

# 三横山鱼礁生境鱼类和大型无脊椎动物群落特征

汪振华, 章守宇\*, 王凯

(上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306)

**摘要:**为了解三横山人工鱼礁建设的生态效果,2009年1—8月对鱼礁、泥地、岩礁3种生境中的鱼类和大型无脊椎动物组成及环境状况进行了调查,采用丰富度、多样性和均匀度指数及聚类分析等多元统计分析方法对各生境的相关生物群落进行了多方面的比较研究。结果表明:鱼礁区除保留原有泥地生境中的优势种外,还增加了褐菖鲉等岩礁优势种类。鱼礁生境的种类丰富度显著高于泥地和岩礁生境( $P < 0.05$ ),多样性也明显高于泥地生境( $P < 0.05$ ),但和岩礁生境间并无显著差异( $P > 0.05$ )。鱼礁和岩礁生境相关群落基本处在同一功能块,且显著区别于泥地群落,但三者之间的种类组成相似性均未达到中等相似水平,仍分属3种不同的群落。温度对鱼礁生境生物群落的相关性最高(0.472),而泥地为叶绿素a(0.459),岩礁为温盐组合因子(0.684),不同生境的生物群落对相同环境因子的响应机制并不同。由此可见,人工鱼礁生境综合了自然和人工环境的特点,其特有的群聚模式对自然群落结构有着互补和强化作用,对保护岩礁资源和岛礁生物多样性起着积极而特殊的作用。

**关键词:**三横山; 鱼礁; 岩礁; 泥地; 鱼类和大型无脊椎动物; 群落结构

## Fish and macroinvertebrates community structure in artificial habitat around Sanheng Isle, Shengsi, China

WANG Zhenhua, ZHANG Shouyu\*, WANG Kai

College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China

**Abstract:** Fish and macroinvertebrates (FM) were sampled using multi-mesh trammel nets from three different habitats including artificial reef (AR), soft-bottom (SB) and rocky reef (RR) habitats in Sanheng waters during January to August of 2009, in order to study ecological effects of artificial reef habitat on the FM community structure. We compared species composition, dominant species, species diversity and relationship between FM community and environmental variables among the three habitats using multivariate statistics methods and various indices such as species richness, species diversity, IRI, and species evenness indices. A total of 90 species were identified, of which 66 species of fish and macroinvertebrates were collected in the Sanheng AR habitat, which is over 2 times as many as those collected in the SB habitat (32 species) and 6 more species found than the RR habitats (60 species). Species released from stocking programs such as *Larimichthys crocea* and *Sepiella maindroni* have only been caught in the AR habitat, indicating that the AR habitat is suitable for released migrating species. As to dominant species, not only SB habitat species like *Cynoglossus abbreviates* and *Platycephalus indicus*, but also RR species such as *Sebastiscus marmoratus* and *Hexagrammos otakii*, have been found in the AR habitat, suggesting that it is effective in attracting more dominant species from natural habitats. Species richness found in the AR habitat was significantly higher than that found in the other two natural habitats ( $P < 0.05$ ) and species diversity of the AR habitat was significantly higher than that for the SB habitat ( $P < 0.05$ ). However, no significant difference was found between the AR habitat and RR habitat in species diversity ( $P > 0.05$ ). Cluster and MDS analyses indicate that 3 groups of FM assemblages can be divided from the three habitats from January to August, including natural coastal community in January dominated by *Lophionus setigerus*, rocky community in the AR and RR habitats from February

**基金项目:**国家高技术研究发展计划863课题资助项目(2006AA100303);国家科技支撑计划资助项目(2007BAD43B03);国家自然科学基金资助项目(30471332, 30871924)

**收稿日期:**2009-11-23; **修订日期:**2010-01-20

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: syzhang@shou.edu.cn

to June, and summer community in all the three habitats dominated by anchovies. Although there was no difference in diversity level and cluster analysis result between the AR and RR habitats, both of them were different from the SB community structure. They were two quite different habitats with different FM community structures according to their low Jaccard similarity values (under 0.4) and different dominant species compositions in each month. BIOENV analysis revealed that an environmental variable, such as temperature, had different effects in deciding values of relative coefficient between FM community and environment in different habitats. The key factor was temperature in the AR habitat, Chl-a in the SB habitat and both temperature and salinity in RR habitat. We conclude that unique FM community structure had been formed in the AR habitat of Sanheng Isle, which potentially offers a new sanctuary for more native and pelagic species. Construction of artificial habitat is a suitable solution to the conservation of rocky reef resources, and can play an important role in developing marine ranching program.

**Key Words:** Sanheng Isle; artificial reef; rocky reef; soft-bottom; fish and macroinvertebrate; community structure

人工鱼礁是人为地设置在水域中的构造物,用以改善水生生物栖息环境,为海洋生物(包括水生植物)提供索饵、繁殖、生长、发育等场所,从而达到保护、增殖生物资源和提高渔获质量的目的<sup>[1]</sup>。1988年在美国召开的第4届国际人工鱼礁会议上把人工鱼礁正式改名为人工生境<sup>[2]</sup>,将鱼礁的作用提升到生态系统层面上。众多实践证明,合理设计并恰当放置的鱼礁能发挥增殖海洋生物资源<sup>[3-8]</sup>、改善海洋局部环境的良好作用<sup>[9-10]</sup>。鉴于此,20世纪70年代末和本世纪初先后两次掀起鱼礁建设及研究高潮,在我国近海生物资源保护和可持续利用方面进行了大量的积极实践,发挥了不可替代的作用。作为一种生境,鱼礁所在空间会被多种生物所利用,不同种类占据生境中不同的生态位,且由于礁体材质本身区别于海底底质,其四周流态和水深等因子和天然岩礁又具有很大差异,理论上必然形成区别于原有生境和天然岩礁生境的独特生物群落,因而在保护岩礁资源和生物多样性方面具有特殊作用<sup>[10-11]</sup>。在实际水域,人工生境和自然生境间是否存在生物群落结构差别、差别程度如何等往往是鱼礁发挥资源增殖作用的关键条件,使之自然成为鱼礁生态学研究中关注的焦点之一<sup>[10,12]</sup>。为了从生境尺度探讨鱼礁建设对鱼类和大型无脊椎动物群落特征的影响,本文以三横山鱼礁生境为核心,选择其原有的泥地和周边的岩礁生境为对照组,结合具体环境因子,从群落水平的多个角度阐释鱼礁生境的群落特征,以验证鱼礁保护岩礁资源和岛礁生物多样性的假设,丰富人工生境生态学研究内容,为我国海洋牧场建设提供实践素材。

