

DOI: 10.12264/JFSC2021-0335

## 莱州芙蓉岛海域人工鱼礁附着生物的群落结构和功能性状

詹启鹏<sup>1</sup>, 孙昕<sup>1</sup>, 董建宇<sup>1</sup>, 张宇洋<sup>1</sup>, 张秀梅<sup>2,3</sup>

1. 中国海洋大学, 海水养殖教育部重点实验室, 山东 青岛 266003;
2. 浙江海洋大学水产学院, 浙江 舟山 316022;
3. 青岛海洋科学与技术(试点)国家实验室, 海洋渔业科学与食物产出过程功能实验室, 山东 青岛 266072

**摘要:** 为探究人工鱼礁礁龄对附着生物群落结构和功能性状的影响, 本研究于2019年5月、8月和10月通过潜水样方取样, 调查了莱州芙蓉岛海域人工鱼礁的礁体附着生物。共鉴定出附着生物94种, 其中节肢动物门(Arthropoda)种类最多, 为33种, 软体动物门(Mollusca)次之, 为21种。1龄鱼礁(投放时间为1年的短礁龄)附着生物的种类为66种, 4~5龄鱼礁(投放时间为4~5年的长礁龄)为79种。不同季节和不同礁龄鱼礁附着生物群落的种类组成和优势种存在差异, 在附着生物群落的种类丰富度、多样性指数和均匀度指数方, 长礁龄礁区均显著高于短礁龄礁区。本研究选取了摄食习性(feeding habits)、活动能力(mobility)、栖息方式(habitat)、成体大小(body size at maturity)、寿命(longevity)和身体柔韧度(flexibility)6个功能性状(共计21种性状类型), 比较了不同季节2种礁龄附着生物群落功能性状的相对丰度。结果表明, 本海域人工鱼礁上更易附着滤食性、无活动能力、固着型、长寿命(>5年)、无身体柔韧性、规格极小(<1 cm)的物种, 代表种为大室别藻苔虫(*Membranipora grandicella*)。2种礁龄附着生物群落功能性状的差异主要体现在摄食习性、活动能力和栖息方式上, 4~5龄鱼礁附着生物群落的捕食性、强活动能力以及埋栖和爬行栖息方式等性状的相对丰度显著高于1龄鱼礁( $P < 0.05$ ), 而滤食性、固着型和无活动能力等性状的相对丰度显著低于1龄鱼礁( $P < 0.05$ )。附着生物群落的功能多样性和功能冗余程度方面, 4~5龄鱼礁高于1龄鱼礁, 但差异不显著。本研究运用传统生物多样性指数和生物性状法(BTA)分析了不同季节长、短礁龄人工鱼礁附着生物群落结构和功能性状的差异, 为揭示人工鱼礁的生态效应提供了新视角。

**关键词:** 附着生物; 人工鱼礁; 礁龄; 功能性状; 功能多样性; 海洋牧场

中图分类号: S931

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2022)05-0704-16

人工鱼礁建设作为海洋牧场生态环境营造的关键技术, 是通过在水域环境中投放人工构筑物, 构建或修复海洋生物生长、繁殖、索饵或避敌所需场所, 起到保护、增殖渔业资源和改善海域生态环境的作用<sup>[1-3]</sup>。人工鱼礁投放后会产生多种生态效应, 如流场效应<sup>[4]</sup>、庇护效应<sup>[5]</sup>和饵料效应等<sup>[6]</sup>。饵料效应直接表现为附着生物、底栖生物和浮游生物种类、丰度和生物量的增加<sup>[7]</sup>, 其中礁体的附着生物是形成饵料效应最主要的因素<sup>[8-9]</sup>。

山东莱州芙蓉岛海域现已建成人工鱼礁区4处,

投放人工鱼礁35.675万空方。研究表明, 该海域人工鱼礁建设在渔业资源补充、提高海域初级生产力以及改善海域生态环境方面均发挥了积极的作用<sup>[10-11]</sup>, 然而, 对于能直接体现鱼礁饵料效应的附着生物等相关研究尚不多见。此外, 学者们对人工鱼礁附着生物的研究大多聚焦于不同鱼礁材料挂板的生物附着效果以及物种组成、丰度和多样性指数等方面, 但这些指标所提供的信息有限, 难以获悉人工鱼礁附着生物群落的生态功能, 也不足以深入探究鱼礁生态系统的演替过程<sup>[12-13]</sup>。因此, 一种融合多种生

收稿日期: 2021-08-09; 修订日期: 2021-08-28.

基金项目: 国家重点研发计划“蓝色粮仓科技创新”重点专项(2019YFD0901303); 山东省支持青岛海洋科学与技术国家实验室重大科技专项(2018SDKJ0501-4).

作者简介: 詹启鹏(1991-), 硕士, 专业方向为人工鱼礁和海洋牧场生态学. E-mail: zhanqipeng@163.com

通信作者: 张秀梅, 教授, 专业方向为鱼类行为生态学、渔业资源增殖生态学. E-mail: xiumei1227@163.com

物功能性状,能够揭示生物群落功能的分析方法即生物性状分析(biological traits analysis, BTA)被越来越多的学者所采纳,并被广泛应用于陆地和水生生态系统,以探究生物群落的功能结构和生态系统过程<sup>[14-15]</sup>。目前,利用生物性状分析方法对不同时间序列人工鱼礁附着生物的研究还未见报道。本研究运用传统生物多样性指数和生物性状分析法(BTA),综合分析了芙蓉岛海域 1 礁龄和 4~5 礁龄人工鱼礁附着生物群落结构和功能性状的差异及季节变化,以期为揭示人工鱼礁的生态效应和构建海洋牧场生态学理论提供基础数据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域

研究区域位于烟台莱州太平湾芙蓉岛北侧和东侧的人工鱼礁区(图 1),其中礁区 A (artificial reef area of A, AR-A)和礁区 B (AR-B)为 1 礁龄的礁区,建设时间为 2018 年 5~8 月,礁区由 9 万空方的石块礁和 0.8 万空方的方形钢混构件礁组成。礁区 C (AR-C)和礁区 D (AR-D)为 4~5 礁龄的礁区,建设时

间为 2013 年至 2014 年,礁区由 18.625 万空方的石块礁和 7.25 万空方的管桩混凝土构件礁组成。石块礁以长条形进行布设,各长条石块礁宽度为 10 m,间距为 8 m,构件礁采用矩阵式排列,纵横间距均为 3 m。本研究以石块礁上的附着生物群落为研究对象,并将 AR-A 和 AR-B 合并归为短礁龄区 (AR-AB)、将 AR-C 和 AR-D 合并归为长礁龄区 (AR-CD)。调查站位水深均为 3~4 m。

### 1.2 样品采集

于 2019 年春季、夏季和秋季(5 月、8 月和 10 月)对芙蓉岛海域人工鱼礁区进行潜水样方取样调查,每个礁区设 3 个调查站位(图 1),每个站位重复取样方 3 次(样方面积: 25 cm×25 cm);刮取样方内鱼礁表面所有生物,包括附着生物与藏匿其中的生物个体,带回实验室进行挑拣、分类和鉴定。利用体视显微镜(Nikon SMZ1000, 日本)对物种进行鉴定,通过 WoRMS 网站(<http://www.marinespecies.org/>)对鉴定出的物种名录进行校对和复核。样品的处理、鉴定和称重均按《海洋调查规范》(GB/T12763-2007)进行<sup>[16]</sup>。

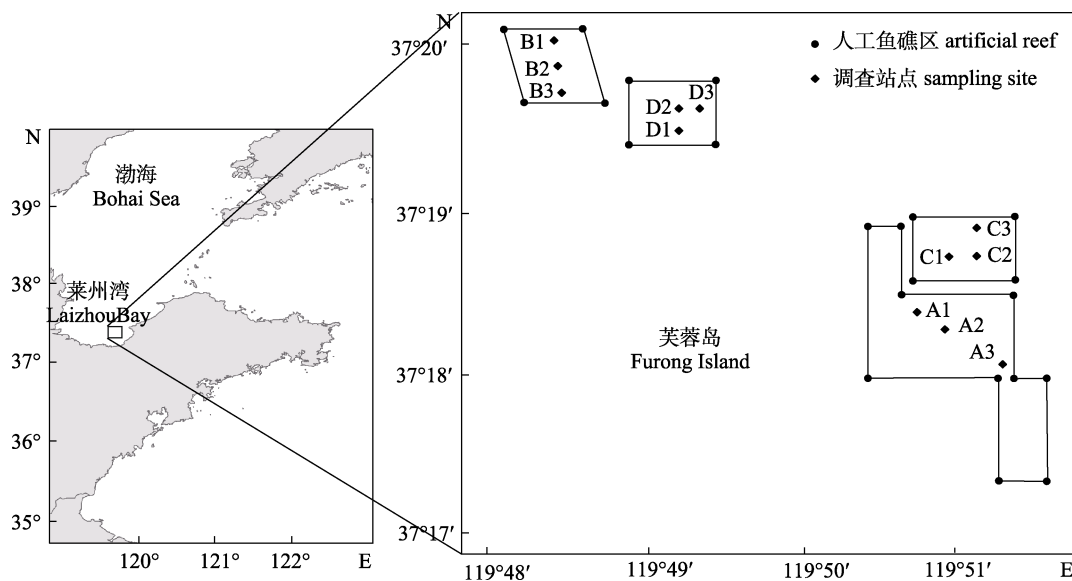


图 1 人工鱼礁附着生物调查站位点

A 和 B 为 1 龄鱼礁 AR-AB 内的调查站点; C 和 D 为 4~5 龄鱼礁 AR-CD 内的调查站点。

Fig. 1 Sampling sites of attached community on artificial reefs

A and B were the survey sites in AR-AB, C and D were the survey sites in AR-CD.

