyta	0.00	0.29
	褐藻门 Phaeophyta	98.68	99.52
2023.08	绿藻门 Chlorophyta	42.52	—
	红藻门 Rhodophyta	—	3.00
	褐藻门 Phaeophyta	57.48	96.99

注：—表示未检出，0.00表示已检出但占比极低。

Note: “—” denotes absence of detection; “0.00” indicates presence at trace levels.

2021 年 11 月样品与后续各期样品分离最为明显；nMDS 的二维应力值为 0.02，表明该二维排序能够较好地反映样品间差异关系 (图 6B)，2022 年 6 月与 2022 年 9 月样品在左下区域聚集，表现为相对接近的群落结构，2023 年 5 月与 2023 年 8 月样品主要分布于排序图上方并形成另一聚集区，提示群落组成在后期发生了阶段性转变。

双因子交叉 ANOSIM 分析显示，时间-材料组间差异显著 (Global $R=0.959$, $P=0.001$)，且两两比较的 R 值均较高 ($R \geq 0.926$, $P=0.01$)，表明不同时段群落结构差异强烈；材料因子在跨所有“时间-材料”组的背景下亦达到显著水平 (Global $R=0.519$, $P=0.002$)，但其效应强度低于时间因子，提示群落演替的时间效应为主、材料效应为辅。MVDISP 结果显示，不同时间水平的组内离散度存在阶段性变化，如 2022 年 6 月为 0.545、2023 年 8 月为 1.408，而钢材与混凝土两组离

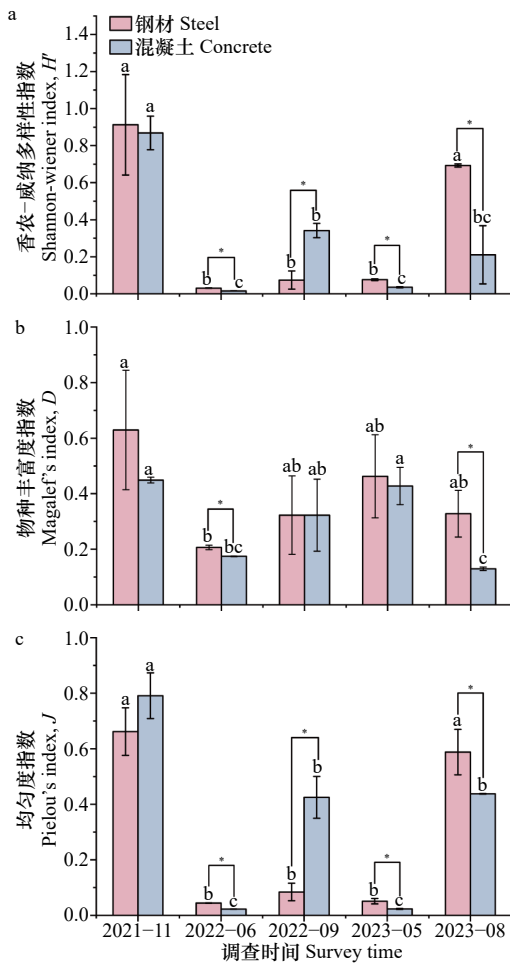


图5 不同材料大型藻类香农-威纳多样性指数(A)、物种丰富度指数(B)和均匀度指数(C)的变化

Fig. 5 Temporal changes in Shannon-Wiener index (A), Margalef's index (B), and Pielou's index (C) of macroalgae between substrate types

注: S: 钢材; C: 混凝土; 误差棒上小写字母表示相同材料不同时间之间存在显著差异, *表示相同时间不同材料之间存在显著差异 ($P < 0.05$)。

Note: S: Steel; C: Concrete. Lowercase letters on error bars denote significant differences among sampling times within each substrate material; and asterisks (*) denote significant differences between substrate types at each sampling time ($P < 0.05$).

散度总体接近(分别为0.903与1.097),说明材料组间差异的统计结论不太可能完全由组内离散度差异所驱动。综合聚类、nMDS与ANOSIM的一致性证据表明,本文在60%相似性水平处划定聚类分组,可较客观地表征研究期内大型藻类群落结构的阶段性分化(图6)。

3.3 大型附着动物

3.3.1 种类组成与季节分布

五次调查共在两种材料上采集和鉴定出大型附着动物25种(表5),隶属于4门22属。其中环节动

物门(Annelida)11属13种,占总种类数的52.0%;软体动物门(Mollusca)6属8种,占32.0%;节肢动物门(Arthropoda)与脊索动物门(Chordata)各2种,均占8.0%。

不同材料对附着动物定殖表现出显著差异。监测期间钢材表面累计记录附着动物20种,是混凝土材料的1.7倍。其中2023年5月,钢材大型附着动物种类数达到15种,是混凝土材料的1.5倍;环节动物门种类在钢材表面的附着种类数(8种),是混凝土材料的2倍,表明钢材更有利于多类群同步定殖与维持。