## 1 材料和方法

### 1.1 采样时间、区域及站点选择

2009年1—8月对三横山人工鱼礁、馒头山泥地及馒头山岩礁3种生境的鱼类和大型无脊椎动物进行逐月采样。于各月下旬在马鞍列岛西部水域(图1)进行为期1周的调查。该海域位于舟山群岛东北海域嵊泗列岛的中部,总面积约50km<sup>2</sup>,主要由岩礁和泥地两种天然生境组成,此外还分布有鱼礁、网箱养殖、贻贝养殖、减载平台等多种人工生境。当地于2008年4—5月在三横山海域投放了342个水泥鱼礁单体,建成9座礁群,形成礁区面积0.54km<sup>2</sup>。三横山鱼礁区形成前为粉砂质粘土底质,投礁后在原有底质基础上增加了大量的钢筋混凝土礁体,形成了区别于周围天然岩礁的独特物理环境,受其影响的生物基本来自泥地和岩礁生境,故选择两者为对照生境,以探讨鱼类等在3种紧密联系的生境中的群落差异。礁体投放前下三横山西侧和馒头山东侧皆为粉砂质粘土底质,岩礁带外围平均水深分别为(12.05±1.85)m和(11.45±2.17)m,涨落潮主流向皆为西北偏北和东南偏南,而水温、盐度、能见度等因子皆在同一水平上变化;此外岩礁带都由花岗岩组成,春夏季的优势海藻皆为铜藻 *Sargassum horneri* 和鼠尾藻 *Sargassum thunbergii*。基于上述环境条件相似的前提和且尽量减少干扰的原则,选择馒头山东面的岩礁和泥地,将其作为人工生境的自然对照生境。由于鱼类往往具有较强的游动性,某些种类一天的活动范围可达数百平方公里,对照生境距离太近会影响采样精度,因此将其设在离下三横山5.7km远的馒头山东面。

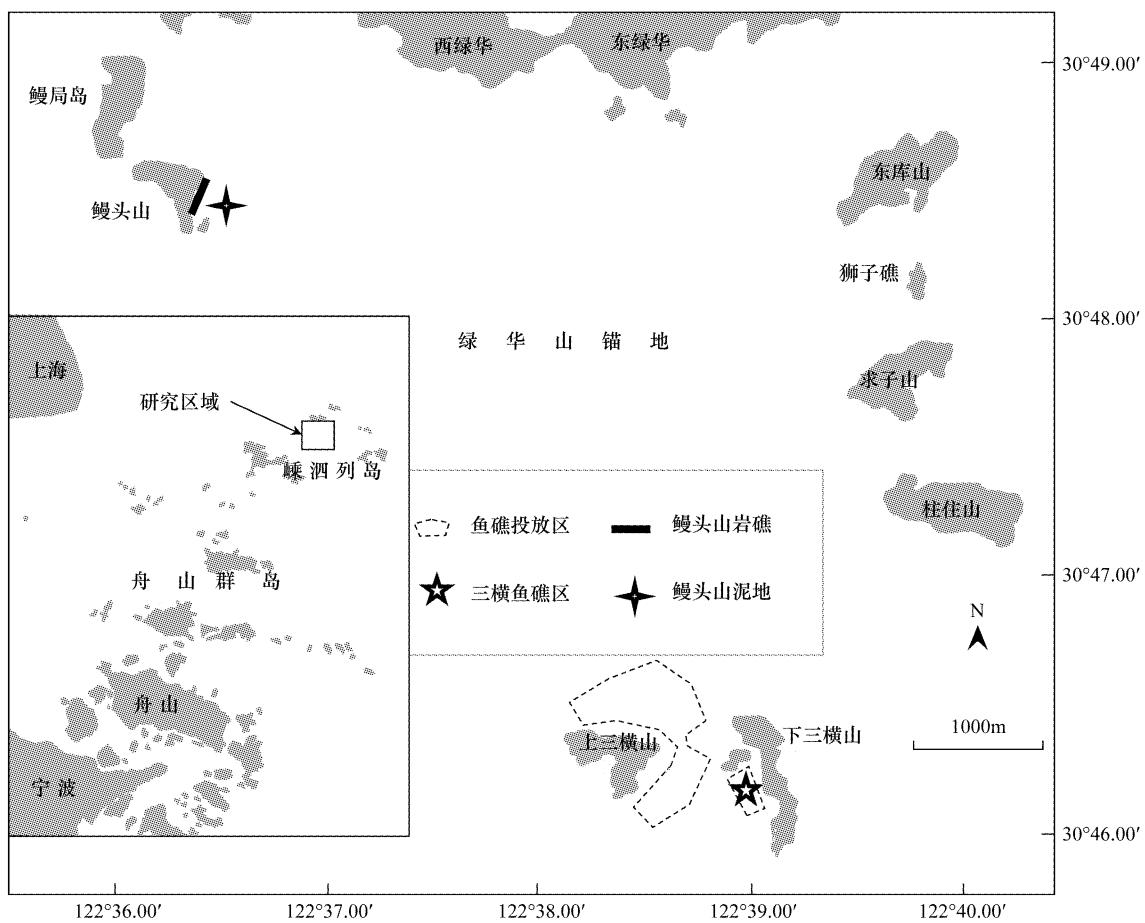


图1 3种生境采样站点分布

Fig. 1 Location of three sampling habitats

## 1.2 采样方法

采用多网目组合式三重刺网进行鱼类和大型无脊椎动物的采样。试验网由5种网目规格网片组成,内网衣网大最小为25mm,最大为80mm(表1)。25mm规格网每4片组成1张,单张总长度为60m,而其他网目规格各1片连成1张,单张总长度为120m,每种规格网片的总有效“拦截”面积皆为72m<sup>2</sup>。作业时,各规格刺网皆与岸基平行放置;其中鱼礁区的刺网放置在礁区内部,岩礁生境放置在鳗头山东面离岸不超过10m的岩礁带,而泥地生境则放置在离岸50m开外的绿华山锚地中。刺网在各生境的放置时间为24h左右,覆盖了昼夜两个时间段。