### 1.3 生物性状分析

选取 6 种已知的影响生态系统功能的性状,包括形态学(个体大小、身体柔韧性),行为(生活方式、

活动能力和摄食习性)和生活史(寿命)等,共计 21 种性状类型(表 1, 附录 1),对鱼礁附着生物群落的功能性状进行分析。生物性状数据通过已公开发表的

文献<sup>[17-20]</sup>以及网上数据库获得(例如: MarLIN BIOTIC: www.marlin.ac.uk/biotic 和 Marine Species Identification Portal: www.species-identification.org)。根据性状类型与物种的相符度,采用模糊编码<sup>[21]</sup>(范围 0~3)对性状类型赋值,其中 0 表示不相符,而 3 代表高度相符。由于某些物种具有多种行为特征,因此需对某一生物性状的多种性状类型进行赋值。例如,有些物种具有 2 种摄食方式且二者所占比重相同,则该物种所具有的这 2 种摄食方式均可赋值为 2。功能性状赋值尽量以物种为单位,对部分种类的部分功能性状缺乏直接参考资料的,赋值参照属或科级的功能性状值。生物性状分析(BTA)需要 3 个不同的数据矩阵:①每一站位的物种丰度矩阵;②每一物种的生物性状矩阵;③前两个矩阵的结合,即每一站位的生物性状矩阵<sup>[14]</sup>。为降低优势物种丰度对结果的影响,在获得生物性状矩阵前,对物种丰度矩阵①进行  $\ln(1+x)$ 转换。

表 1 生物性状和性状类型  
Tab. 1 Biological traits and categories

生物性状 biological trait	性状类型 trait category	缩写 abbreviation
摄食方式 feeding habits	捕食性 predator	F1
	植食性 herbivore	F2
	沉积物食性 deposit feeder	F3
	滤食性 filter-feeder	F4
活动能力 mobility	无活动能力 none	M1
	活动能力中等 medium	M2
	活动能力强 high	M3
栖息方式 habitat	固着 sessile	H1
	游泳 swimmer	H2
	埋栖 burrower	H3
	爬行 crawler	H4
寿命 longevity	短(0-2 年) short	L1
	中等(2-5 年) medium	L2
	长(>5 年) long	L3
成体大小 body size at maturity	极小(<1 cm) very small	B1
	小(1-3 cm) small	B2
	中等(3-10 cm) medium	B3
	大(>10 cm) large	B4
身体柔韧度 flexibility	无(<10°) none	FL1
	低(10-45°) low	FL2
	高(>45°) high	FL3

## 1.4 数据分析

鱼礁附着生物数量丰度以每平方米出现的个体数表示(单位: ind/m<sup>2</sup>),采用 Margalef 种类丰富度指数、Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数和 Pinkas 相对重要性指数对鱼礁附着生物进行群落特征分析。

Margalef 种类丰富度指数( $D$ ):  $D = (S-1)/\ln N$

Shannon-Wiener 多样性指数( $H'$ ):

$$H' = -\sum_{n_i}^s \left( \frac{n_i}{N} \right) \log_2 \left( \frac{n_i}{N} \right)$$

Pielou 均匀度指数:  $J = H'/\log_2 S$

Pinkas 相对重要性指数

$$IRI = (w_i/W + n_i/N) \times F \times 10^4$$

式中,  $W$  为生物量,  $S$  为采集样品种类总数,  $N$  为样品的总丰度,  $n_i$  和  $w_i$  为第  $i$  种的个数和生物量,  $F$  为物种出现的频率,  $IRI \geq 1000$  作为优势种的判别标准<sup>[22]</sup>。

采用 Rao's 二次熵指数来表示附着生物群落的功能多样性:

$$FD_Q = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N d_{ij} P_i P_j$$

式中,  $FD_Q$  表示群落中 2 个随机物种的平均差异;  $d_{ij}$  表示物种  $i$  和物种  $j$  的差异( $d_{ij}=d_{ji}$  和  $d_{ii}=0$ ),  $P_i$  为第  $i$  种生物的丰度占总丰度的比例,  $P_j$  为第  $j$  种生物的丰度占总丰度的比例。

$$d_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n |X_{ik} - X_{jk}|$$

式中,  $n$  为功能特征总数,  $X_{ik}$  和  $X_{jk}$  分别为物种  $i$  和  $j$  的功能特征  $k$  的指数值<sup>[23]</sup>。

采用  $FD/H'$  表示功能冗余,  $FD/H'$  越大, 功能冗余程度越低<sup>[14]</sup>。

采用 R 语言对各季节采样点的附着生物群落的物种组成及丰度进行聚类分析, nMDS 聚类分析结果采用胁迫系数(stress)来衡量, stress<0.2 时结果可靠<sup>[24]</sup>。

功能性状分析以人工鱼礁上附着生物群落为研究对象,并以功能类型(trait category)的丰度在同类功能性状(biological trait)总丰度中的百分比表示性状相对丰度。利用 R 语言 FD 程序包计算功能多样性,并使用软件 spss 19.0 中的单因素方差分析(one-way ANOVA)比较功能性状相对丰度、功能多样性指数和功能冗余指数时空格上的差异。

## 2 结果与分析

### 2.1 群落划分与优势物种

通过等级聚类(Cluster)和非度量多维标度排序(nMDS)对人工鱼礁附着生物群落组成进行聚类分析, 结果表明, 相同季节的调查站位聚为一类(图 2)。各季节的聚类中, 除秋季 A2 和 B3 外, 长礁龄和短礁龄各自聚为一类, 即短礁龄礁区的 AR-A 和 AR-B 聚为一类, 长礁龄礁区的 AR-C 和 AR-D 聚为一类(下文以 AR-AB 表示礁龄为 1 年的短礁龄礁区, 以 AR-CD 表示礁龄为 4~5 年的长礁龄礁区)。

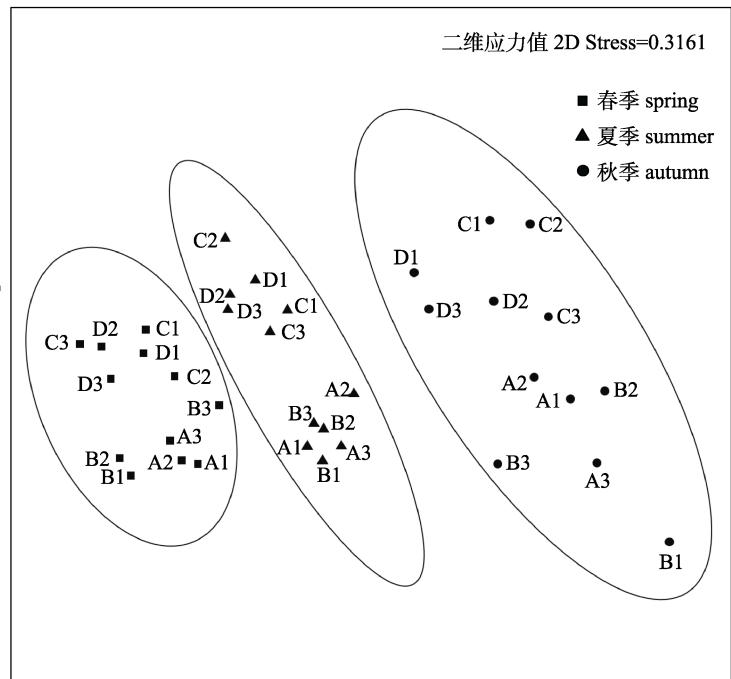
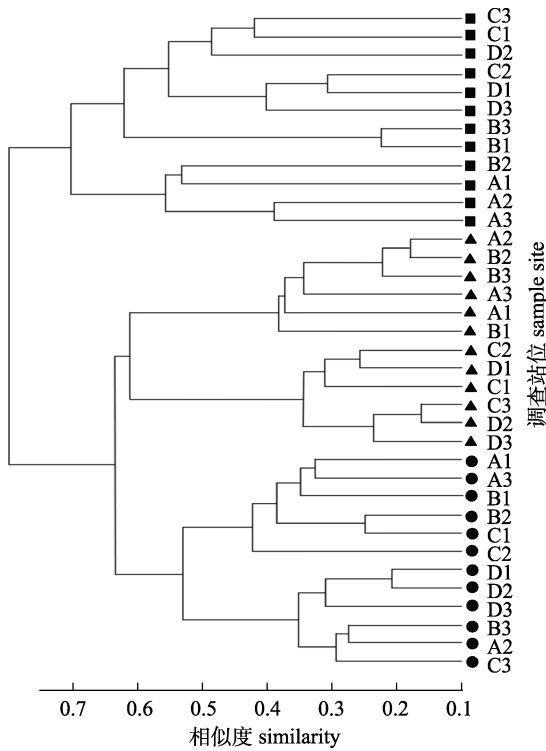


图 2 鱼礁附着生物群落聚类分析(左图)和非度量多维标度排序(右图)

A、B 为 1 龄礁区 AR-AB 内的调查站点; C 和 D 为 4~5 龄礁区 AR-CD 内的调查站点。

Fig. 2 Cluster and nonmetric multidimensional scaling plots based on abundance data

A and B were the survey sites in AR-AB, C and D were the survey sites in AR-CD.

表 2 不同季节鱼礁附着生物的群落特征指数

Tab. 2 Diversity indices of the attached community on artificial reefs in different seasons

鱼礁区域 reef area	春季 spring			夏季 summer			秋季 autumn		
	1 龄礁区 AR-AB	4-5 龄礁区 AR-CD	礁区整体 total	1 龄礁区 AR-AB	4-5 龄礁区 AR-CD	礁区整体 total	1 龄礁区 AR-AB	4-5 龄礁区 AR-CD	礁区整体 total
物种数 species number	38	44	53	29	46	51	40	49	63
平均丰度/(ind/m <sup>2</sup> ) abundance	3464	5068	4266	1352	5032	3192	2344	6460	4402
平均生物量/(g/m <sup>2</sup> ) biomass	1104.47	1368.96	1236.56	300.34	1296.65	798.12	728.02	1646.43	1187.21
丰富度指数 richness index	5.03	5.34	5.19	3.65	5.46	4.55	5.19	5.45	5.32
多样性指数 diversity index	3.37	3.69	3.43	3.60	3.91	3.85	3.98	4.29	4.19
均匀度指数 evenness index	0.60	0.68	0.61	0.70	0.74	0.68	0.74	0.76	0.70

数、丰度、生物量、种类丰富度指数、多样性指数和均匀度指数等方面,长礁龄礁区 AR-CD 的群落特征指数均显著大于短礁龄礁区 AR-AB ( $P<0.05$ , 表 3)。

### 2.3 优势种

各季节鱼礁附着生物的优势种存在差异,尽管长短礁龄之间存在共同的优势种,但优势种的组成和优势度均存在差异(表 4)。春季,鱼礁区 AR-AB

与 AR-CD 优势种均包含脉红螺(*Rapana venosa*)、乳突皮海鞘(*Molgula manhattensis*)、大室别藻苔虫(*Membranipora grandicella*)和刺盘管虫(*Hydroides ezoensis*) 4 种,夏季长短礁龄共同优势种仅大室别藻苔虫和中华近方蟹(*Xanthias sinensis*) 2 种,秋季的共同优势种为中华近方蟹(*Xanthias sinensis*)、团岛毛刺蟹(*Pilumnus tuantaoensis*)、有齿背鳞虫(*Lepidonotus dentatus*)和丽小笔螺(*Mitrella bella*)。

表 3 长短礁龄人工鱼礁的群落特征指数

Tab. 3 Diversity indices of attached community on artificial reefs between the 2 ages

$n=18; \bar{x} \pm SD$

鱼礁区域 reef area	物种数 species number	丰度/(ind/m <sup>2</sup> ) abundance	生物量/(kg/m <sup>2</sup> ) biomass	丰富度指数 richness index	多样性指数 diversity index	均匀度指数 evenness index
1 龄礁区 AR-AB	36.51±6.80 <sup>a</sup>	2387.05±862.73 <sup>a</sup>	710.94±328.51 <sup>a</sup>	4.62±0.69 <sup>a</sup>	3.39±0.36 <sup>a</sup>	0.65±0.05 <sup>a</sup>
4~5 龄礁区 AR-CD	47.32±8.26 <sup>b</sup>	5520.67±664.8 <sup>b</sup>	1437.05±150.80 <sup>b</sup>	5.42±0.05 <sup>b</sup>	3.77±0.27 <sup>b</sup>	0.71±0.04 <sup>b</sup>

注: 同列不同字母表示不同组合之间差异显著( $P<0.05$ )。

Note: Different letters indicate significant difference ( $P<0.05$ ).