3.3.2 生物量与附着密度

不同材料对附着动物生物量具有显著影响,所有监测时间钢材表面附着动物生物量均显著高于混凝土($P < 0.05$;图7A)。2023年8月,钢材表面附着动物生物量达到最大值,为 $47\ 570.25 \pm 5\ 200.18\ \text{g} \cdot \text{m}^{-2}$,是混凝土的8.3倍,其中长牡蛎(*Crassostrea gigas*)为绝对优势种,生物量贡献约占90%。所有监测时间钢材表面附着动物的附着密度亦显著高于混凝土($P < 0.05$;图7B)。2022年6月,钢材表面附着动物的附着密度达到最大值,是混凝土3.9倍;至2023年8月,钢材表面附着动物的附着密度仍达到混凝土的2.7倍($P < 0.05$)。

3.3.3 附着动物多样性特征

附着动物的Shannon-Wiener多样性指数(H')与Margalef物种丰富度指数(D)均表现出显著的材料差异,钢材整体优于混凝土(表6)。2021年11月与2022年9月,混凝土表面因附着生物极少,多样性指数未能有效计算,而同期钢材表面已形成具有一定结构特征的附着动物群落,其 H' 指数分别达到 0.81 ± 0.25 与 0.46 ± 0.40 ($P < 0.05$)。

两种材料的多样性指数在2023年8月达到全周期峰值,但钢材仍保持显著优势。此时,钢材表面的物种丰富度指数(D)为 1.13 ± 0.10 ,显著高于混凝土表面的 0.75 ± 0.14 ($P < 0.05$),是其1.51倍;钢材的 H' 指数为 2.11 ± 0.15 ,高于混凝土表面的 1.71 ± 0.20 。

与多样性与丰富度不同,Pielou均匀度指数(J)在多数监测时段内受材料影响较小($P > 0.05$)。钢材与混凝土表面的 J 值分别为0.77~1.00与0.78~0.96。仅在2023年5月,混凝土表面的均匀度指数显著高于钢材表面($P < 0.05$)。

4 讨论

4.1 基质理化性质对生物群落定殖的影响

本研究通过在同一礁体单元内设置钢材与混凝

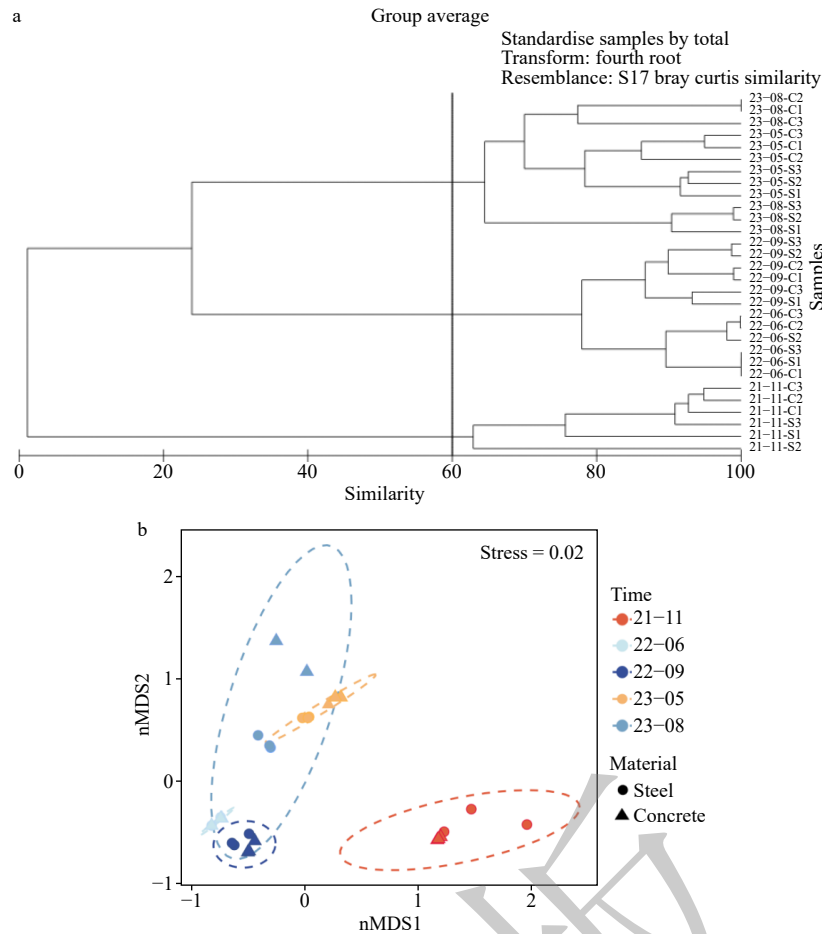


图 6 大型藻类群落聚类分析(A)与非度量多维尺度排序(nMDS)(B)

Fig. 6 Cluster analysis (A) and non-metric multidimensional scaling (nMDS) ordination (B) of macroalgal assemblages across substrate types

注: 分组表示为“时间-材料”。S: 钢材, C: 混凝土。

Note: Samples are grouped by sampling time and substrate type (S: steel; C: concrete), with substrate as the primary fixed factor in multivariate analyses.