表1 采样刺网规格

Table 1 Indices of sampling gill-nets

内网衣目大 Inner layer mesh size/mm	外网衣目大 Outer layer mesh size/mm	单片网衣缩节高 Height of each piece of net/m	单片网衣缩节长 Length of each piece of net/m	内网衣水平缩节系数 Horizontal hanging ratio for inner layer	实验网作业全长 Total length of sampling nets /m
25	210	1.2	15	0.40—0.45	$15 \times 4 = 60$
50	330	2.4	30	0.45—0.50	50—80mm 规格网衣各
60	330	2.4	30	0.45—0.50	一片连成一顶, 总长为:
70	330	2.4	30	0.45—0.50	$30 \times 4 = 120$
80	330	2.4	30	0.45—0.50	

### 1.3 数据处理和分析方法

采用 Margalef 种类丰富度指数  $D^{[13]}$ , Whilm 多样性指数  $H^{[14]}$ , Pielou 均匀度指数  $J^{[15]}$ , Jaccard 相似性系数  $I$  以及 Pinkas 相对重要性指数  $IRI^{[16]}$  等参数进行数据解析。使用 Excel 2007、SPSS 15.0 及 PRIMER5 多元统计分析软件对所有数据进行统计处理。不同站点间指数均值采用成对样本  $T$  检验, 显著性水平为  $\alpha = 0.05$ 。

Margalef 种类丰富度指数公式:

$$D = (S - 1) / \ln N$$

Whilm 多样性指数公式:

$$H = - \sum W_i (\log_2 W_i)$$

Pielou 均匀性指数公式:

$$J = H / H_{\max} = H / \log_2 S$$

Jaccard 相似性系数公式:

$$I = c / (a + b - c)$$

Pinkas 相对重要性指数公式:

$$IRI = F(N' + W') = (i/f) \cdot [(N_i/N) + (W_i/W)]$$

## 2 结果和分析

### 2.1 三横山鱼礁生境和对照生境鱼类和大型无脊椎动物种类组成及优势种

1—8 月份在鱼礁和对照生境共采集到鱼类和大型无脊椎动物 5 个门类共计 90 种(表 2)。其中鱼礁生境为 66 种, 泥地生境 32 种, 岩礁生境 60 种。鱼礁区的种类数是泥地的 2 倍多, 和岩礁相比相差不大, 但也高出 6 种。从各个门类上看, 鱼礁生境的大型无脊椎动物种类数明显高于鱼类种数, 而天然生境中的两大类种类数基本持平。从种类聚集效果上看, 鱼礁区显著高于泥地生境, 且仅在礁区捕捉到昔日的大宗鱼类大黄鱼 *Larimichthys crocea* 和曼氏无针乌贼 *Sepiella maindroni*。虽然两者都是放流种类, 但这恰恰表明鱼礁投放有利于某些放流种的聚集, 从而对其起到保护和增殖作用。鱼礁与泥地、鱼礁与岩礁以及泥地与岩礁的种类共享率分别为 23.7%、32.8% 和 21.7%, 鱼礁和岩礁生境的种类趋同性最高。

表 2 3 种生境内鱼类和大型无脊椎动物大类种类数组成

Table 2 Species composition of fish and macroinvertebrate among different types in three habitats

种类类别 Type of species	生境类型 Type of habitats		
	鱼礁 Artificial reef	泥地 Soft bottom	岩礁 Rocky reef
鱼 Pisces	28	15	30
节肢类 Arthropod	16	13	14
软体类 Mollusca	14	0	12
棘皮类 Echinodermata	5	1	2
腔肠类 Coelenterata	2	3	2
独有种 Unique species	16	6	16
总计 Total number of species in each habitat	66	32	60
2 种生境共有种 Species shared between 2 habitats	23(鱼礁和泥地)		42(鱼礁和岩礁)
3 种生境共有种 Species shared among 3 habitats			17
总计种类数 Total number of species from 3 habitats			90

各生境每月只采样 1 次, 故  $F$  取值 100, 由此计算各生境 1—8 月份种类的 Pinkas 相对重要性值, 定义  $IRI \geq 20$  为优势种(表 3)。相对于岩礁生境, 除了趋礁性及当地常见种外, 鱼礁生境的优势种组成既包括偏好泥地生境的短吻舌鳎 *Cynoglossus abbreviatus* 和鲬 *Platycephalus indicus*, 也有喜居近岸但不趋礁的小黄鱼 *Larimichthys polyactis*, 这些种类在岩礁生境中往往是偶见种或非优势种; 鱼礁区对黑鲷 *Spondyliosoma cantharus* 和花鮨 *Lateolabrax japonicus* 等喜礁种类的诱集效果却不明显, 这可能与其投放区域的环境如水深和流态有关。礁区进入 7、8 月份的优势种数反而减少, 这主要是由于绝对优势种赤鼻棱鳀 *Thryssa kammalensis* 的影响, 该种在鱼礁生境的生物量比例最高达 54.8%, 个体数亦可占 66.1%, 使得同月份其他种类的优势度明显降低。相对泥地生境, 鱼礁生境中的优势种增加了褐菖鲉 *Sebastiscus marmoratus*、大泷六线鱼 *Hexagrammos otakii* 和短蛸 *Octopus ocellatus* 等贴礁种类。从优势种的组成情况也可以看出, 各生境不同月份

的优势种都在变化,重叠率低;而鱼礁生境在维持原有泥地生境优势种的同时引进了岩礁优势种,使之形成区别于两种天然生境的特有群落。

表3 各生境中优势种组成及月间变化

Table 3 Composition of dominant species and their monthly variations in three habitats