表 4 不同季节长短礁龄鱼礁附着生物群落优势种(ARI>1000)

Tab. 4 Dominant species of attached community on artificial reefs between the 2 ages in different seasons (ARI>1000)

季节 season	短礁龄人工鱼礁区域 AR-AB		长礁龄人工鱼礁区域 AR-CD	
	优势种 dominant species	优势度 IRI	优势种 dominant species	优势度 IRI
春季 spring	脉红螺 <i>Rapana venosa</i>	5224	大室别藻苔虫 <i>Membranipora grandicella</i>	4826
	乳突皮海鞘 <i>Molgula manhattensis</i>	4319	脉红螺 <i>Rapana venosa</i>	2555
	大室别藻苔虫 <i>Membranipora grandicella</i>	3977	有齿背鳞虫 <i>Lepidonotus dentatus</i>	2108
	刺盘管虫 <i>Hydroides ezoensis</i>	1408	乳突皮海鞘 <i>Molgula manhattensis</i>	1731
夏季 summer			丽小笔螺 <i>Mitrella bella</i>	1125
	大室别藻苔虫 <i>Membranipora grandicella</i>	5694	刺盘管虫 <i>Hydroides ezoensis</i>	1144
	脉红螺 <i>Rapana venosa</i>	3214	有齿背鳞虫 <i>Lepidonotus dentatus</i>	3386
	丽小笔螺 <i>Mitrella bella</i>	2343	中华近方蟹 <i>Xanthias sinensis</i>	1874
	中华近方蟹 <i>Xanthias sinensis</i>	2883	大室别藻苔虫 <i>Membranipora grandicella</i>	1542
	团岛毛刺蟹 <i>Pilumnus tuantaoensis</i>	1204	锈凹螺 <i>Chlorostoma rustica</i>	1144
	日本蜆 <i>Charybdis japonica</i>	1071	毛须鳃虫 <i>Cirriformia filigera</i>	1003
秋季 autumn	中华近方蟹 <i>Xanthias sinensis</i>	3343	有齿背鳞虫 <i>Lepidonotus dentatus</i>	3033
	中国毛虾 <i>Acetes chinensis</i>	2340	中华近方蟹 <i>Xanthias sinensis</i>	2234
	团岛毛刺蟹 <i>Pilumnus tuantaoensis</i>	1944	四齿矶蟹 <i>Pugettia quadridens</i>	1270
	有齿背鳞虫 <i>Lepidonotus dentatus</i>	1514	丽小笔螺 <i>Mitrella bella</i>	1284
	乳突皮海鞘 <i>Molgula manhattensis</i>	1418	团岛毛刺蟹 <i>Pilumnus tuantaoensis</i>	1134
	丽小笔螺 <i>Mitrella bella</i>	1355		
	下齿细螯寄居蟹 <i>Clibanarius infraspinus</i>	1010		

### 2.4 附着生物的功能性状

3 个季度鱼礁附着生物群落性状类型的平均相对丰度统计结果表明,长短礁龄鱼礁附着生物群落的功能性状组成差异显著,主要体现在摄食方式、活动能力和栖息方式 3 个方面(图 3)。长礁龄礁区

(AR-CD)的捕食食性(F1)相对丰度显著高于短礁龄礁区(AR-AB),而滤食食性则显著低于短礁龄礁区( $P<0.05$ )。AR-CD 强活动能力(M3)性状的相对丰度显著高于 AR-AB,而无活动能力(M1)性状的相对丰度则显著低于 AR-AB ( $P<0.05$ )。AR-CD 埋栖(H3)

和爬行(H4)性状的相对丰度显著高于 AR-AB, 而固着(H1)性状则显著低于 AR-AB ( $P<0.05$ )。在 6 种功能性状中, 以滤食食性(F4)、无活动能力(M1)、固着型(H1)、长寿命(>5 年, L3)、无身体柔韧性(FL1)和极小个体(1~3 cm, B1)的性状类型相对丰度最高(图

3), 分别为 53%、58%、57%、43%、36%和 51%, 代表物种为大室别藻苔虫。

不同季节的长短礁龄鱼礁附着生物群落功能性状的相对丰度存在差异(图 4)。春季到秋季, 季节性功能性状类型相对丰度呈增加趋势的为肉食性

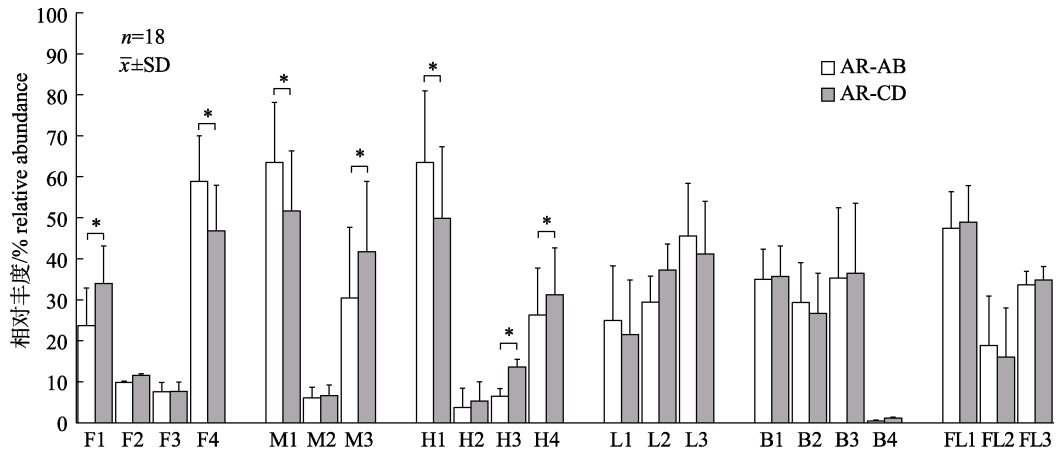


图 3 长礁龄与短礁龄鱼礁附着生物功能性状相对丰度

各字母和数字所表示的性状类型见表 1。“\*”表示长短礁龄区域之间差异显著( $P<0.05$ )。

Fig. 3 Relative abundance of different traits of attached organism on AR-AB and AR-CD

The abbreviations of trait and category are shown in Table 1. “\*” indicates the significant difference ( $P<0.05$ ) between the two areas.

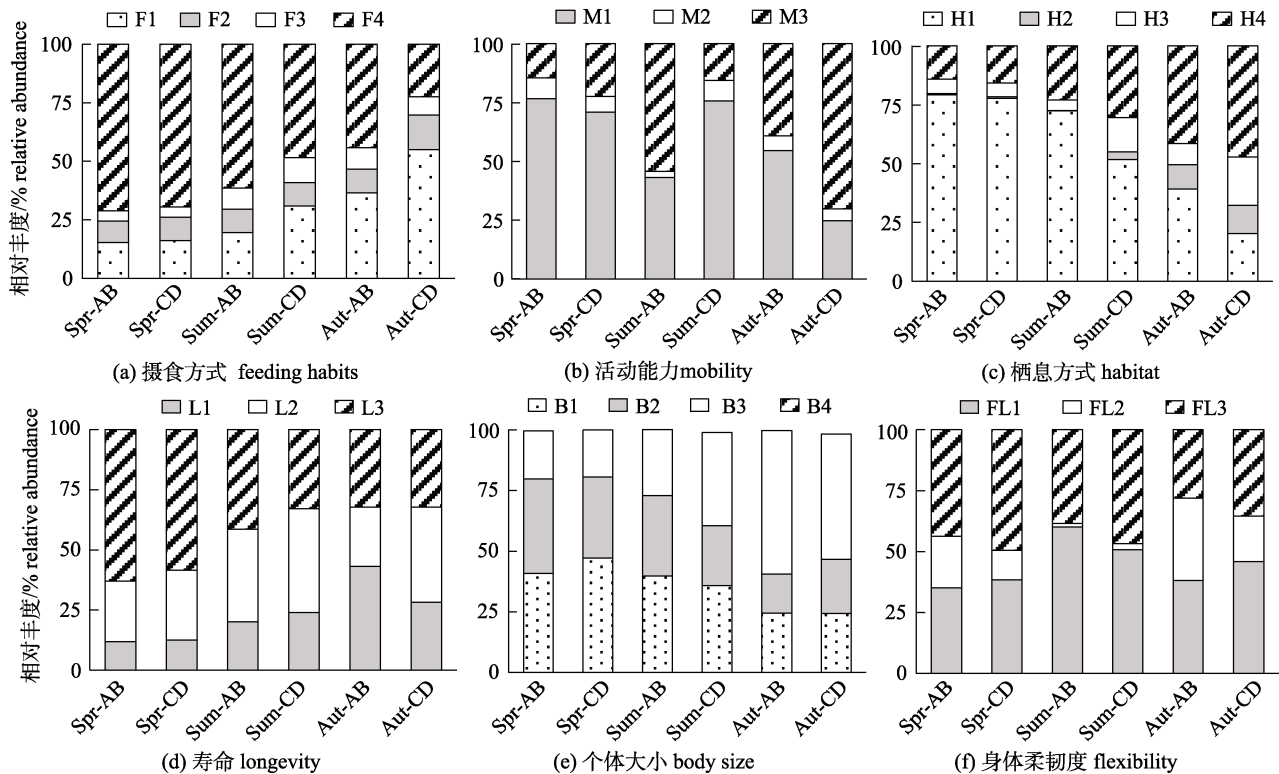


图 4 长礁龄与短礁龄鱼礁附着生物群落功能性状相对丰度的季节变化

各字母和数字所表示的性状类型见表 1, Spr、Sum、Aut 分别表示春季、夏季和秋季, AB 表示 1 龄鱼礁, CD 为 4~5 龄鱼礁。

Fig. 4 Seasonal variations in proportions of the trait of attached community on AR-AB and AR-CD

The abbreviations of trait and category are shown in Table 1. Spr, Sum and Aut represent spring, summer, and autumn, respectively. AB and CD represent 1-age reefs and 4~5-age reefs, respectively.