土板, 对比分析了两种建礁材料对附着生物定殖效果的影响, 发现混凝土材料上大型附着藻类生物量显著高于钢材, 而钢材上附着动物生物量与物种丰富度显著高于混凝土, 表明钢材与混凝土的组合即能同步促进附着大型藻类和附着动物的双效提升, 还可实现提高生物量与丰富生物多样性的功能, 为人工藻礁建礁材料筛选和结构设计提供了新思路。这种附着生物在不同材料上的差异, 可能是材料理化性质与微地形结构通过改变定殖界面的粗糙度、微尺度水动力与化学环境, 进而筛选早期定殖物种并重塑后续群落结构^[27-28]。

混凝土对大型附着藻类的促进定植效应, 可能归因于其表面粗糙度与弱碱性。Harlin 和 Lindbergh^[13]研究表明, 在同等水动力条件下, 高粗糙度基质通过提供微观定殖点, 其藻类覆盖率 (79.5%) 可达光滑基质 (0.5%) 的 159 倍。除物理粗糙度外, 化学微环境同样发挥关键作用, 混凝土在海水中会缓慢释放 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,

使基质-水体界面形成 pH 略高于周围海水的弱碱性环境, 从而影响生物膜形成与孢子黏附等过程^[29-30]。对人工礁材料有效性综合分析中发现, 混凝土亦被认为是较为稳定且综合效果较好的礁体材料之一^[31]。

相较之下, 钢材对附着动物具有更高的附着密度和群落多样性。这可能与钢材表面较光滑、孔隙度较低有关, 这样的表面微结构不利于大型藻类附着, 客观上为牡蛎、海鞘等固着、滤食性动物创造了更多的可利用生态位^[13, 28]。Choi 等^[30]研究发现, 茂密的大型海藻通过遮光、藻体摆动和沉积物截留等方式, 抑制固着动物的定居与生长。本研究中, 混凝土表面的裙带菜优势度达到 0.99, 可能强化了对附着动物生存空间的排斥, 而钢材表面因藻类覆盖度较低从而维持了更高的附着动物物种数与丰富度。

4.2 人工藻礁附着生物群落结构演替特征

人工藻礁投放后, 附着生物群落通常经历由先锋定殖到优势更替最后到达结构稳定的演替过程^[32]。

表 5 人工藻礁附着动物名录
Table 5 Species composition of attached animals associated with artificial algal reefs

门 Phylum	种类 Species	2021.11		2022.06		2022.09		2023.05		2023.08		温度性质 Temperature adaptation nature
		S	C	S	C	S	C	S	C	S	C	
	长牡蛎 <i>Crassostrea gigas</i>	+		+	+	+		+	+	+	+	WT
	紫贻贝 <i>Mytilus edulis</i>			+	+	+						WT
	东方缝栖蛤 <i>Hiatella orientalis</i>			+	+						+	WT
软体动物门 Mollusca	短滨螺 <i>Littorina brevicula</i>								+			WT
	红带织纹螺 <i>Nassarius succinctus</i>										+	WT
	秀丽织纹螺 <i>Nassarius festivus</i>										+	WT
	布尔小笔螺 <i>Mitrella burchardi</i>										+	WT
	丽小笔螺 <i>Mitrella bella</i>										+	WT
	四齿矶蟹 <i>Pugettia quadridens</i>								+			WT
节肢动物门 Arthropoda	大螺赢蜚 <i>Corophium major</i>										+	WT
	玻璃海鞘 <i>Ciona intestinalis</i>						+				+	WT
脊索动物门 Chordata	柄海鞘 <i>Styela clava</i>				+	+					+	WT
	独齿围沙蚕 <i>Perinereis cultrifera</i>	+	+									WT
	长双须虫 <i>Eteone longa</i>	+										WT
	多齿全刺沙蚕 <i>Nectoneanthes multignatha</i>				+				+			WT
	沙蚕 <i>Nereis succinea</i>				+						+	WT
	无疣齿吻沙蚕 <i>Inermonephys inermis</i>										+	WT
	寡鳃齿吻沙蚕 <i>Nephtys oligobranchia</i>										+	WT
环节动物门 Annelida	多鳃齿吻沙蚕 <i>Nephtys polybranchia</i>										+	WT
	不倒翁虫 <i>Sternaspis scutata</i>										+	WT
	网纹哈鳞虫 <i>Harmothoë dictyophora</i>										+	WT
	长须沙蚕 <i>Nereis longior</i>										+	WT
	树蛭虫 <i>Pista cristata</i>										+	WT
	长锥虫 <i>Haploscoloplos elongates</i>										+	WT
	拟特须虫 <i>Paralacydonia paradoxa</i>										+	WT

注: S表示钢材, C表示混凝土, +表示采集到附着动物, WT表示暖温带种类。

Note: S = steel; C = concrete; "+" denotes presence of the corresponding attached animal species; WT = warm temperate.