月份 Month	各生境优势种组成 Dominant species composition in each habitat		
	鱼礁 Artificial reef	泥地 Soft bottom	岩礁 Rocky reef
1	短吻舌鳎 <i>Cynoglossus abbreviatus</i> , 哈氏克肋海胆 <i>Tenmopleurus hardwickii</i>	黄鮟鱇 <i>Lophius litulon</i> , 口虾蛄 <i>Oratosquilla oratoria</i>	黑鲷 <i>Spondyliosoma cantharus</i> , 黄鮟鱇 <i>Lophius litulon</i> , 口虾蛄 <i>Oratosquilla oratoria</i>
2	褐菖鲉 <i>Sebastiscus marmoratus</i> , 日本蟳 <i>Charybdis japonica</i> , 锐齿蟳 <i>Charybdis acuta</i>	鲬 <i>Platycephalus indicus</i> , 日本蟳 <i>Charybdis japonica</i> , 细鳞蟹 <i>Dromia dehaani</i>	褐菖鲉 <i>Sebastiscus marmoratus</i> , 花鲈 <i>Lateolabrax maculatus</i>
3	黄姑鱼 <i>Nibea albiflora</i> , 哈氏克肋海胆 <i>Tenmopleurus hardwickii</i>	日本蟳 <i>Charybdis japonica</i>	花鲈 <i>Lateolabrax maculatus</i> , 鳀 <i>Mugil cephalus</i>
4	黄姑鱼 <i>Nibea albiflora</i> , 褐菖鲉 <i>Sebastiscus marmoratus</i> , 大泷六线鱼 <i>Hexagrammos otakii</i> , 哈氏克肋海胆 <i>Tenmopleurus hardwickii</i> , 甲虫螺 <i>Cantharus cecillei</i>	黄姑鱼 <i>Nibea albiflora</i> , 细鳞蟹 <i>Dromia dehaani</i> , 双角互敬蟹 <i>Hyastenus diacanthus</i>	条纹隔贻贝 <i>Septifer virgatus</i> , 桂山厚丛柳珊瑚 <i>Hicksonella guishanensis</i> , 黄姑鱼 <i>Nibea albiflora</i>
5	鲬 <i>Platycephalus indicus</i> , 黄姑鱼 <i>Nibea albiflora</i> , 日本蟳 <i>Charybdis japonica</i> , 艾氏活额寄居蟹 <i>Diogenes edwardsii</i>	海鳗 <i>Muraenesox cinereus</i>	黄姑鱼 <i>Nibea albiflora</i> , 大泷六线鱼 <i>Hexagrammos otakii</i> , 日本蟳 <i>Charybdis japonica</i> , 褐菖鲉 <i>Sebastiscus marmoratus</i> , 短蛸 <i>Octopus ocellatus</i>
6	鲬 <i>Platycephalus indicus</i> , 哈氏克肋海胆 <i>Tenmopleurus hardwickii</i>	皮氏叫姑鱼 <i>Johnius belengerii</i> , 日本蟳 <i>Charybdis japonica</i>	褐菖鲉 <i>Sebastiscus marmoratus</i> , 鳔 <i>Engraulis japonicus</i> , 亚洲棘螺 <i>Chicoreus asianus</i>
7	小黄鱼 <i>Larimichthys polyactis</i> , 赤鼻棱鳀 <i>Thryssa kammalensis</i> , 蓝圆鲹 <i>Decapterus maruadsi</i> ,	海鳗 <i>Muraenesox cinereus</i> , 赤鼻棱鳀 <i>Thryssa kammalensis</i> , 蓝圆鲹 <i>Decapterus maruadsi</i>	褐菖鲉 <i>Sebastiscus marmoratus</i> , 蓝圆鲹 <i>Decapterus maruadsi</i> , 赤鼻棱鳀 <i>Thryssa kammalensis</i> , 黄牙鲷 <i>Taius tumifrons</i>
8	赤鼻棱鳀 <i>Thryssa kammalensis</i> , 短蛸 <i>Octopus ocellatus</i>	赤鼻棱鳀 <i>Thryssa kammalensis</i> , 海鳗 <i>Muraenesox cinereus</i> , 细鳞蟹 <i>Dromia dehaani</i> , 日本蟳 <i>Charybdis japonica</i>	赤鼻棱鳀 <i>Thryssa kammalensis</i> , 甲虫螺 <i>Cantharus cecillei</i> , 黄牙鲷 <i>Taius tumifrons</i> , 双角互敬蟹 <i>Hyastenus diacanthus</i>

## 2.2 三横山鱼礁生境和对照生境种类多样性及聚类分析

鱼礁生境的种类丰富度范围为 2.589—5.689;泥地为 1.764—4.548;岩礁为 2.264—3.701。3 种生境种类组成均匀度范围分别为:鱼礁 0.621—0.808、泥地 0.134—0.793、岩礁 0.647—0.876。各生境的 Whilm 多样性测度值范围分别为:鱼礁 2.227—3.798、泥地 0.247—2.842、岩礁 1.895—4.001。比较 3 种多样性指标的月均值,可得:种类丰富度鱼礁( $3.98 \pm 1.06$ )>岩礁( $3.03 \pm 0.44$ )>泥地( $2.48 \pm 1.03$ );均匀度岩礁( $0.79 \pm 0.09$ )>鱼礁( $0.73 \pm 0.06$ )>泥地( $0.54 \pm 0.29$ );多样性岩礁( $3.38 \pm 0.67$ )>鱼礁( $3.12 \pm 0.52$ )>泥地( $1.76 \pm 1.02$ )。(表 4)与泥地生境相比,鱼礁区的丰富度 D、多样性 H 及均匀度 J 分别高出其 60.5%、77.3% 和 35.2%。各指标均值的成对样本 T 检验结果表明,鱼礁区丰富度水平显著高于泥地( $P = 0.026 < 0.05$ ),Whilm 多样性亦显著大于泥地生境( $P = 0.016 < 0.05$ ),但均匀度的差别不大( $P = 0.136 > 0.05$ )。岩礁与泥地生境各指数均值的统计结果和上述鱼礁与泥地间的统计结果一致。在鱼礁和岩礁生境间,虽多样性水平和均匀度无显著差别( $P = 0.244$  和  $0.174 > 0.05$ ),但鱼礁区的种类丰富度却显著高于岩礁生境( $P = 0.022 < 0.05$ )。结果一方面说明鱼礁生境相对自然生境具有容纳更多生物种类的功能和保护并维持生物多样性的独特作用,另一方面也表明鱼礁区的鱼类和大型无脊椎动物群落的多样性特征和天然岩礁生境极为相似,且两者都显著区别于泥地生境的相应群落。

以每个月份 3 种生境的种类和生物量建立种类 × 生物量矩阵,计算 Bray-Curtis 相似性值并形成相似矩阵,在此基础上进行组平均法聚类分析和多维定标分析,以比较 3 种生境中的鱼类和大型无脊椎动物的群落

特征。结合图2和图3,研究水域3种生境的鱼类和大型无脊椎动物群落可以大体分为3大类型。一是以1月份泥地和岩礁生境为代表,黄鮟鱇 *Lophionus setigerus* 为主要优势种的冬季近岸鱼类和大型无脊椎动物群落;二是以鱼礁生境以及2月份开始的岩礁生境为代表的岛礁群落;三是2月份以后的泥地生境为代表的开阔海域群落。事实上,群落结构随着季节的变化非常明显,还可从岛礁群落中分化出夏季(7、8月份)以赤鼻棱鳀 *Thrissa kammalensis* 为代表的洄游性种类所控制的全海域鱼类和大型无脊椎动物群落。从聚类分析和多维定标分析效果上可以看出,人工鱼礁生境与天然岩礁生境的群落结构基本类似,且两者大部分月份都显著区别于泥地生境。