(F1)、强活动能力(M3)、游泳(H2)、埋栖(H3)、爬行(H4)、短寿命(L1)、中等个体(3~10 cm, B3)。季节性功能性状类型相对丰度呈减少趋势的为滤食性(F4)、无活动能力(M1)、固着型(H1)、长寿命(L3)、极小个体(<3 cm, B1)、小个体(1~3 cm, B2)。

## 2.5 功能多样性和功能冗余指数

芙蓉岛人工鱼礁附着生物群落功能多样性指数(FD)和功能冗余指数(FD/H')的变化范围分别为 13.89~17.03 和 3.87~4.23。3 个季节中,长礁龄礁区附着生物群落的功能多样性均大于短礁龄礁区(AR-CD>AR-AB),但差异不显著。各季节的功能冗余指数(FD/H')均表现为 AR-AB>AR-CD ( $P>0.05$ ),即功能冗余程度为 AR-CD>AR-CD(图 5)。

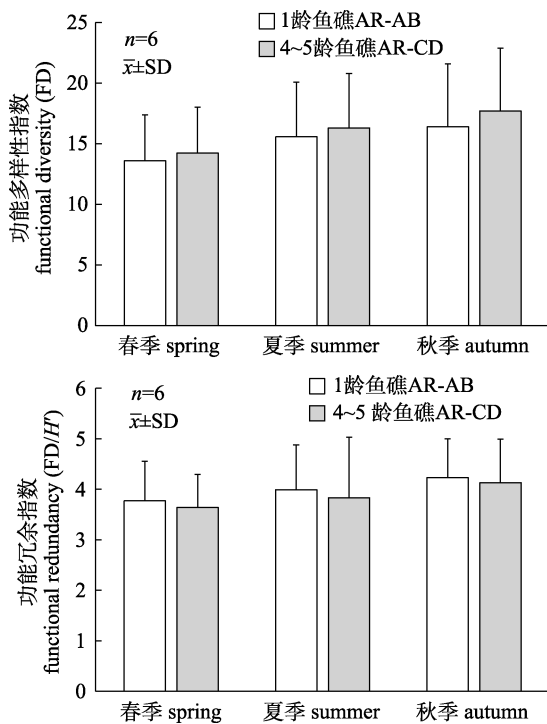


图 5 不同季节鱼礁附着生物群落的功能多样性指数和功能冗余指数

Fig. 5 FD and FD/H' of attached community on AR-AB and AR-CD in different seasons

## 3 讨论

### 3.1 投礁时间对附着生物群落结构的影响

礁体附着生物群落的种类组成、数量变化直接影响人工鱼礁的生态效应,而附着生物群落的种类组成和附着数量受投礁时间的影响<sup>[25]</sup>。天津大神堂海域不同时间序列鱼礁附着生物的研究表明,附着生物群落的多样性指数、物种均匀度指数、物种丰

度指数、生物数量、生物量随着礁龄的增加而增加<sup>[26]</sup>。本研究亦发现 4~5 礁龄人工鱼礁附着生物群落的种类数和物种多样性指数均显著高于 1 礁龄礁区( $P<0.05$ )。长礁龄鱼礁表面大多都具有一定厚度且较为坚硬的附着层,由牡蛎壳、盘管虫遗管、藪枝螭、苔藓动物和泥沙组成,这种复合附着层在投放 1 年的人工鱼礁表面并未发现。复合附着层不仅提高了鱼礁表面的空间异质性,附着层淤积的泥沙还为埋栖型的贝类(如菲律宾蛤仔)和多毛类(如双齿围沙蚕和毛须鳃虫)等提供了栖息生境,因此投放 4~5 年的长礁龄鱼礁附着生物群落具有更高的物种数、丰度和生物量。

鱼礁附着生物群落的优势物种受季节变化、投礁时间和地理位置影响<sup>[26-28]</sup>。天津大神堂海域 4 种礁龄人工鱼礁的优势种主要为长牡蛎(*C. gigas*)<sup>[21]</sup>、青岛石雀滩海域硅酸盐水泥挂板附着生物绝对优势种随季节变化明显,7 月为麦秆虫(*Caprella* sp.),而在 9 月、11 月和次年 1 月份均为褶牡蛎(*Ostrea plicatula*)<sup>[29]</sup>。大亚湾海域混凝土鱼礁全年附着生物的优势种为三角藤壶(*Balanus trigonus*)<sup>[30]</sup>。本海域不同季节和不同礁龄鱼礁附着生物群落的优势种存在差异(表 4),未出现某一物种占据绝对优势的情况,且长礁龄鱼礁优势物种的优势度均低于短礁龄鱼礁,这表明附着生物群落的稳定性随着礁龄增加而增加。夏季短礁龄礁区(AR-AB)附着生物群落的物种数和生物量最少,可能与夏季温度较高有关,还可能是由于 2019 年 8 月的台风“利奇马”过境,导致人工鱼礁附着生物有所脱落,而长礁龄礁区(AR-CD)由于投礁时间更久,鱼礁表面所形成的复合泥沙附着层,具有更高的生境异质性,不仅缓冲了风浪对附着生物的影响,也促进了更多物种前来附着或藏匿。

### 3.2 功能性状的季节变化以及对礁龄的响应

目前,人工鱼礁附着生物群落的研究主要集中在较短时间尺度上的物种分类学研究,单一的传统研究方法难以完整地反映鱼礁附着生物群落的生态过程。生物性状是影响物种适应性的内在特征<sup>[31]</sup>,并在生物多样性与生态系统功能关系的研究中扮演着关键角色,因此生物性状的功能多样性与生态系统过程密切相关,是探究生态系统和群落功能的关键所在<sup>[32]</sup>。本研究采用功能性状分析方法探究了不同季节鱼礁附着生物群落功能性状的结构以及功能



性状对 2 种不同时间序列人工鱼礁的响应。

芙蓉岛海域的人工鱼礁上更倾向于滤食性、营固着、长寿命(>5 年)、无身体柔韧性的小个体物种, 主要代表物种为大室别藻苔虫和内刺盘管虫。此外, 肉食性、爬行和中等寿命(2~5 年)的物种也相对较多, 代表种为团岛毛刺蟹、四齿矶蟹和丽小笔螺。鱼礁附着生物群落优势种的季节演替能较好地反映出功能性状季节间的变化趋势。内刺盘管虫和大室别藻苔虫在春季大量附着在鱼礁表面, 在夏季和秋季逐渐减少, 而以中华近方蟹和团岛毛刺蟹为主的节肢动物从春季到秋季不断增加, 形成优势物种, 使得滤食性(F4)、无活动能力(H1)、固着型(M1)和小个体(H1、H2)的性状丰度从春季到秋季不断减少, 爬行(H4)和游泳(H2)性状丰度呈不断增加趋势。

功能性状能响应物种对生存环境的变化, 并对生态系统功能产生影响<sup>[33]</sup>。本研究中, 2 种礁龄人工鱼礁形成的生境差异, 对附着生物群落功能性状的影响主要体现在摄食方式、活动能力和栖息方式上。1 龄鱼礁附着生物群落主要以固着型(H1)物种为主, 如内刺盘管虫、藪枝螅、藤壶、海鞘和苔藓动物等, 随着礁龄增加, 生境异质性和鱼礁饵料效应增强, 不断吸引肉食性和活动能力强的甲壳类和鱼类, 与率先附着的固着型物种形成了摄食和竞争的关系, 因此长礁龄鱼礁附着生物群落中的无活动能力(M1)和固着型(H1)性状的相对丰度显著低于短礁龄鱼礁。

### 3.3 生物的功能多样性和功能冗余指数

生境异质性能提高生物群落的物种多样性和功能多样性水平<sup>[34-36]</sup>。鱼礁附着生物群落的优势种大多为无活动能力的固着生物<sup>[26,29,37]</sup>, 而芙蓉岛海域优势种包含了固着、爬行和游泳等多种运动方式, 这不仅与海区物种组成的差异有关, 还与本海域常见附着物种藪枝螅、内刺盘管虫和大室别藻苔虫的生境构造作用以及有关<sup>[38]</sup>。在 2 种礁龄鱼礁表面均有大量的丽小笔螺附着在大室别藻苔虫表面, 中华近方蟹、四齿矶蟹、团岛毛刺蟹大量附着在双枝藪枝螅的群体内, 内刺盘管虫的石灰质栖管表面和缝隙中常有海鞘、沙蚕和纽虫栖息。2 种礁龄鱼礁均附有可构建微生境空间的物种, 因此 1 龄鱼礁附着生物群落具有与 4~5 龄鱼礁的相当的功能多样性。虽然 2 种礁龄鱼礁附着生物群落的功能多样性差异不显著, 但 3 个季度的监测均显示长礁龄鱼礁高于

短礁龄鱼礁, 礁龄的增加对生境异质性和功能多样性的提高仍发挥积极作用。有研究表明, 潮间带大型底栖动物的功能多样性随栖息地结构复杂性的增加呈先增加后降低的趋势, 在演替的中期阶段达最大值<sup>[15]</sup>。本研究中, 鱼礁附着生物群落的功能多样性将随着礁龄增加继续升高, 还是达到峰值后开始降低, 有待于今后对鱼礁附着生物群落功能多样性的长期监测。