本研究发现, 大型藻类群落优势类群由绿藻门向褐藻门演替, 投礁后 3 个月以假根羽藻、缘管浒苔等机会性绿藻为优势; 投礁后 10~13 个月孔石莼成为绝对优势种 ($Y \approx 1.00$); 至投礁后约 20 个月, 裙带菜取代孔石莼成为绝对优势种, 标志着大型藻类群落由机会型先锋阶段转入以大型褐藻为核心的稳定阶段。研究结果与在韩国和日本等海域开展的人工礁长期监测结果一致^[14, 33-34]。同时, 马山里海域不同生境类型间

大型藻类群落结构存在明显差异^[19], 荣成邻近海区海草床附着大型藻类群落也表现出显著的季节性和地域差异^[35]。表明本研究中的群落演替既反映了新基质投放后附着群落礁龄增加的演替特征, 也可能受到周边海草床、天然礁区及养殖区等背景种源持续输入的共同影响。

附着生物群落演替体现了季节变动与礁龄增加的叠加效应。一方面, 温度和光照等季节性环境因子

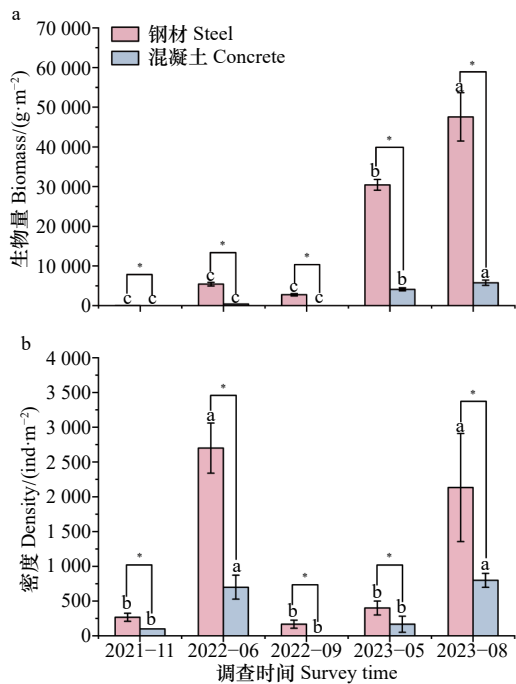


图7 不同材料附着动物生物量(A)与密度(B)的变化

Fig. 7 Temporal changes in attached animal biomass (A) and density (B) across substrate materials

注: S: 钢材 Steel; C: 混凝土 Concrete; 误差棒上小写字母表示相同材料不同时间之间存在显著差异, *表示相同时间不同材料之间存在显著差异 ($P < 0.05$)。

Note: S: Steel; C: Concrete. Lowercase letters on error bars denote significant differences among sampling times within each substrate material; and asterisks (*) denote significant differences between substrate types at each sampling time ($P < 0.05$).

决定了不同季节藻类的生长高峰期, 春夏季藻类快速生长、秋冬季整体生物量下降^[36]; 另一方面, 在相近季节条件下, 不同年度相同季节采样点的优势类群呈现由绿藻向褐藻的方向性转变, 例如 2022 年夏、秋两季仍以孔石莼等绿藻为主, 而到 2023 年 5 月, 钢材和混凝土表面褐藻门生物量占比分别达到 98.68% 和 99.52%, 2023 年 8 月仍分别保持在 57.48% 和 96.99%, 说明后期群落已转入褐藻占优阶段, 表明群落变化并非简单的季节性波动, 亦随礁龄延长而发生明显演替。

群落结构的多元统计结果进一步表明, 聚类分析在 60% 相似性水平形成清晰分组, 其中 2021 年 11 月样品与后续各期样品分离最明显, 2022 年 6 月与 2022 年 9 月样品聚集, 2023 年 5 月与 2023 年 8 月样品形成另一聚集区, 提示后期群落发生阶段性转变。ANOSIM 分析进一步表明, 时间效应影响最为显著 (Global $R=0.959$, $P=0.001$), 材料效应亦影响显著但强度较低 (Global $R=0.519$, $P=0.002$), 且 MVDISP 显示钢材与混凝土组内离散度总体接近, 说明本研究中群落演

表6 附着动物生物多样性指数

Table 6 Diversity indices of attached animal assemblages across substrate types

时间 Time	材料 Material	香农-威纳多样性指数 Shannon-Wiener index	H'物种丰富度指数 Margalef's index	D均匀度指数 Pielou's index
2021.11	钢材	0.81 ± 0.25*	0.24 ± 0.10*	0.97 ± 0.05
	混凝土	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	—
2022.06	钢材	1.42 ± 0.02*	0.51 ± 0.01*	0.89 ± 0.01
	混凝土	0.85 ± 0.16	0.31 ± 0.01	0.78 ± 0.15
2022.09	钢材	0.46 ± 0.40	0.13 ± 0.11	1.00 ± 0.00
	混凝土	—	—	—
2023.05	钢材	0.52 ± 0.04	0.16 ± 0.00	0.77 ± 0.04
	混凝土	0.21 ± 0.37	0.06 ± 0.10	0.87 ± 0.05*
2023.08	钢材	2.11 ± 0.15	1.13 ± 0.10*	0.93 ± 0.02
	混凝土	1.71 ± 0.20	0.75 ± 0.14	0.96 ± 0.03

注: “*”表示相同时间不同材料间具有显著差异 ($P < 0.05$)。2021 年 11 月混凝土表面仅记录到 1 种附着动物, 故 H' 和 D 为 0, J 以 “—” 表示; 2022 年 9 月混凝土表面未记录到附着动物, 故相关指数均以 “—” 表示。

Note: “*” denote significant differences between substrate types at each sampling time ($P < 0.05$). In November 2021, only one attached animal species was detected on the concrete substrate; consequently H' and D were both zero, whereas J is undefined and reported as “—”. In September 2022, no attached animals species were detected on the concrete substrate; and therefore, all three diversity indices are undefined and reported as “—”.