表4 3种生境中的种类多样性测度值

Table 4 Values of species diversity indices in the three habitats

月份 Month	生境类型 Type of habitats								
	鱼礁 Artificial reef			泥地 Soft bottom			岩礁 Rocky reef		
	D	H	J	D	H	J	D	H	J
1	5.689	3.798	0.808	1.764	0.375	0.134	2.931	3.174	0.818
2	2.589	2.227	0.621	2.171	1.996	0.772	2.264	1.895	0.876
3	4.124	2.747	0.687	1.251	0.247	0.124	3.701	4.001	0.871
4	3.807	3.072	0.737	3.396	2.534	0.732	2.841	3.609	0.647
5	4.476	3.063	0.687	4.547	2.416	0.653	3.094	3.211	0.836
6	4.513	3.561	0.787	2.141	1.223	0.386	3.264	3.787	0.783
7	4.156	3.615	0.778	2.176	2.842	0.793	3.395	3.815	0.849
8	2.454	2.864	0.716	2.408	2.464	0.742	2.757	3.563	0.661
均值 Average	3.98 ± 1.06	3.12 ± 0.52	0.73 ± 0.06	2.48 ± 1.03	1.76 ± 1.02	0.54 ± 0.29	3.03 ± 0.44	3.38 ± 0.67	0.79 ± 0.09

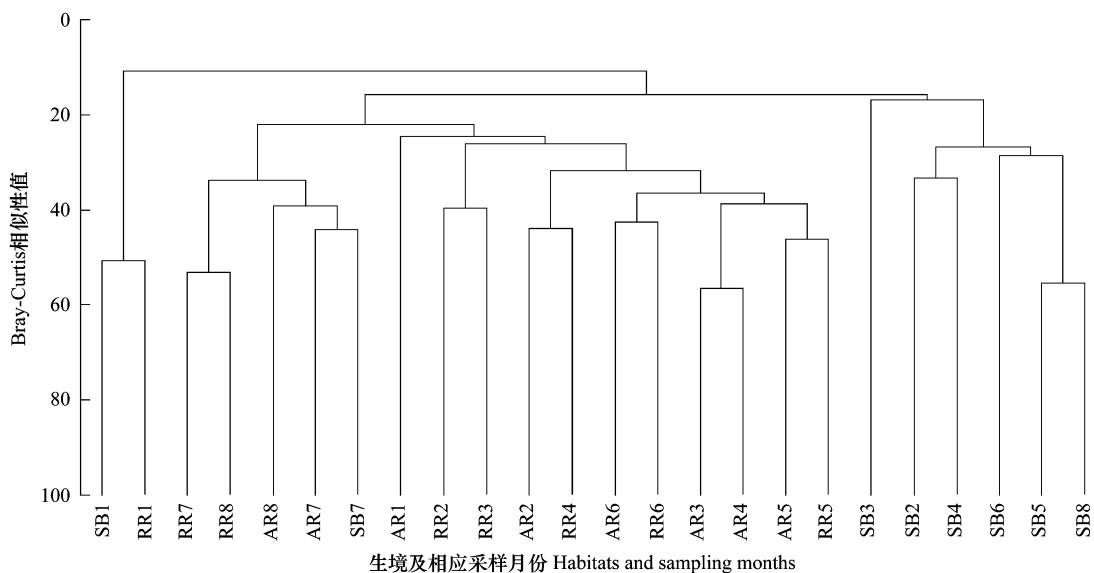


图2 各生境月间种类生物量组成的 Bray-Curtis 聚类图

Fig. 2 Bray-Curtis Dendrogram of biomass composition among three habitats from Jan. to Aug.

AR: 鱼礁; SB: 泥地; RR: 岩礁; 数字表示采样的月份

从群落结构的 $\beta$ 多样性测度结果来看,不同生境间相同月份的种类组成相似性都很低(Jaccard值皆小于0.4,图4),虽然鱼礁和岩礁间相似性极显著高于其他两种生境间的月均水平( $P = 0.001$ 和 $0.002 < 0.01$ ),但皆未达到中等相似水平。由此可判断,鱼礁、泥地和岩礁是3种截然不同的生境。虽然鱼礁和岩礁生境中的鱼类和大型无脊椎动物具有相似的种类多样性测度值,但由于种类组成的差别较大,其群落结构差别依然很

大,鱼礁生境并不能等同于岩礁生境,它是介于泥地和岩礁生境间,综合了天然生境的环境基础,同时具备自己独特的空间结构和环境条件的人工生境。

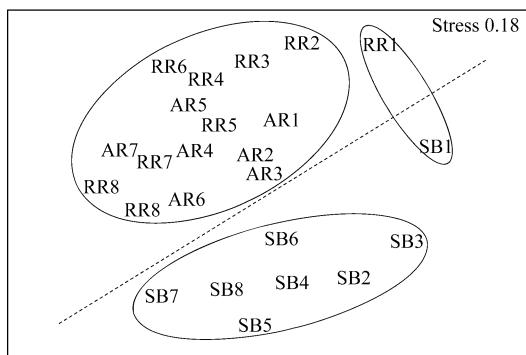


图3 各生境月间种类生物量组成的 MDS 分析

Fig. 3 MDS analysis of Biomass composition among three habitats from Jan. to Aug.

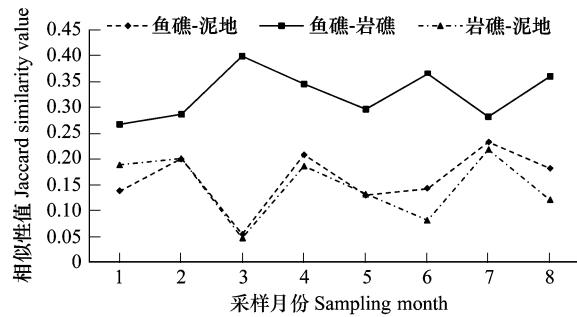


图4 各生境相同月份种类组成相似性的成对比较

Fig. 4 Paired-comparison of Jaccard similarity index values among three habitats in each month.