生物群落的功能冗余反映了物种间功能生态位的重叠程度, 较低的功能冗余表明物种间功能生态位的重叠程度较低<sup>[39]</sup>。生物群落的功能冗余可以缓冲物种丧失对生态功能的影响, 起到维持群落稳定性的作用<sup>[40]</sup>。本海域鱼礁附着生物群落不同季节的功能性状组成存在差异, 但功能冗余指数在季节间差异不显著, 表明不同季节附着生物群落保持一定的稳定性, 季节间某一物种的消失和替代不会引起生态功能的改变<sup>[41]</sup>。虽然 2 种礁龄鱼礁附着生物群落的功能多样性和功能冗余指数差异不显著, 但长礁龄鱼礁附着生物群落的功能多样性和功能冗余程度均高于短礁龄鱼礁, 礁龄的增加对提高群落生态位重叠程度和抗扰动能力仍起到积极作用。

生物群落的初生演替从初期到形成稳定的群落, 往往要经历先锋期、过渡期和顶极期 3 个阶段<sup>[42]</sup>。芙蓉岛海域鱼礁在投放 1 年后, 大室别藻苔虫、内刺盘管虫等具有生境构造作用的物种率先附着, 成为附着生物群落的先锋种。4~5 龄鱼礁与 1 龄鱼礁相比, 鱼礁表面的空间异质性具有明显差异, 群落中的优势物种也有所不同, 但依然存在较多的共同优势种, 4~5 龄鱼礁附着生物群落是否已达到顶级群落阶段, 鱼礁表面生境结构是否随着礁龄的增加而继续变化, 有待于对附着生物群落展开连续的跟踪监测, 这将有利于进一步探究人工鱼礁生态机理和附着生物群落的演替机制。

### 参考文献:

- [1] Lima J S, Zalmon I R, Love M. Overview and trends of ecological and socioeconomic research on artificial reefs[J]. *Marine Environmental Research*, 2019, 145: 81-96.
- [2] Yang H S, Zhang S Y, Zhang X M, et al. Strategic thinking on the construction of modern marine ranching in China[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2019, 43(4): 1255-1262. [杨红生, 章守宇, 张秀梅, 等. 中国现代化海洋牧场建设的战略思考[J]. *水产学报*, 2019, 43(4): 1255-1262.]



- [3] Zhang S Y, Zhou X J, Wang K, et al. Review of marine livestock ecological urbanization hypothesis and marineranching construction key-technology against blue growth background[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2019, 43(1): 81-96. [章守宇, 周曦杰, 王凯, 等. 蓝色增长背景下的海洋生物生态城市化设想与海洋牧场建设关键技术研究综述[J]. *水产学报*, 2019, 43(1): 81-96.]
- [4] Falcão M, Santos M N, Drago T, et al. Effect of artificial reefs (southern Portugal) on sediment-water transport of nutrients: Importance of the hydrodynamic regime[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2009, 83(4): 451-459.
- [5] Folpp H R, Schilling H T, Clark G F, et al. Artificial reefs increase fish abundance in habitat-limited estuaries[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2020, 57(9): 1752-1761.
- [6] Zhang H, Liu P T, Tang J H, et al. Investigation on the macrobenthos of artificial reefs area in the Haizhou Gulf[J]. *Marine Fisheries*, 2008, 30(2): 97-104. [张虎, 刘培廷, 汤建华, 等. 海州湾人工鱼礁大型底栖生物调查[J]. *海洋渔业*, 2008, 30(2): 97-104.]
- [7] Dai Y Y, Hou C Q, Yang S, et al. Community structure of zooplankton in artificial reef area of Tianjin seashore and its relationship with environmental factors[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2018(5): 163-170. [戴媛媛, 侯纯强, 杨森, 等. 天津海域人工鱼礁区浮游动物群落结构及其与环境因子的相关性研究[J]. *海洋湖沼通报*, 2018(5): 163-170.]
- [8] Liu T Y. The bait effect of artificial reef I [J]. *Fisheries Science & Technology*, 2003(4):37-38. [刘同渝. 人工鱼礁的饵料效应(一)[J]. *水产科技*, 2003(4):37-38.]
- [9] Sreekanth G B, Lekshmi N M, Singh N P. Can artificial reefs really enhance the inshore fishery resources along Indian coast? A critical review[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences*, 2019, 89(1): 13-25.
- [10] Wang X M, Sheng H X, Liu S D, et al. Distribution characteristics of *Liza haematocheila* and its relationship with environmental factors in Furongdao artificial reef zones, Laizhou Bay, China[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2019, 43(9): 1914-1924. [王新萌, 盛化香, 刘淑德, 等. 莱州湾芙蓉岛人工鱼礁区鳎资源分布特征及其与环境因子的相关性分析[J]. *水产学报*, 2019, 43(9): 1914-1924.]
- [11] Chen C X, Zhang J B, Wang X M, et al. Zooplankton community structure and its relationship with environmental factors in an artificial reef near Furong Island, Laizhou Bay, Bohai Sea[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2021, 28(3): 299-313. [陈传曦, 张建柏, 王新萌, 等. 渤海莱州湾芙蓉岛人工鱼礁区浮游动物群落结构特征及其与环境因子的关系[J]. *中国水产科学*, 2021, 28(3): 299-313.]
- [12] Díaz S, Cabido M. Vive la différence: Plant functional diversity matters to ecosystem processes[J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2001, 16(11): 646-655.
- [13] Gagic V, Bartomeus I, Jonsson T, et al. Functional identity and diversity of animals predict ecosystem functioning better than species-based indices[J]. *Proceedings Biological Sciences*, 2015, 282(1801): 20142620.
- [14] van der Linden P, Patrício J, Marchini A, et al. A biological trait approach to assess the functional composition of subtidal benthic communities in an estuarine ecosystem[J]. *Ecological Indicators*, 2012, 20: 121-133.
- [15] Li Y F, Du F Y, Wang L G, et al. Effects of the sediment type on ecological functions of macrobenthos in the intertidal zones of Sanya Bay[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2018, 42(10): 1559-1571. [李亚芳, 杜飞雁, 王亮根, 等. 底质类型对三亚湾潮间带大型底栖动物生态功能的影响[J]. *水产学报*, 2018, 42(10): 1559-1571.]
- [16] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine. GB/T 12763.6-2007 Marine Investigation Criterion[S]. Beijing: Standard Press of China, 2007. [国家质量监督检验检疫局. GB/T 12763.6-2007 海洋调查规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.]
- [17] Li Z. Study on the community structure and functional diversity of fouling organisms in the coastal waters of the western Taiwan Strait[D]. Xiamen: Third Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, 2019. [李众. 台湾海峡西部近岸附着生物群落结构及功能多样性研究[D]. 厦门: 自然资源部第三海洋研究所, 2019.]
- [18] Hu C Y, Dong J Y, Gao L J, et al. Macrobenthos functional trait responses to heavy metal pollution gradients in a temperate lagoon[J]. *Environmental Pollution*, 2019, 253: 1107-1116.
- [19] Dong J Y, Zhao L L, Sun X, et al. Response of macrobenthic communities to heavy metal pollution in Laoshan Bay, China: A trait-based method[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2021, 167: 112292.
- [20] Sun X, Dong J Y, Hu C Y, et al. Use of macrofaunal assemblage indices and biological trait analysis to assess the ecological impacts of coastal bivalve aquaculture[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 127: 107713.
- [21] Chevene F, Doledec S, Chessel D. A fuzzy coding approach for the analysis of long-term ecological data[J]. *Freshwater Biology*, 1994, 31(3): 295-309.
- [22] Zhang P C, Xu Y, Li X Z, et al. Comparison in macrobenthic community composition inside and outside the cold water mass in the southern Yellow Sea in summer[J]. *Oceanologia*

- et *Limnologia Sinica*, 2017, 48(2): 312-326. [张鹏弛, 徐勇, 李新正, 等. 南黄海冷水中心内外夏季大型底栖动物群落分析[J]. 海洋与湖沼, 2017, 48(2): 312-326.]
- [23] Botta-Dukát Z. Rao's quadratic entropy as a measure of functional diversity based on multiple traits[J]. *Journal of Vegetation Science*, 2005, 16(5): 533-540.
- [24] Zhou H, Zhang Z N. Rationale of the multivariate statistical software PRIMER and its application in benthic community ecology[J]. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 2003, 33(1): 58-64. [周红, 张志南. 大型多元统计软件 PRIMER 的方法原理及其在底栖群落生态学中的应用[J]. 青岛海洋大学学报(自然科学版), 2003, 33(1): 58-64.]
- [25] Zhang W, Li C H, Jia X P, et al. A review on influential factors of fouling organisms on artificial reef[J]. *South China Fisheries Science*, 2008, 4(1): 64-68. [张伟, 李纯厚, 贾晓平, 等. 人工鱼礁附着生物影响因素研究进展[J]. 南方水产, 2008, 4(1): 64-68.]
- [26] Guo B, Chen W, Gao Y, et al. Community characteristics of attaching organisms on the artificial reefs built in different years in Dashentang, Tianjin[J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2020, 41(6): 12-18. [郭彪, 陈卫, 高燕, 等. 天津大神堂海域不同时间序列礁体附着生物群落特征变化[J]. 渔业科学进展, 2020, 41(6): 12-18.]
- [27] Huang Z R, Liang X Y, Zeng J. Preliminary study on effects of accrete organisms of artificial reef material[J]. *South China Fisheries Science*, 2006, 2(1): 34-38. [黄梓荣, 梁小芸, 曾嘉. 人工鱼礁材料生物附着效果的初步研究[J]. 南方水产, 2006, 2(1): 34-38.]
- [28] Liu G S, Li W T, Zhang X M. Assessment of the benthic macrofauna in an artificial shell reef zone in Shuangdao Bay, Yellow Sea[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2017, 114(2): 778-785.
- [29] Wang Z, Gong P H, Guan C T, et al. Effect of different artificial reefs on the community structure of organisms in Shique beach of Qingdao[J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2019, 40(4): 163-171. [王震, 公丕海, 关长涛, 等. 青岛石雀滩海域人工鱼礁材料对附着生物群落结构的影响[J]. 渔业科学进展, 2019, 40(4): 163-171.]
- [30] Zhang W, Li C H, Jia X P, et al. Seasonal variation of biofouling communities on concrete and steel reefs in Daya Bay[J]. *South China Fisheries Science*, 2015, 11(1): 9-17. [张伟, 李纯厚, 贾晓平, 等. 大亚湾混凝土鱼礁和铁质鱼礁附着生物群落结构的季节变化[J]. 南方水产科学, 2015, 11(1): 9-17.]
- [31] Murphy J F, Jones J I, Arnold A, et al. Can macroinvertebrate biological traits indicate fine-grained sediment conditions in streams?[J]. *River Research and Applications*, 2017, 33(10): 1606-1617.
- [32] Jiang W X, Chen J, Wang H M, et al. Study of macroinvertebrate functional traits and diversity among typical habitats in the New Xue River[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(6): 2007-2016. [蒋万祥, 陈静, 王红妹, 等. 新薛河典型生境底栖动物功能性状及其多样性[J]. 生态学报, 2018, 38(6): 2007-2016.]
- [33] Jia P, Du G Z. Measuring functional and phylogenetic diversity in community ecology[J]. *Chinese Bulletin of Life Sciences*, 2014, 26(2): 153-157. [贾鹏, 杜国祯. 生态学的多样性指数: 功能与系统发育[J]. 生命科学, 2014, 26(2): 153-157.]
- [34] Li Y, Hong J Z, Li H Q. Fouling communities on neighboring artificial and natural reefs in Zhu Island, Pearl River Estuary[J]. *South China Fisheries Science*, 2013, 9(2): 20-26. [李勇, 洪洁漳, 李辉权. 珠江口竹洲人工鱼礁与相邻天然礁附着生物群落结构研究[J]. 南方水产科学, 2013, 9(2): 20-26.]
- [35] Wong M C, Dowd M. Patterns in taxonomic and functional diversity of macrobenthic invertebrates across seagrass habitats: A case study in Atlantic Canada[J]. *Estuaries and Coasts*, 2015, 38(6): 2323-2336.
- [36] Dolbeth M, Cardoso P, Grilo T, et al. Drivers of estuarine benthic species distribution patterns following a restoration of a seagrass bed: A functional trait analyses[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2013, 72(1): 47-54.
- [37] Li Z Z, Gong P H, Guan C T, et al. Study on the organisms attachment of artificial reefs constructed with five different cements[J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2017, 38(5): 57-63. [李真真, 公丕海, 关长涛, 等. 不同水泥类型混凝土人工鱼礁的生物附着效果[J]. 渔业科学进展, 2017, 38(5): 57-63.]
- [38] Zhan Q P, Dong J Y, Sun X, et al. A comparative study on the bio-attachment effect of reefs constructed with different materials near furong island, Laizhou Bay[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2021, 51(9): 124-134. [詹启鹏, 董建宇, 孙昕, 等. 莱州湾芙蓉岛海域不同材质鱼礁生物附着效果的比较研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2021, 51(9): 124-134.]
- [39] Li Y F, Du F Y, Wang L G, et al. A biological trait approach to assess ecological functions of macrobenthos at different stand age of rehabilitated *Sonneratia apetala* mangrove[J]. *South China Fisheries Science*, 2018, 14(3): 10-18. [李亚芳, 杜飞雁, 王亮根, 等. 基于生物性状分析方法的不同恢复阶段无瓣海桑人工林湿地大型底栖动物生态功能研究[J]. 南方水产科学, 2018, 14(3): 10-18.]
- [40] Mouillot D, Graham N A J, Villéger S, et al. A functional