替的时间驱动强于材料驱动, 这与干扰-演替理论^[32]中时间序列主导群落重建的认识一致。附着藻类群落稳定时间约 20 个月, 介于日本 Murohana 海域的 18 个月^[34] 和荣成俚岛湾的 3 年^[37], 说明在本研究海域条件下组合藻礁可较快促进大型褐藻定植。除礁体本身提供适宜基底外, 也可能与研究海域邻近裙带菜和海带养殖区有关, 外源孢子供给充足, 加快了群落的自然化进程。这印证了 Sousa^[32] 关于干扰与演替的理论, 即在种源充足的开放系统中, 适宜的硬质基底可显著缩短顶级群落的构建时间。但该推断仍需结合邻近种源分布、孢子通量或遗传连通性等证据进一步验证。

此外, 研究海域营养盐结构和短期水化学变化也可能对群落演替变化产生背景性影响。本研究中, 无机氮 (DIN) 为 0.28~0.55 mg L^{-1} , 平均约 0.384 mg L^{-1} , $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 为 0.003~0.20 mg L^{-1} 平均约 0.0114 mg L^{-1} , 平均摩尔 N:P 约为 74.6, 明显高于 Redfield 比值 16 : 1^[26]。结合黄海近岸海域营养盐背景研究, 高 N/P 比在近岸受陆源输入和养殖活动影响的海域较为常见, 并可能使系统呈现磷限制倾向^[38-39]。2023 年 5 月, 研究海

域 DO 达到最高值,沿海浅水高生产力生境中,DO 常受初级生产驱动而表现出显著的昼夜波动,白天强光照射条件下局地水体可出现较高溶解氧甚至过饱和现象^[40-41],结合本研究 2023 年 5 月处于较低水温阶段、同期大型附着藻类生物量达到全周期高值,较高 DO 更可能反映了大型附着藻类旺盛生长背景下的局地高氧状态。此外,2023 年 8 月研究海域 pH 值平均为 7.31 ± 0.09 ,显著低于其他调查时间。近岸海域 pH 值的波动通常大于外海,除温度外,还受生物生产与呼吸、气-海 CO₂ 交换及短期水文混合等多因素共同调控^[42]。结合研究海域周边养殖和渔业活动较强的背景,2023 年 8 月较低的 pH 值可能与夏季高温条件下局部生物地球化学过程增强及短期水文混合变化共同作用有关。

4.3 钢-混复合基质的功能互补及其生态修复意义

与单一材料藻礁相比,本研究中钢材与混凝土在同一礁体内表现出的功能互补,构成了复合基质设计的核心优势。混凝土更适于大型附着藻类早期附着和后期生物量累积,钢材则更有利于附着动物持续定殖和多样性维持,两者在同一礁体单元中的组合,使初级生产者和附着消费者能够在不同微空间中获得相对适宜的附着条件。这种不同并未表现为简单的替代关系,而更接近于通过空间分化实现生态位互补,从而提高整个礁体系统的生物量承载能力和群落复杂性^[17,31]。

从群落互作过程看,不同材料上的附着生物变化表明,基质属性可在群落演替过程中影响类群分布及其稳定性。2022 年 9 月混凝土表面附着生物明显减少,而钢材表面仍维持较高的附着动物生物量,表明两类基质对季节扰动的响应并不一致。夏末秋初,早期的孔石莼等先锋绿藻易受高温胁迫而大量老化脱落^[43-44]。混凝土表面的附着动物依赖大型海藻提供微生境,藻层的集中丧失直接导致其大量流失^[45-46]。相比之下,钢材表面前期大型藻类较少,长牡蛎(*Crassostrea gigas*)等固着动物大多直接附着于坚硬基底上,受海藻衰亡脱落的影响较小。随着演替进入中后期,大型褐藻的高密度覆盖会通过空间占据与扫描作用影响部分固着动物的定居^[47]。钢-混复合结构在一定程度上形成了大型藻类与附着动物的空间分离,有利于维持较高的生物量与群落稳定性。

这一结果对人工藻礁设计与海藻场修复具有直

接启示。传统材料筛选往往更关注单一功能目标,如提升大型藻类附着率或增强附着动物聚集效果,而本研究表明,在同一礁体内构建材料异质性,更有利于同步提升大型藻类与附着动物两类群的建成效果,并促进群落结构复杂化和生态功能多样化^[17,31]。因此,人工藻礁材料选择不宜仅以某一类生物的附着量高低作为评价标准,而应更多考虑不同材料在同一构筑单元中的功能互补性。未来仍需在更长时间尺度上进一步关注复合藻礁的群落稳定性及抗扰动能力,并结合材料表面生物膜形成过程、微尺度粗糙度差异及周边种源供给等因素,进一步阐明其附着生物定殖与演替机制。