### 2.3 三横山鱼礁生境和对照生境鱼类和大型无脊椎动物群落和环境因子的相关分析

用 BIOENV 分析工具,选择温度( $T$ )、盐度( $S$ )、溶氧(DO)、叶绿素 a(Chl-a)和浊度(Turb)等环境因子分别对鱼礁、泥地和岩礁 3 种生境的鱼类和大型无脊椎动物群落进行 1 至 5 个环境因子的相关分析(表 5)。3 种生境生物群落影响因子最大系数  $R_{\max}$  分别为 0.472、0.459 和 0.684,各对应温度、叶绿素 a 和温盐组合因子。从单个因子的影响上看,鱼礁和岩礁生境中,温度与两者生物群落组成的相关性是最大的,而泥地生境则是叶绿素 a,可见泥地的叶绿素 a 含量是较为灵敏的限制因子。从两种因子的组合上看,鱼礁中的温度和溶氧起最大相关作用,相应的泥地为盐度和叶绿素 a 组合,岩礁为温盐组合。盐度因子在岩礁生境中呈现正相关关系,而鱼礁和泥地则表现为负相关关系,此外泥地的浊度也与其群落呈负相关关系。可见同一种环境因子虽然在小尺度空间具有一致性,但对具体生境的生物群落影响力是不同的。而环境因子的组合相关性也并不一定低于单个环境因子。

## 3 讨论

### 3.1 人工生境与天然生境间种类组成和优势种组成差异

鱼礁生境的鱼类和大型无脊椎动物总种类数是泥地的 2.06 倍,也多于岩礁生境。相对泥地生境,鱼礁生境多出的种类包括软体类(14 种,占多出部分的 41.2%),鱼类(13 种,占 38.2%),棘皮类(4 种,占 11.8%),而节肢类仅多 3 种(占 8.8%)。相对岩礁生境,其多出种类代表为大黄鱼 *Larimichthys crocea* 和曼氏无针乌贼 *Sepiella maindroni* 等洄游性放流种类。鱼礁的投放为条纹隔贻贝 *Septifer virgatus* 和带偏等蛤 *Modiolus comptus* 等贝类提供了附着基,为短蛸 *Octopus ocellatus* 和长蛸 *Polypus variabilis* 等捕食者提供了栖息和摄食场所,为褐菖鲉 *Sebastiscus marmoratus* 和大泷六线鱼 *Hexagrammos otakii* 等鱼类以及罗氏海盘车 *Asterias rollestoni*、紫海胆 *Anthocidaris crassispina* 等棘皮类提供了栖息摄食环境,也吸引了大黄鱼和曼氏无针乌贼等放流种类。但是鱼礁对黑鲷和花鲈等近岸趋礁鱼类的诱集效果并不明显,这与鱼礁生境所处的水深和流态有关。馒头山岩礁生境的水深跨度为 0—8.13m,采样均深为  $(5.43 \pm 2.06)$ m,明显低于鱼礁投放的平均深度  $(12.05 \pm 1.85)$ m。Anna 等报导了意大利西西里岛西北部鱼礁生境对一种鲷科放流种类(*Diplodus sargus*)的驻留效应,该鱼在礁区被放流的几天后超过 90% 的个体都移动到附近的海港和岩岸生境,人工鱼礁对其诱集效果并不比天然生境好<sup>[17]</sup>。可见鱼礁能为众多岩礁和泥地特有种类提供附着、栖息和摄食等场所,但对某些喜好急流的种类,其诱集效果并不比天然岩礁生境好。

优势种是具有控制群落和反映群落特征的种类<sup>[18]</sup>,因此优势种组成是反映各个生境群落特征的重要方

面。1—8月份下三横鱼礁生境的优势种为14种,泥地11种,岩礁生境19种。鱼礁生境的优势种既有泥地特有的短吻舌鳎 *Cynoglossus abbreviatus* 和鲬 *Platycephalus indicus*,也有岩礁生境特有的褐菖鲉 *Sebastiscus marmoratus* 和大泷六线鱼 *Hexagrammos otakii*,相对自然生境起着综合和强化作用。3种生境相邻月份的优势种组成一直在变化,鱼礁生境的变化率最高(87.5%),其次是岩礁(72.6%),最后是泥地(46.9%),相对而言,泥地群落是最为稳定的。可见鱼礁生境群落的稳定性要比自然生境低,但另一方面也表明鱼类和大型无脊椎动物对人工生境的利用率比自然生境高。

表5 3种生境生物群落和环境因子的 BIOENV 相关分析

Table 5 BIOENV analysis among artificial reef, soft bottom and rocky reef habitats

因子个数 Number of factors	鱼礁群落 AR community		泥地群落 SB community		岩礁群落 RR community	
	相关系数 Correlation coefficient	因子组合 Combination of factors	相关系数 Correlation coefficient	因子组合 Combination of factors	相关系数 Correlation coefficient	因子组合 Combination of factors
I	0.472 *	1	0.459 *	4	0.642	1
I	0.385	5	0.322	1	0.506	3
I	0.324	3	0.248	3	0.237	2
I	0.061	4	-0.195	5	0.164	4
I	-0.413	2	-0.416	2	-0.039	5
II	0.470	1,3	0.455	2,4	0.684 *	1,2
II	0.457	1,2	0.447	3,4	0.625	1,3
II	0.392	3,5	0.444	1,4	0.577	2,3
II	0.392	1,5	0.316	1,3	0.344	1,4
II	0.302	2,5	0.253	1,2	0.177	3,4
II	0.266	4,5	0.146	2,3	0.164	2,4
II	0.256	1,4	-0.168	4,5	-0.001	4,5
II	0.247	2,3	-0.193	3,5	-0.011	1,5
II	0.172	3,4	-0.217	1,5	-0.071	3,5
II	0.029	2,4	-0.257	2,5	-0.100	2,5
III	0.453	1-3	0.447	1,3,4	0.672	1-3
III	0.392	1,3,5	0.440	2,3,4	0.356	1,3,4
III	0.352	1,2,5	0.436	1,2,4	0.332	1,2,4
III	0.343	1,4,5	0.252	1,2,3	0.233	2,3,4
III	0.322	2,3,5	-0.158	1,4,5	0.064	1,4,5
III	0.297	1,3,4	-0.167	2,4,5	0.030	1,3,5
III	0.260	3,4,5	-0.169	3,4,5	0.011	2,4,5
III	0.244	1,2,4	-0.217	1,3,5	-0.001	3,4,5
III	0.239	2,4,5	-0.218	1,2,5	-0.017	1,2,5
III	0.157	2,3,4	-0.245	2,3,5	-0.079	2,3,5
IV	0.369	1,2,3,5	0.436	1,2,3,4	0.327	1,2,3,4
IV	0.342	1,3,4,5	-0.146	1,3,4,5	0.104	1,3,4,5
IV	0.299	1,2,4,5	-0.148	2,3,4,5	0.077	1,2,4,5
IV	0.277	1,2,3,4	-0.152	1,2,4,5	0.032	2,3,4,5
IV	0.222	2,3,4,5	-0.240	1,2,3,5	0.025	1,2,3,5
V	0.325	All	-0.152	All	0.097	All