approach reveals community responses to disturbances[J]. Trends in Ecology & Evolution, 2013, 28(3): 167-177. [LinkOut]

[41] Petchey O L, Gaston K J. Functional diversity: Back to basics and looking forward[J]. Ecology Letters, 2006, 9(6): 741-758.

[42] Li C Y. Bryozoa in the fouling organisms in water from Xisha Islands to the southern Hainan Island[J]. Marine Science Bulletin, 1983, 2(6): 62-68. [李传燕. 西沙至海南岛南部水域污损生物中的苔藓虫[J]. 海洋通报, 1983, 2(6): 62-68.]

附录 1 附着生物性状类型的赋值  
Appx. 1 Assignment of trait categories of attached organisms

物种 species	体长 body size				摄氏习性 feeding mode				活动能力 mobility			栖息方式 habitat				寿命 longevity			身体柔韧度 flexibility		
	BS1	BS2	BS3	BS4	FM1	FM2	FM3	FM4	M1	M2	M3	H1	H2	H3	H4	L1	L2	L3	FL3	FL2	FL1
	艾氏活额寄居蟹 <i>Diogenes edwardsii</i>	0	0	3	0	3	0	2	2	0	0	3	0	0	0	3	0	0	3	3	0
下齿细螯寄居蟹 <i>Clibanarius infraspinus</i>	0	0	3	0	3	0	2	2	0	0	3	0	0	0	3	0	0	3	3	0	0
枯瘦突眼蟹 <i>Oregonia gracilis</i>	0	0	3	0	3	0	0	0	0	0	3	0	0	0	3	0	0	0	3	0	0
肉球近方蟹 <i>Hemigrapsus sanguineus</i>	0	0	3	0	3	2	0	0	0	0	3	0	0	0	3	0	3	0	3	0	0
中华近方蟹 <i>Hemigrapsus sinensis</i>	0	0	3	0	3	2	0	0	0	0	3	0	0	0	3	0	3	0	3	0	0
绒螯近方蟹 <i>Hemigrapsus penicillatus</i>	0	0	3	0	3	2	0	0	0	0	3	0	0	0	3	0	3	0	3	0	0
三疣梭子蟹 <i>Portunus trituberculatus</i>	0	0	0	3	3	0	0	0	0	0	3	0	2	1	2	0	0	3	3	0	0
鲜明鼓虾 <i>Alpheus heterocarpus</i>	0	3	0	0	3	0	0	0	0	0	3	0	2	1	2	0	3	0	0	3	0
纹藤壶 <i>Balanus amphitrite</i>	0	3	0	0	0	0	0	3	3	0	0	3	0	0	0	0	3	0	3	0	0
网纹藤壶 <i>Balanus reticulatus</i>	0	3	0	0	0	0	0	3	3	0	0	3	0	0	0	0	3	0	3	0	0
团岛毛刺蟹 <i>Pilumnus tuantaensis</i>	0	3	0	0	2	2	0	0	3	0	0	0	0	0	3	0	3	0	3	0	0
马氏毛粒蟹 <i>Pilumnopus makiana</i>	0	3	0	0	2	2	0	0	0	0	3	0	0	0	3	0	3	0	3	0	0
日本拟钩虾 <i>Gammaropsis japonica</i>	3	0	0	0	0	2	3	0	0	3	0	0	3	0	0	3	0	0	0	3	0
螺赢蜚 <i>Corophium</i> sp.	3	0	0	0	0	2	3	0	0	3	0	0	3	2	1	3	0	0	0	0	3
沈氏拟绵蟹 <i>Paradromia sheni</i>	0	3	0	0	3	0	0	0	0	0	3	0	0	0	3	0	0	0	3	0	0
四齿矶蟹 <i>Pugettia quadridens</i>	0	3	0	0	0	2	3	0	0	0	3	0	0	0	3	0	3	0	3	0	0
高脊藤壶 <i>Balanus cristatus</i>	0	3	0	0	0	0	0	3	3	0	0	3	0	0	0	0	3	0	3	0	0
日本蛄 <i>Charybdis japonica</i>	0	0	3	0	3	0	0	0	0	0	3	0	2	0	3	0	0	3	3	0	0
直额七腕虾 <i>Heptacarpus rectirostris</i>	0	3	0	0	3	0	0	0	0	0	3	0	1	0	2	0	3	0	0	3	0
长足七腕虾 <i>Heptacarpus futilirostris</i>	0	3	0	0	3	0	0	0	0	0	3	0	1	0	2	0	3	0	0	3	0
巨指长臂虾 <i>Palaemon macrodactylus</i>	0	3	0	0	3	0	1	0	0	0	3	0	3	0	2	0	3	0	0	3	0
扁足剪额蟹 <i>Scyra compressipes</i>	0	3	0	0	3	0	0	0	0	0	3	0	0	0	3	0	0	0	3	0	0
细螯虾 <i>Leptochela gracilis</i>	0	3	0	0	3	0	1	0	0	0	3	0	3	0	0	3	0	0	0	3	0
鹰爪虾 <i>Trachypenaeus curvirostris</i>	0	0	3	0	3	1	0	0	0	0	3	0	3	0	0	0	0	0	3	0	0
多棘麦秆虫 <i>Caprella acanthogaster</i>	0	3	0	0	0	2	3	0	0	0	3	0	2	0	2	3	0	0	0	3	0
角突麦秆虫 <i>Caprella scaura</i>	0	3	0	0	0	2	3	0	0	0	3	0	2	0	2	3	0	0	0	3	0
长鳃麦秆虫 <i>Caprella equilibra</i>	0	3	0	0	0	2	3	0	0	0	3	0	2	0	2	3	0	0	0	3	0
红条鞭腕虾 <i>Lysmata vittata</i>	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	3	3	0	0	0	3	0
特异大权蟹 <i>Macromedaeus distinguendus</i>	0	0	0	3	3	0	0	0	0	0	3	0	0	0	3	0	3	0	3	0	0
中华原钩虾 <i>Eogammarus sinensis</i>	3	0	0	0	0	2	2	0	0	0	3	0	0	3	3	3	0	0	0	3	0
疣背深额虾 <i>Latreutes planirostris</i>	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	3	3	0	0	0	3	0
刺螯鼓虾 <i>Alpheus hoplocheles</i>	0	3	0	0	3	0	0	0	0	0	3	0	2	1	2	0	3	0	0	3	0
美丽瓷蟹 <i>Porcellana pulchra</i>	0	3	0	0	3	0	0	0	0	0	3	0	0	0	3	0	0	0	3	0	0

(待续 to be continued)

(续附录 1 Appx. 1 continued)