5 结论

本研究基于“基质异质性”假说,设计了一种钢-混异质型复合人工藻礁,并在山东省荣成海域开展了为期两年的原位连续监测,系统评估了钢材与混凝土对附着生物群落构建的筛选机制、演替规律及其环境驱动要素。结果表明:(1)钢材与混凝土表现出显著的功能群分化特征,混凝土更适宜大型海藻定殖,其成熟期藻类生物量是钢材的 1.9 倍,而钢材为附着动物提供了更广阔的生态位,其附着动物生物量达到混凝土的 8.3 倍;(2)大型附着藻类群落呈现明显的阶段性演替特征,表现出由机会型绿藻到多年生褐藻的演替规律,在投礁后 20 个月形成了以裙带菜为主导的稳定顶级群落,且有效抑制了富营养化水体中机会型绿藻的爆发;(3)同一礁体单元中,钢材与混凝土的组合使用可显著促进大型藻类建植和附着动物定殖,表现出明显的功能互补特征。

本研究表明,基于钢材与混凝土不同材料属性的耦合设计,能够在一个礁体单元中有效实现初级生产者与次级消费者功能互补。这种组合模式有效突破了单一材料的生态局限,为构建高生物量、高稳定性的牧场生境提供了理论依据与数据支撑。鉴于附着生物群落演替的长期性,未来建议在更长时间尺度上关注群落的稳定性与抗干扰能力。此外,本研究对材料微观层面的认识还不够深入,特别是关于材料表面形成的生物膜如何影响大型生物附着的过程与机制尚不清晰。未来有必要进一步开展生物膜形成及其对附着生物定殖效果的影响研究,从而明确人工藻礁附着生物的定殖机制及其驱动要素。

参考文献:

- [1] United Nations Environment Programme. Into the blue: securing a sustainable future for kelp forests[R]. Nairobi: UNEP, 2023.

- [2] Hanley M E, Firth L B, Foggo A. Victim of changes? Marine macroalgae in a changing world[J]. *Annals of Botany*, 2024, 133(1): 1–16.
- [3] Eger A M, Marzinelli E M, Beas-Luna R, et al. The value of ecosystem services in global marine kelp forests[J]. *Nature Communications*, 2023, 14(1): 1894.
- [4] Krause-Jensen D, Duarte C M. Substantial role of macroalgae in marine carbon sequestration[J]. *Nature Geoscience*, 2016, 9(10): 737–742.
- [5] Fourqurean J W, Duarte C M, Kennedy H, et al. Seagrass ecosystems as a globally significant carbon stock[J]. *Nature Geoscience*, 2012, 5(7): 505–509.
- [6] Breithaupt J L, Smoak J M, Smith III T J, et al. Organic carbon burial rates in mangrove sediments: strengthening the global budget[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2012, 26(3): GB3011.
- [7] Mauffrey A R L, Cappelatti L, Griffin J N. Seaweed functional diversity revisited: confronting traditional groups with quantitative traits[J]. *Journal of Ecology*, 2020, 108(6): 2390–2405.
- [8] Valiela I, Bowen J L, York J K. Mangrove forests: one of the world's threatened major tropical environments: at least 35% of the area of mangrove forests has been lost in the past two decades, losses that exceed those for tropical rain forests and coral reefs, two other well-known threatened environments[J]. *BioScience*, 2001, 51(10): 807–815.
- [9] United Nations General Assembly. United Nations Decade on Ecosystem Restoration (2021–2030): resolution/adopted by the general assembly[R]. New York: United Nations, 2019.
- [10] Harris L E, Mostkoff B J, Zadikoff G. Artificial reefs: from waste to resources[C]//OCEANS 96 MTS/IEEE Conference Proceedings. The Coastal Ocean-Prospects for the 21st Century. Fort Lauderdale: IEEE, 1996: 754–759.
- [11] 张磊, 郝振林, 张秀梅. 不同模型礁底栖藻类附着效果的初步研究[J]. *南方水产科学*, 2011, 7(2): 1–7.
Zhang Lei, Hao Zhenlin, Zhang Xiumei. Preliminary study on attaching effect of benthic algae on different reef models[J]. *South China Fisheries Science*, 2011, 7(2): 1–7.
- [12] Lee I C, Park S, Woo H E, et al. A study on macroalgae establishment on concrete substratum covered by oyster shells[J]. *Journal of the Korean Society of Marine Environment and Safety*, 2021, 27(5): 639–646.
- [13] Harlin M M, Lindbergh J M. Selection of substrata by seaweeds: optimal surface relief[J]. *Marine Biology*, 1977, 40(1): 33–40.
- [14] Jung S W, Choi C G. Seaweed community and succession on a trapezoidal-shaped artificial reef[J]. *Ocean Science Journal*, 2022, 57(1): 130–140.
- [15] Cho S H, Choi C G, Choa J H. Restoration of the seaweed forest and algal succession on a porous type (shaped half saw teeth) artificial reef[J]. *Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2007, 40(4): 220–225.
- [16] Earp H S, Smale D A, Pérez-Matus A, et al. A quantitative synthesis of approaches, biases, successes, and failures in marine forest restoration, with considerations for future work[J]. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 2022, 32(11): 1717–1731.
- [17] Romoth K, Darr A, Papenmeier S, et al. Substrate heterogeneity as a trigger for species diversity in marine benthic assemblages[J]. *Biology*, 2023, 12(6): 825.
- [18] 邓筱凡, 张宏瑜, 吴忠迅, 等. 荣成马山里海域海草床分布现状及其生态特征[J]. *海洋学报*, 2022, 44(8): 97–109.
Deng Xiaofan, Zhang Hongyu, Wu Zhongxun, et al. Distribution and ecological characteristics of seagrass bed of Mashanli sea area in Rongcheng[J]. *Haiyang Xuebao*, 2022, 44(8): 97–109.
- [19] 李文涛, 王欢, 仲崇凤, 等. 山东荣成马山里海域大型藻类群落结构时空变化研究[J]. *海洋科学*, 2022, 46(5): 74–85.
Li Wentao, Wang Huan, Zhong Chongfeng, et al. Spatial and temporal variations in the benthic macroalgal communities along the Mashanli coast of Rongcheng, Shandong Province, China[J]. *Marine Sciences*, 2022, 46(5): 74–85.
- [20] 中华人民共和国农业部. SC/T 9416-2014, 人工鱼礁建设技术规范[S]. 北京: 中国农业出版社, 2014.
Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. SC/T 9416-2014, Technical specifications for artificial reef construction[S]. Beijing: China Agriculture Press, 2014.
- [21] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 12763.2-2007, 海洋调查规范 第 2 部分: 海洋水文观测[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 12763.2-2007, Specifications for oceanographic survey—Part 2: marine hydrographic observation[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.
- [22] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB 17378.4-2007, 海洋监测规范 第 4 部分: 海水分析[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB 17378.4-2007, The specification for marine monitoring—Part 4: seawater analysis[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.
- [23] 刘涛, 陈伟州, 谢朝添. 黄、渤海及东海常见大型海藻图鉴[M]. 北京: 海洋出版社, 2018. (查阅网上资料, 未找到对应的标黄作者信息, 请确认)
Liu Tao, Chen Weizhou, Xie Chaotian. Illustrated Atlas of Common Marine Macroalgae in the Yellow Sea, Bohai Sea and East China Sea[M]. Beijing: China Ocean Press, 2018. (查阅网上资料, 未找到对应的英文翻译, 请确认)