注:因子合成列中的数字1为温度,2为盐度,3为溶氧,4为叶绿素a,5为浊度; \*表示最大值

### 3.2 人工生境与天然生境间鱼类和大型无脊椎动物多样性及群落特征的比较

鱼礁投放后,由于礁体材质和结构的特殊性,在海洋连续界面形成了完全区别于天然生境的物理环境,并最终演变成稳定的人工生境。其物理界面和三维空间被各种生物所利用,形成多维生态位。从空间结构上看,鱼礁生境要比泥地和岩礁生境复杂得多,理论上可以提供更多的小生境,从而容纳更多的物种,并保持较高的生物多样性。国外的诸多相关研究一定程度上印证了这些结论,如 Santos 等人对葡萄牙南部沿岸两处人工鱼礁的鱼类群落和对照生境作了比较研究,发现鱼礁的投放极大地提高了当地的鱼类种类丰富度和多样性<sup>[4-5]</sup>; Diamant 等在地中海岩相海岸带的鱼类群聚研究中选择人工鱼礁、天然岩礁以及港口平台设施3种栖

息地对其中的鱼类群落进行比较,结果发现无论从种类多样性还是生物量上,人工鱼礁栖息地都优于其他两种生境<sup>[7]</sup>;Badalamenti 等通过研究鱼礁和岩礁生境中的附着软体动物群落,发现岩礁的种类丰富度和多样性都显著高于鱼礁生境,但某些种类在鱼礁上的分布密度却比天然礁大得多<sup>[19]</sup>,研究中未包括鱼类、节肢类等生物区系,故很难从整体上验证鱼礁生境中真实的生物多样性。国内虽然对人工鱼礁作了丰富的研究,但几乎未从生境角度作过比较和详细报道。本文研究对象为鱼类和大型无脊椎动物,包括绝大部分的鱼礁相关种类。通过3种生境间3类生物多样性测度值的比较分析,发现鱼礁生境的丰富度显著高于天然生境,虽然多样性水平和岩礁生境间无明显差别,却显著高于泥地生境。这说明人工生境在保护和维持当地水域生物多样性方面具有独特作用,并不亚于天然生境,研究结果从多样性角度验证了文中所提假设。

聚类和多维定标分析结果表明:从空间角度上看,可以将3种生境的鱼类和大型无脊椎动物群落划分为泥地群落和礁型群落,其中礁型群落包括鱼礁和岩礁两种生境的生物群落;从时间角度上看,3种生境的相关种类可明显划分为1月份底栖凶猛鱼类控制的群落、2—6月份的沿岸高种类丰富度群落和7—8月份由中上层洄游性鳀科鱼类为标志的群落。分析结果将鱼礁和岩礁生境的群落基本划分为一类,但通过各月份3种生境的Jaccard相似性分析,各生境的相似性水平都很低,尚未达到中等相似程度。可见,在功能上鱼礁和岩礁群落具有一定相似性;但本质上,两种生境中的群落并不相同。人工鱼礁的投放虽然营造了一种礁型环境,但不等同于天然岩礁,鱼礁生境并不能完全替代天然岩礁生境,它的作用就在于综合泥地和岩礁生物群落形成一种更为复杂的生物区系,从而起到资源增殖和保护的生态作用。

### 3.3 环境因子对小尺度生境中鱼类和大型无脊椎动物群落特征的影响

海洋非生物环境因子包括可测度和不可测度因子:水深、底质、离岸距离、温盐、溶氧、叶绿素a、透明度、浊度和磷盐等因子都是可测度的,但空间异质性、流态等却难以度量。由于研究对象和目的不同,选择的环境因子数量和组成也不同。Moura 等选用水深和鱼礁结构两个因子分析大型底栖生物群落的变化,认为鱼礁结构是首要因子<sup>[20]</sup>。David 等在墨西哥湾北部的几处石油钻井平台对鱼类群聚影响研究中选用平台侧面、季节、昼夜、水深和水平距离等多个因子对鱼类在平台周围的分布密度进行了比较探讨,结果发现水深是主要因子,其次是季节<sup>[21]</sup>。由于下三横山投放的礁型只有一种,而且水深最大不过15m,故选择温度、盐度、溶氧、叶绿素和浊度5个环境因子与3种生境中的生物群落进行相关分析。除鱼礁生境叶绿素a 3—8月份显著高于泥地和岩礁生境( $P = 0.034$  和  $0.046 < 0.05$ )、3—4月份的溶氧也显著高于自然生境( $P = 0.018$  和  $0.032 < 0.05$ )外(图5和图6),其他时间各因子在3种生境中的月变化并无显著差异。相关分析表明不同生境相关性最高的环境因子不同,影响鱼礁生物群落的最大相关因子是温度,泥地为叶绿素a,而岩礁则是温盐因子组合,这说明不同生境的生物群落对相同的环境因子的响应机制是不同的。研究中面临的一大难题是对流态、空间异质性等难以测度因子无法准确描述,而这些因子很可能是决定鱼礁生境或自然生境生物群落的关键因子。