物种 species	体长 body size				摄氏习性 feeding mode				活动能力 mobility			栖息方式 habitat				寿命 longevity			身体柔韧度 flexibility		
	BS1	BS2	BS3	BS4	FM1	FM2	FM3	FM4	M1	M2	M3	H1	H2	H3	H4	L1	L2	L3	FL3	FL2	FL1
	大室膜孔苔虫 <i>Membranipora grandicella</i>	3	0	0	0	0	0	0	3	3	0	0	3	0	0	0	0	0	3	3	0
齿草苔虫 <i>Bugula neritina</i>	0	3	0	0	0	0	0	3	3	0	0	3	0	0	0	0	0	3	0	0	3
相似膜孔苔虫 <i>Membranipora similis</i>	3	0	0	0	0	0	0	3	3	0	0	3	0	0	0	0	0	3	0	0	3
颈链血苔虫 <i>Watersipora subtorquata</i>	3	0	0	0	0	0	0	3	3	0	0	3	0	0	0	0	0	3	0	0	3
葡茎草苔虫 <i>Bugula stolonifera</i>	3	0	0	0	0	0	0	3	3	0	0	3	0	0	0	0	0	3	0	0	3
乳突皮海鞘 <i>Molgula manhattensis</i>	1	2	0	0	0	0	0	3	3	0	0	3	0	0	0	0	0	3	0	3	0
星座褶胃海鞘 <i>Amaroucium constellatum</i>	1	0	0	0	0	0	0	3	3	0	0	3	0	0	0	0	0	3	0	3	0
真海鞘 <i>Halocybthia roretzi</i>	1	2	0	0	0	0	0	3	3	0	0	3	0	0	0	0	0	3	0	3	0
矛尾虾虎鱼 <i>Chaeturichthys stigmatias</i>	0	0	1	3	3	0	0	0	0	0	3	0	3	2	0	3	0	0	0	3	0
柄瘤海鞘 <i>Styela clava</i>	3	0	0	0	0	0	0	3	3	0	0	3	0	0	0	0	0	3	0	3	0
纹缟虾虎鱼 <i>Tridentiger trignocephalus</i>	0	0	3	0	3	0	0	0	0	0	3	0	3	0	0	3	0	0	0	3	0
西门登拟菊海鞘 <i>Botrylloides simodensis</i>	1	0	0	0	1	1	0	3	3	0	0	3	0	0	0	0	0	3	0	3	0
双枝蕨枝螅 <i>Obelia dichotoma</i>	0	0	3	0	0	0	1	3	3	0	0	3	0	0	0	3	0	0	0	0	3
平坦蕨枝螅 <i>Obelia plana</i>	0	0	3	0	0	0	1	3	3	0	0	3	0	0	0	3	0	0	0	0	3
沙箸 <i>Virgularia</i> sp.	0	0	3	0	0	0	0	3	3	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	3	0
革囊星虫 <i>Phascolion</i> sp.	0	3	0	0	0	1	1	2	3	0	0	3	0	0	0	3	0	0	0	3	0
安岛反体星虫 <i>Antillesoma antillarum</i>	0	3	0	0	0	1	1	2	3	0	0	3	0	0	0	3	0	0	0	3	0
江户明樱蛤 <i>Moerella jadoensis</i>	0	3	0	0	0	0	2	3	0	3	0	0	0	3	0	0	0	3	3	0	0
东方缝栖蛤 <i>Hiatella orientalis</i>	0	3	0	0	0	0	3	0	3	0	0	3	0	0	0	0	0	3	3	0	0
单齿螺 <i>Monodonta labio</i>	0	0	3	0	0	3	0	0	0	0	3	0	0	0	3	0	0	3	3	0	
脉红螺 <i>Rapana venosa</i>	0	0	3	0	3	0	0	0	0	0	3	0	0	0	3	0	0	3	3	0	
黑荞麦蛤 <i>Xenostrobus atrata</i>	0	3	0	0	3	0	0	0	0	3	0	3	0	0	0	3	0	3	0	3	0
丽小笔螺 <i>Mitrella bella</i>	3	0	0	0	3	0	0	0	0	0	3	0	0	0	3	0	3	0	3	0	
布尔小笔螺 <i>Mitrella burchardi</i>	3	0	0	0	3	0	0	0	0	0	3	0	0	0	3	0	3	0	3	0	
朝鲜鳞带石鳖 <i>Lepidozona coreanica</i>	3	0	0	0	3	0	0	0	0	3	0	3	0	0	1	0	0	3	3	0	
灰双齿蛤 <i>Felaniella usta</i>	0	3	0	0	0	0	0	3	0	3	0	0	0	3	0	0	3	0	3	0	0
菲律宾蛤仔 <i>Ruditapes philippinarum</i>	0	0	3	0	0	0	0	3	0	3	0	0	0	3	0	0	0	3	3	0	0
锈凹螺 <i>Chlorostoma rustica</i>	0	0	3	0	0	3	0	0	0	0	3	0	0	0	3	0	0	3	3	0	
彩虹明樱蛤 <i>Moerella iridescens</i>	0	3	0	0	0	0	2	3	0	3	0	0	0	3	0	0	0	3	3	0	0
薄片镜蛤 <i>Dosinia corrugata</i>	0	0	3	0	0	0	0	3	0	3	0	0	0	3	0	0	0	3	3	0	0
砂海螂 <i>Mya arenaria</i>	0	0	3	0	0	0	0	3	0	3	0	0	0	3	0	0	3	0	3	0	0
秀丽织纹螺 <i>Nassarius festivus</i>	0	3	0	0	2	0	3	0	0	0	3	0	0	0	3	0	0	3	3	0	
纵肋织纹螺 <i>Nassarius variciferus</i>	0	3	0	0	2	0	3	0	0	0	3	0	0	0	3	0	0	3	3	0	
太平洋牡蛎 <i>Crassostrea gigas</i>	0	0	0	3	0	0	0	3	3	0	0	3	0	0	0	0	0	3	3	0	
近江牡蛎 <i>Crassostrea ariakensis</i>	0	0	3	0	0	0	0	3	3	0	0	3	0	0	0	0	0	3	3	0	
薄壳绿螂 <i>Glauconome primeana</i>	0	3	0	0	0	0	0	3	0	3	0	0	0	3	0	0	0	0	3	0	0
毛蚶 <i>Anadara kagshimensis</i>	0	3	0	0	0	0	0	3	2	1	0	2	0	1	0	0	3	0	3	0	
短文蛤 <i>Meretrix petechialis</i>	0	3	0	0	0	0	0	3	0	3	0	0	0	3	0	0	0	3	3	0	0
有齿背鳞虫 <i>Lepidonotus dentatus</i>	0	0	3	0	3	0	0	0	0	0	3	0	0	2	3	3	0	0	0	3	
华美盘管虫 <i>Hydroides elegans</i>	0	3	0	0	0	1	0	2	3	1	0	3	0	0	0	0	3	0	3	0	
内刺盘管虫 <i>Hydroides ezoensis</i>	0	3	0	0	0	1	0	2	3	1	0	3	0	0	0	0	3	0	3	0	
环唇沙蚕 <i>Cheilonereis cyclurus</i>	0	0	3	0	3	0	2	0	0	0	3	0	1	3	0	0	0	0	0	3	

(待续 to be continued)

(续附录 1 Appx. 1 continued)

物种 species	体长 body size				摄食习性 feeding mode				活动能力 mobility			栖息方式 habitat				寿命 longevity			身体柔韧度 flexibility		
	BS1	BS2	BS3	BS4	FM1	FM2	FM3	FM4	M1	M2	M3	H1	H2	H3	H4	L1	L2	L3	FL3	FL2	FL1
岩虫 <i>Marphysa sanguinea</i>	0	0	0	3	3	0	0	0	0	0	3	0	0	3	0	0	3	0	0	0	3
覆瓦哈鳞虫 <i>Harmothoe imbricata</i>	0	0	3	0	3	0	0	0	0	0	3	0	0	2	3	0	3	0	0	0	3
巧言虫 <i>Eulalia viridis</i>	0	0	3	0	3	0	0	0	0	0	3	0	3	2	0	0	0	3	0	0	3
覆瓦背叶虫 <i>Notophyllum imbricatum</i>	0	3	0	0	3	0	0	0	0	0	3	0	3	2	0	0	0	3	0	0	3
双齿围沙蚕 <i>Perinereis aibuhitensis</i>	0	0	3	0	3	0	1	0	0	0	3	0	3	0	2	0	3	0	0	0	3
毛须鳃虫 <i>Cirriformia</i> sp.	0	0	3	0	0	0	3	0	0	0	3	0	0	3	0	0	3	0	0	0	3
张氏神须虫 <i>Mysta tchangsii</i>	0	0	0	3	3	0	0	0	0	0	3	0	2	2	1	0	0	3	0	0	3
侧口乳蛭虫 <i>Thelepus plagiostoma</i>	0	3	0	0	3	0	0	3	0	0	3	0	0	3	0	0	3	0	0	0	3
索沙蚕 <i>Lumbrineris latreilli</i>	0	0	0	3	3	0	2	0	0	0	3	0	0	3	0	0	3	0	0	0	3
中华半突虫 <i>Anaitides chinensis</i>	0	0	3	0	3	0	0	0	0	0	3	0	2	0	2	0	0	3	0	0	3
围巧言虫 <i>Eumida sanguinea</i>	0	0	3	0	3	0	0	0	0	0	3	0	2	0	2	0	0	3	0	0	3
刚鳃虫 <i>Chaetozone setosa</i>	0	3	0	0	0	0	3	0	0	0	3	0	0	3	0	0	3	0	0	0	3
太平洋树蛭虫 <i>Pista pacifica</i>	0	0	3	0	0	0	3	0	0	0	3	0	0	3	0	0	3	0	0	0	3
丝线沙蚕 <i>Drilonereis filum</i>	0	0	0	3	3	0	2	0	0	0	3	0	0	3	0	0	3	0	0	0	3
维氏小尾纽虫 <i>Micrura verrilli</i>	0	0	3	0	3	0	0	0	0	0	3	0	1	2	0	3	0	0	0	0	3
血色喙纽虫 <i>Ramphogordius sanguineus</i>	0	0	3	0	3	0	0	0	0	0	3	0	1	2	0	3	0	0	0	0	3
细圆曲纽虫 <i>Emplectonema gracile</i>	0	0	3	0	3	0	0	0	0	0	3	0	1	2	0	3	0	0	0	0	3
仿刺参 <i>Stichopus japonicus</i>	0	0	0	3	0	0	3	0	0	3	0	0	0	0	3	0	0	3	0	0	3
纵条肌海葵 <i>Haliplanelle luciae</i>	0	3	0	0	3	0	1	0	0	3	0	3	0	0	0	3	0	0	0	0	3

附录 2 莱州湾芙蓉岛海域人工鱼礁附着生物群落种类组成

Appx. 2 Species composition of attached community on artificial reef in Furong Island, Laizhou Bay