- [24] 张学雷. 黄海底栖动物常见种形态分类图谱[M]. 北京: 科学出版社, 2024.
Zhang Xuelei. Illustrated Taxonomic Atlas of Common Benthic Animals in the Yellow Sea[M]. Beijing: Science Press, 2024. (查阅网上资料, 未找到对应的英文翻译, 请确认)
- [25] 生态环境部. HJ 1300-2023, 海水、海洋沉积物和海洋生物质量评价技术规范[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2023.
Ministry of Ecology and Environment. HJ 1300-2023, Technical specification for assessment of sea water, marine sediment and marine biological quality[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2023.
- [26] Whitfield M, Watson A J. The influence of biomineralisation on the composition of seawater[M]//Westbroek P, Jong E W. Biomineralization and Biological Metal Accumulation. Dordrecht: Springer, 1983: 57–72.
- [27] Hargrave M S, Nylund G M, Enge S, et al. Co-cultivation with blue mussels increases yield and biomass quality of kelp[J]. *Aquaculture*, 2022, 550: 737832.
- [28] Miller R J, Lafferty K D, Lamy T, et al. Giant kelp, *Macrocystis pyrifera*, increases faunal diversity through physical engineering[J]. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2018, 285(1874): 20172571.
- [29] Natanzi A S, Thompson B J, Brooks P R, et al. Influence of concrete properties on the initial biological colonisation of marine artificial structures[J]. *Ecological Engineering*, 2021, 159: 106104.
- [30] Hayek M, Salgues M, Souche J C, et al. Influence of the intrinsic characteristics of cementitious materials on biofouling in the marine environment[J]. *Sustainability*, 2021, 13(5): 2625.
- [31] Vivier B, Dauvin J C, Navon M, et al. Marine artificial reefs, a meta-analysis of their design, objectives and effectiveness[J]. *Global Ecology and Conservation*, 2021, 27: e01538.
- [32] Sousa W P. Experimental investigations of disturbance and ecological succession in a rocky intertidal algal community[J]. *Ecological Monographs*, 1979, 49(3): 227–254.
- [33] Underwood A J, Anderson M J. Seasonal and temporal aspects of recruitment and succession in an intertidal estuarine fouling assemblage[J]. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 1994, 74(3): 563–584.
- [34] Choi C G, Takayama H, Segawa S, et al. Research Articles/Early stage of algae succession on artificial reefs at Muronohana, Ikata, Japan[J]. *Fisheries and Aquatic Sciences*, 2000, 3(1): 1–7.
- [35] 聂猛, 李文涛, 李勇, 等. 山东半岛典型海域大叶藻 (*Zostera marina*) 附着大型藻类群落结构[J]. *生态学杂志*, 2014, 33(7): 1786–1794.
Nie Meng, Li Wentao, Li Yong, et al. Structure of epiphytic algal community of eelgrass (*Zostera marina*) in a typical coastal area of Shandong Peninsula[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33(7): 1786–1794.
- [36] Epstein G, Smale D A. *Undaria pinnatifida*: a case study to highlight challenges in marine invasion ecology and management[J]. *Ecology and Evolution*, 2017, 7(20): 8624–8642.
- [37] 张磊, 张秀梅, 吴忠鑫, 等. 荣成俚岛人工鱼礁区大型底栖藻类群落及其与环境因子的关系[J]. *中国水产科学*, 2012, 19(1): 116–125.
Zhang Lei, Zhang Xiumei, Wu Zhongxin, et al. Effect of environment on benthic macro-algal communities of artificial reefs in Lidao, Rongcheng[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2012, 19(1): 116–125.
- [38] Wang Baodong, Wang Xiulin, Zhan Run. Nutrient conditions in the Yellow Sea and the East China Sea[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2003, 58(1): 127–136.
- [39] Li Hongmei, Zhang Chuansong, Han Xiurong, et al. Changes in concentrations of oxygen, dissolved nitrogen, phosphate, and silicate in the southern Yellow Sea, 1980-2012: sources and seaward gradients[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2015, 163: 44–55.
- [40] Booth J M, Fusi M, Giomi F, et al. Diel oxygen fluctuation drives the thermal response and metabolic performance of coastal marine ectotherms[J]. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2021, 288(1953): 20211141.
- [41] Correia K M, Smee D L. Habitat suitability of drift macroalgae in two shallow coastal estuaries of the northern Gulf of Mexico[J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2022, 557: 151808.
- [42] Li Yunxiao, Yang Hong, Dang Jiajia, et al. Seasonal variation of sea surface pH and its controls in the Jiaozhou Bay, China[J]. *Continental Shelf Research*, 2022, 232: 104613.
- [43] Zhang Guangzong, Wu Mengquan, Zhou Min, et al. The seasonal dissipation of *Ulva prolifera* and its effects on environmental factors: based on remote sensing images and field monitoring data[J]. *Geocarto International*, 2022, 37(3): 860–878.
- [44] Hiraoka M. Massive *Ulva* green tides caused by inhibition of biomass allocation to sporulation[J]. *Plants*, 2021, 10(11): 2482.
- [45] Milazzo M, Badalamenti F, Riggio S, et al. Patterns of algal recovery and small-scale effects of canopy removal as a result of human trampling on a Mediterranean rocky shallow community[J]. *Biological Conservation*, 2004, 117(2): 191–202.
- [46] Pocklington J B, Jenkins S R, Bellgrove A, et al. Disturbance alters ecosystem engineering by a canopy-forming alga[J]. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 2018, 98(4): 687–698.
- [47] Loke L H L, Liao L M, Bouma T J, et al. Succession of seawall algal communities on artificial substrates[J]. *Raffles Bulletin of Zoology*, 2016(S32): 1–10.