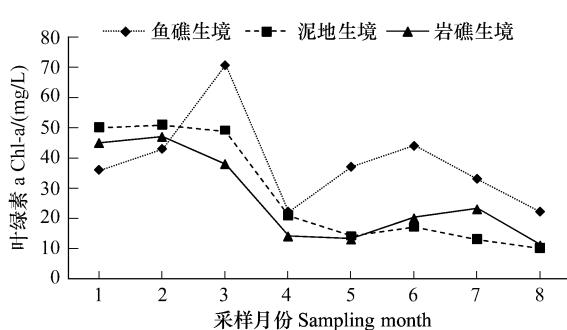


图5 3种生境间叶绿素a的月变化

Fig. 5 Monthly variation of Chl-a in three habitats

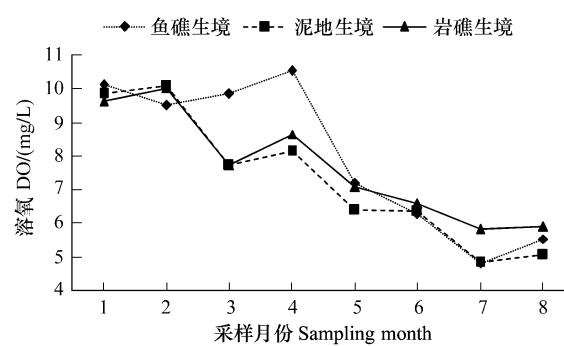


图6 3种生境间溶氧的月变化

Fig. 6 Monthly variation of DO in three habitats

#### 4 结语

在泥地投放人工鱼礁似乎有悖鱼礁选址原则,但研究结果表明:选择合理的礁型,采用恰当的材料,放置于合适的区域,人工鱼礁在泥地生境的基础上可建立起更为多样化、综合了自然和人工环境优势的独特生境,从而形成相对自然群落结构有着互补和强化作用的独特群聚模式,为更多的当地种和放流种提供栖息环境,对保护岩礁资源及大宗鱼类乃至岛礁生物多样性起着积极而特殊的作用,在海洋牧场建设中的应用前景极佳。

**致谢:**上海海洋大学赵静、刘卫云、许敏、许强、陈清满等在调查和实验环节做了大量工作,嵊泗县渔民张志高在现场采样过程中给予了积极协助,缅因州大学陈勇教授对写作给予帮助,在此一并致谢。

#### References:

- [1] Zhang J C, Yu J H, Wang J Q. Current status on artificial reef construction. *Fisheries Science*, 2004, 23(11):27-30.
- [2] Yang L, Liu T Y, Huang R K. Origin and history of artificial fish reef. *Journal of Modern Fisheries Information*, 2005, 20(12):5-8.
- [3] Zhang H H, Sun L. On reproduction increase of the sea aquatic resources by artificial reef engineering. *Resources Science*, 2001, 23(5):6-10.
- [4] Santos M N, Monteiro C C. The Olhão artificial reef system (south Portugal): Fish assemblages and fishing yield. *Fisheries Research*, 1997, 30(1/2):33-41.
- [5] Santos M N, Monteiro C C. Comparison of the catch and fishing yield from an artificial reef system and neighbouring areas off Faro (Algarve, south Portugal). *Fisheries Research*, 1998, 39(1):55-65.
- [6] Rilov G, Benayahu Y. Vertical artificial structures as an alternative habitat for coral reef fishes in disturbed environments. *Marine Environmental Research*, 1998, 45(4/5):431-451.
- [7] Diamant A, Ben Tuvia A, Baranes A, Golani D. An analysis of rocky coastal eastern Mediterranean fish assemblages and a comparison with an adjacent small artificial reef. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 1986, 30(3):269-285.
- [8] Brian K. Walkera, Bruce Hendersonb, Richard E Spieler. Fish assemblages associated with artificial reefs of concrete aggregates or quarry stone offshore Miami Beach, Florida, USA. *Aquatic Living Resources*, 2002, 15(2):95-105.
- [9] Wang B, Wu J P, Gao J, Jia S M, Zhang C Q, Mu H T, Zhang J D. An approach to construction of artificial reef to improve the offshore ecology and fishery environments in Qingdao. *Coastal Engineering*, 2004, 23(4):66-73.
- [10] Seaman W, Jensen A C. Purposes and practices of artificial reef evaluation//Seaman W ed. *Artificial Reef Evaluation with Application to Natural Marine Habitats*. New York: CRC Press, 2000:2-19.
- [11] Carr M H, Hixon M A. Artificial reefs: the importance of comparisons with natural reefs. *Fisheries*, 1997, 22(4):28-33.
- [12] Bohnsack J A, Sutherland D L. Artificial reef research: a review with recommendations for future priorities. *Bulletin of Marine Science*, 1985, 37(1):11-39.
- [13] Margalef R. Perspectives in ecological theory. Chicago: Univ. Chicago Press, 1968:111.
- [14] Whilm J L. Use of biomass units in Shannon's formula. *Ecology*, 1968, 49(1):153-156.
- [15] Pielou E C. Species-diversity and pattern-diversity in the study of ecological succession. *Journal of Theoretical Biology*, 1966, 10(2):370-383.
- [16] Pinkas L, Oliphant M S, Iverson I L K. Food habits of albacore, bluefin tuna, and bonito in California waters. *Clif Dep Fish Game. Fish Bull*, 1971, 152:1-105.
- [17] D'Anna G, Giacalone V M, Badalamenti F, Pipitone C. Releasing of hatchery-reared juveniles of the white seabream *Diplodus sargus* (L., 1758) in the Gulf of Castellammare artificial reef area (NW Sicily). *Aquaculture*, 2004, 233(1/4):251-268.
- [18] Shen G Y, Shi B Z. *Marine Ecology*. Beijing: Science Press, 2002: 260-262.
- [19] Badalamenti F, Chemello R, D'Anna G, Henriquez Ramos P, Riggio S. Are artificial reefs comparable to neighbouring natural rocky areas? A mollusk case study in the Gulf of Castellammare (NW Sicily). *ICES Journal of Marine Science*, 2002, 59(suppl): 127-131.
- [20] Moura A, Boaventura D, Curdia J, Carvalho S, Cancela da Fonseca L, Leitao F M, Santos M N, Monteiro C C. Effect of depth and reef structure on early macrobenthic communities of the Algarve artificial reefs (southern Portugal). *Hydrobiologia*, 2007, 580(1):173-180.
- [21] David R Stanley, Charles A Wilson. Variation in the density and species composition of fishes associated with three petroleum platforms using dual beam hydroacoustics. *Fisheries Research*, 2000, 47(2/3):161-172.

#### 参考文献:

- [1] 张剑诚,于金海,王吉桥.人工渔礁建设研究现状. *水产科学*, 2004, 23(11):27-30.
- [2] 杨吝,刘同渝,黄汝堪.人工鱼礁的起源和历史. *现代渔业信息*, 2005, 20(12):5-8.
- [3] 张怀慧,孙龙.利用人工鱼礁工程增殖海洋水产资源的研究. *资源科学*, 2001, 23(5):6-10.
- [9] 王波,武建平,高俊,贾世敏,张成启,牟洪涛,张杰东.关于青岛建设人工鱼礁改善近海生态和渔业环境的探讨. *海岸工程*, 2004, 23(4):66-73.
- [18] 沈国英,施并章. *海洋生态学*. 北京: 科学出版社, 2002: 260-262.