门类 phylum	物种 species	学名 scientific name	1 龄鱼礁		4-5 龄鱼礁	
			1-year reef AR-AB	4-5-year reef AR-CD	4-5-year reef AR-CD	4-5-year reef AR-CD
节肢动物门 Arthropoda	艾氏活额寄居蟹	<i>Diogenes edwardsii</i>	+			+
	下齿细螯寄居蟹	<i>Clibanarius infraspinus</i>	+			+
	枯瘦突眼蟹	<i>Oregonia gracilis</i>	+			-
	肉球近方蟹	<i>Hemigrapsus sanguineus</i>	+			+
	中华近方蟹	<i>Hemigrapsus sinensis</i>	+			+
	绒螯近方蟹	<i>Hemigrapsus penicillatus</i>	+			+
	三疣梭子蟹	<i>Portunus trituberculatus</i>	+			-
	鲜明鼓虾	<i>Alpheus heterocarpus</i>	+			-
	纹藤壶	<i>Balanus amphitrite</i>	+			+
	网纹藤壶	<i>Balanus reticulatus</i>	+			-
	团岛毛刺蟹	<i>Pilumnus tuantaoensis</i>	+			+
	马氏毛粒蟹	<i>Pilumnopeus makiana</i>	-			+
	日本拟钩虾	<i>Gammaropsis japonica</i>	-			+
	螺赢蜚	<i>Corophium</i> sp.	-			+
	沈氏拟绵蟹	<i>Paradromia sheni</i>	-			+
	四齿矶蟹	<i>Pugettia quadridens</i>	+			-
	高脊藤壶	<i>Balanus cristatus</i>	+			-
	日本蝎	<i>Charybdis japonica</i>	+			-

(待续 to be continued)

(续附录 2 Appx. 2 continued)

门类 phylum	物种 species	学名 scientific name	1 龄鱼礁 1-year reef AR-AB	4-5 龄鱼礁 4-5-year reef AR-CD
	直额七腕虾	<i>Heptacarpus rectirostris</i>	-	+
	长足七腕虾	<i>Heptacarpus futirostris</i>	+	+
	巨指长臂虾	<i>Palaemon macrodactylus</i>	-	+
	扁足剪额蟹	<i>Scyra compressipes</i>	-	+
	细螯虾	<i>Leptochela gracilis</i>	-	+
	鹰爪虾	<i>Trachypenaeus curvirostris</i>	+	+
	多棘麦杆虫	<i>Caprella acanthogaster</i>	+	-
	角突麦杆虫	<i>Caprella scaura</i>	-	+
	长鳃麦杆虫	<i>Caprella equilibra</i>	+	+
	红条鞭腕虾	<i>Lysmata vittata</i>	-	+
	特异大权蟹	<i>Macromedaeus distinguendus</i>	+	-
	中华原钩虾	<i>Eogammarus sinensis</i>	-	+
	疣背深额虾	<i>Latreutes planirostris</i>	+	+
	刺螯鼓虾	<i>Alpheus hoplocheles</i>	+	-
	美丽瓷蟹	<i>Porcellana pulchra</i>	+	-
苔藓动物门 Bryozoa				
	大室别藻苔虫	<i>Membranipora grandicella</i>	+	+
	齿草苔虫	<i>Bugula neritina</i>	+	+
	相似膜孔苔虫	<i>Membranipora similis</i>	+	+
	颈链血苔虫	<i>Watersipora subtorquata</i>	-	+
	葡茎草苔虫	<i>Bugula stolonifera</i>	+	+
脊索动物门 Chordata				
	乳突皮海鞘	<i>Molgula manhattensis</i>	+	+
	星座褶胃海鞘	<i>Amaroucium constellatum</i>	+	+
	真海鞘	<i>Halocynthia roretzi</i>	+	-
	矛尾虾虎鱼	<i>Chaeturichthys stigmatias</i>	+	+
	柄瘤海鞘	<i>Styela clava</i>	+	+
	纹缟虾虎鱼	<i>Tridentiger trigenocephalus</i>	+	-
	西门登拟菊海鞘	<i>Botrylloides simodensis</i>	+	+
刺胞动物门 Cnidaria				
	双枝蕺枝螵	<i>Obelia dichotoma</i>		
	平坦蕺枝螵	<i>Obelia plana</i>	+	+
	沙箸	<i>Virgularia</i> sp.	+	+
	纵条矾海葵	<i>Haliplanella luciae</i>	+	+
星虫动物门 Sipuncula				
	革囊星虫	<i>Phascolion</i> sp.	+	+
	安岛反体星虫	<i>Antillesoma antillarum</i>	-	+
软体动物门 Mollusca				
	江户明樱蛤	<i>Moerella jadoensis</i>	+	+
	东方缝栖蛤	<i>Hiatella orientalis</i>	+	+
	单齿螺	<i>Monodonta labio</i>	+	+
	脉红螺	<i>Rapana venosa</i>	+	+
	黑芥麦蛤	<i>Xenostrobus atrata</i>	+	+

(待续 to be continued)

(续附录 2 Appx. 2 continued)

门类 phylum	物种 species	学名 scientific name	1 龄鱼礁 1-year reef AR-AB	4-5 龄鱼礁 4-5-year reef AR-CD
	丽小笔螺	<i>Mitrella bella</i>	+	+
	布尔小笔螺	<i>Mitrella burchardi</i>	+	+
	朝鲜鳞带石鳖	<i>Lepidozona coreanica</i>	+	+
	灰双齿蛤	<i>Felaniella usta</i>	+	+
	菲律宾蛤仔	<i>Ruditapes philippinarum</i>	+	+
	锈凹螺	<i>Chlorostoma rustica</i>	+	+
	彩虹明樱蛤	<i>Moerella iridescens</i>	-	+
	薄片镜蛤	<i>Dosinia corrugata</i>	-	+
	砂海螂	<i>Mya arenaria</i>	-	+
	秀丽织纹螺	<i>Nassarius festivus</i>	+	-
	纵肋织纹螺	<i>Nassarius variciferus</i>	+	-
	太平洋牡蛎	<i>Crassostrea gigas</i>	-	+
	近江牡蛎	<i>Crassostrea ariakensis</i>	-	+
	薄壳绿螂	<i>Glaucanome primeana</i>	-	+
	毛蚶	<i>Anadara kagshimensis</i>	-	+
	短文蛤	<i>Meretrix petechialis</i>	-	+
环节动物门 Annelida				
	有齿背鳞虫	<i>Lepidonotus dentatus</i>	+	+
	华美盘管虫	<i>Hydroides elegans</i>	+	+
	内刺盘管虫	<i>Hydroides ezoensis</i>	+	+
	环唇沙蚕	<i>Cheilonereis cyclurus</i>	+	-
	岩虫	<i>Marphysa sanguinea</i>	+	+
	覆瓦哈鳞虫	<i>Harmothoë imbricata</i>	+	+
	巧言虫	<i>Eulalia viridis</i>	+	+
	覆瓦背叶虫	<i>Notophyllum imbricatum</i>	+	+
	双齿围沙蚕	<i>Perinereis aibuhitensis</i>	+	+
	毛须鳃虫	<i>Cirriformia sp.</i>	+	+
	张氏神须虫	<i>Mysta tchangsi</i>	-	+
	侧口乳蛭虫	<i>Thelepus plagiostoma</i>	+	+
	索沙蚕	<i>Lumbrineris latreilli</i>	+	+
	中华半突虫	<i>Anaitides chinensis</i>	-	+
	围巧言虫	<i>Eumida sanguinea</i>	+	+
	刚鳃虫	<i>Chaetozone setosa</i>	-	+
	太平洋树蛭虫	<i>Pista pacifica</i>	-	+
	丝线沙蚕	<i>Drilonereis filum</i>	-	+
纽形动物门 Nemertea				
	维氏小尾纽虫	<i>Micrura verrilli</i>	+	+
	血色喙纽虫	<i>Ramphogordius sanguineus</i>	-	+
	细圆曲纽虫	<i>Emplectonema gracile</i>	+	+
棘皮动物门 Echinodermata				
	仿刺参	<i>Stichopus japonicus</i>	+	+

注：“+”表示该物种出现，“-”表示该物种未出现。

Note: “+” means that the species appears, “-” means that the species does not appear.



## Community structure and functional traits of attached organisms on an artificial reef near Furong Island, Laizhou Bay

ZHAN Qipeng<sup>1</sup>, SUN Xin<sup>1</sup>, DONG Jianyu<sup>1</sup>, ZHANG Yuyang<sup>1</sup>, ZHANG Xiumei<sup>2,3</sup>

1. Key Laboratory of Mariculture, Ministry of Education; Ocean University of China, Qingdao 266003, China;

2. School of Fishery, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China;

3. Laboratory for Marine Fisheries Science and Food Production Processes, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266072, China.

**Abstract:** Artificial reefs are a key tool for the restoration of ecological habitat in marine ranches. The construction of artificial reefs has many ecological effects, such as flow field, shelter, and bait effects. The attached community on artificial reefs are an important factor for the formation of bait effect. To explore the effects of reef age on community structure and functional traits of attached organisms, quadrat sampling was conducted on an artificial reef at Furong Island in Laizhou Bay in the spring, summer, and autumn of 2019. A total of 94 species of attached organisms were collected. Arthropoda had the largest number of species (33), followed by Mollusca, which included 21 species. There were 66 species on short-age (1 a) artificial reef (AR-AB), and 79 species on long-age (4–5 a) artificial reef (AR-CD). There were differences in the species composition and dominant species of attached community for different seasons and reef ages. AR-CD were significantly higher than AR-AB in Margalef species richness, Shannon-Wiener diversity, and Pielou evenness indices. Six functional traits (including feeding habits, mobility, habitat, body size, longevity, and flexibility) were selected to compare the relative abundance of functional traits in different seasons and reef ages. The results showed that the artificial reefs in this area are more likely to be attached by those species with filter-feeder, inactivity, sessile, long-lived (> 5 a), and extremely small (<1 cm) characteristics, but no body flexibility (*Membranipora grandicella*, for example). The differences in functional traits between AR-AB and AR-CD were reflected in feeding habits, mobility, and habitat. The relative abundance of predator, high mobility, burrower, and crawler characteristics in AR-CD were significantly higher than in AR-AB ( $P < 0.05$ ). However, the relative abundance of filter-feeder, sessile, and inactivity characteristics in AR-CD were significantly lower than in AR-AB ( $P < 0.05$ ). The functional diversity index and functional redundancy of the attached community of AR-CD were higher than that of AR-AB, though the differences were non-significant. In this study, traditional biodiversity indices and biological traits were used to analyze the differences in community structure and functional traits of attached organisms between short- and long-aged reefs in different seasons, providing a new perspective on the ecological effects of artificial reefs.

**Key words:** attached community; artificial reef; reef age; functional trait; functional diversity; marine ranching

**Corresponding author:** ZHANG Xiumei. E-mail: xiumei1227@163.com