Study on the colonization dynamics and successional trajectories of sessile organisms on steel-concrete cubic artificial algal reefs

LI Lu-yao, LI Wen-tao, LI Yan-ping, ZHAO qi, ZHANG Pei-dong

(The Key Laboratory of Mariculture (Ocean University of China), Ministry of Education, Qingdao, Shandong 266003, China)

Abstract: To address the limited habitat heterogeneity and suboptimal biological attachment capacity of single-material artificial algal reefs in seaweed bed restoration, this study designed a steel-concrete composite artificial algal reef. Twelve replicate reefs were fabricated and deployed in the Mashanli sea area of Rongcheng in August 2021. Attached macroalgae and animals colonizing both materials, as well as key environmental parameters at the reef site, were monitored in November 2021, June 2022, September 2022, May 2023, and August 2023. Results revealed: (1) the two materials differed significant in their macroalgal establishment effects, with the biomass of attached macroalgal on concrete being significantly higher than that attached on steel, reaching 1.7 times that on steel during the entire monitoring period on average ($P < 0.05$); (2) macroalgal community structure was jointly shaped by seasonality and reef age, progressing from an early Chlorophyta-dominated phase to a late Phaeophyta-dominated phase. Rhodophyta appeared transiently but never established a persistent dominant stage. After 20 months, a stable, top-level community dominated by *Undaria pinnatifida* emerged ($Y = 0.99$); (3) the colonization dynamics of attached animals varied significantly between two substrate materials. Specifically the biomass of attached animals on steel substrates was 8.3 times higher than that on concrete substrates ($P < 0.05$). These results indicate that, within identical reef units, concrete supported greater macroalgal establishment, whereas steel facilitated significantly higher settlement of attached animals. Combining both materials in artificial reef construction yields synergistic benefits: it concurrently promotes macroalgal development and attached animal colonization, thereby achieving functional complementarity, and significantly enhances both the total biomass and taxonomic diversity of sessile organisms. This dual-substrate strategy provides an evidence-based framework for optimizing material selection in artificial algal reef engineering.

Key words: Artificial algal reef; Material selection; Macroalgae; Community succession; Attachment effect