

不同水泥类型混凝土人工鱼礁的生物附着效果*

李真真^{1,2} 公丕海² 关长涛² 李娇^{2①} 王腾腾^{1,2}

(1. 上海海洋大学海洋科学研究院 上海 201306; 2. 农业部海洋渔业可持续发展重点实验室 青岛市海水鱼类种子工程与生物技术重点实验室 中国水产科学研究院黄海水产研究所 青岛 266071)

摘要 为研究不同水泥类型混凝土人工鱼礁对生物附着效果的影响,本研究在青岛薛家岛海域进行礁体挂板实验,水泥类型包括复合硅酸盐水泥(P.C)、矿渣硅酸盐水泥(P.S)、火山灰质硅酸盐水泥(P.P)、粉煤灰硅酸盐水泥(P.F)和铝酸盐水泥(CA),2015年9月完成海上挂板。结果显示,2015年11月第1次取样,不同材质人工鱼礁上的附着生物量从大到小依次为P.P、P.S、CA、P.F和P.C,生物量分别为888.29、755.43、752.07、620.11和402.01 g/m²;生物种类分别为P.S上7种,P.F、P.P和CA上各5种,P.C上3种。2016年3月,CA、P.P、P.F、P.C和P.S上的生物量分别为1956.94、1601.44、1453.06、1254.63和1072.43 g/m²;生物种类由多到少为P.F、CA、P.S、P.P、P.C,种类分别为17、15、12、11、8。2015年11月,Pielou均匀度指数 J 为CA>P.P>P.F>P.C>P.S;2016年3月为P.S>P.F>P.P>CA>P.C。2015年11月,附着生物Shannon-Wiener多样性指数(H')为CA>P.P>P.F>P.C>P.S;2016年3月依次为P.S>P.F>P.P>CA>P.C。研究表明,5种混凝土鱼礁中,铝酸盐水泥(CA)及粉煤灰硅酸盐水泥(P.F)人工鱼礁生物附着效果好,复合硅酸盐水泥(P.C)生物附着效果较差。

关键词 水泥类型;混凝土人工鱼礁;附着生物

中图分类号 X835 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2017)05-0057-07

人工鱼礁是将人工构造物有目的地投放于海底,用来改善海域生态环境、保护和增殖渔业资源的人工设施(Howe, 2003; Manoudis *et al.*, 2005)。一般来说,人工鱼礁的投放会改变礁体周围几百米海域的水环境状况(Wilding *et al.*, 2002),它不仅会影响营养盐的循环及传输(Alongi *et al.*, 2008; 林军等, 2006),也会使沉积物发生生物化学变化(Falcao *et al.*, 2007),同时为海洋生物提供良好的栖息环境(Henderson *et al.*, 2014)。附着生物是人工鱼礁集鱼、诱鱼的主要生物环境因子,又是礁区渔业对象的主要饵料生物,可以作为海洋生物的饵料场、栖息地及庇护所(刘同渝,

2003; 李娇等, 2016)。附着生物的种类、组成及数量变化直接影响着人工鱼礁区的生态效应(周艳波等, 2010),可作为人工鱼礁效果评估的重要衡量指标。

不同材料的人工鱼礁,其生物附着种类和数量不同(Huang *et al.*, 2006; 陈勇等, 2012; Kress *et al.*, 2002; 刘秀民等, 2007; 张伟等, 2010)。人工鱼礁建造材料包括混凝土、木材、钢板、塑料、石块、轮胎以及废弃的轮船、火车等。混凝土由于其结构稳定,是应用最广泛的人工鱼礁材料之一(Walker *et al.*, 2002; Baine, 2001)。Falace等(2002)对悉尼港的混凝土人工鱼礁进行生态效果评估,结果表明,礁体上生物附着效果良好

* 中央级公益性科研院所基本科研业务费(20603022011006)和公益性行业(农业)科研专项(201003068)共同资助 [This work was supported by Central Research Institutes of Basic Research and Public Service Special Operations(20603022011006), and Special Fund for Agro-scientific Research in the Public Interest(201003068)]. 李真真, E-mail: lzzcau2011@sina.com

① 通讯作者: 李娇, E-mail: lijiao@ysfri.ac.cn

收稿日期: 2016-05-12, 收修改稿日期: 2016-07-06

而且底栖生物的丰度有所增加。目前,虽然对混凝土的利用及研究较多,但关于不同水泥类型的混凝土人工鱼礁差异的研究相对较少。不同类型的水泥成本相差较大,且成分及组成各异。铝酸盐水泥的主要成分为铝酸一钙及其他铝酸盐以及少量的硅酸二钙等。硅酸盐水泥的主要成分为硅酸三钙、硅酸二钙、铝酸三钙、铁铝酸四钙等。本研究针对复合硅酸盐水泥(P.C)、矿渣硅酸盐水泥(P.S)、火山灰质硅酸盐水泥(P.P)、粉煤灰硅酸盐水泥(P.F)和铝酸盐水泥(CA) 5 种类型水泥制作的人工鱼礁的生物附着效果进行了实验研究,

分析了 5 种人工鱼礁生态效益及经济效益的差别,以期为混凝土人工鱼礁水泥类型的选择提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 样板制作

5 种水泥类型包括复合硅酸盐水泥(P.C)、矿渣硅酸盐水泥(P.S)、火山灰质硅酸盐水泥(P.P)、粉煤灰硅酸盐水泥(P.F)和铝酸盐水泥(CA),每种类型的人工鱼礁制作 10 个(表 1)。尺寸均为 20 cm×20 cm×2 cm(图 1)。

表 1 鱼礁模型尺寸及数量
Tab.1 Size and quantity of artificial reef models

编号 Serial No.	材料 Material	水泥类型 Cement concrete	代号 Code	尺寸 Size(cm)	组数 Groups
1	混凝土 Concrete	复合硅酸盐水泥 Composite Portland cement	P.C	20×20×2	10
2	混凝土 Concrete	矿渣硅酸盐水泥 Slag Portland cement	P.S	20×20×2	10
3	混凝土 Concrete	火山灰质硅酸盐水泥 Pozzolan Portland cement	P.P	20×20×2	10
4	混凝土 Concrete	粉煤灰硅酸盐水泥 Fly-ash Portland cement	P.F	20×20×2	10
5	混凝土 Concrete	铝酸盐水泥 Aluminate cement	CA	20×20×2	10

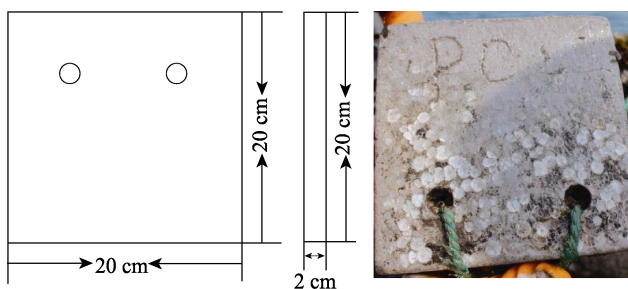


图 1 人工鱼礁挂板

Fig.1 Artificial reefs exposed to the marine environment

1.2 挂样时间及海域

2015 年 9 月在山东省青岛市薛家岛海域投放。

1.3 挂样及取样方法

将 5 种人工鱼礁挂板悬挂在网箱的缆绳上,均沉降到海面以下 50 cm 处,减少不同光照对人工鱼礁的影响。2015 年 11 月和 2016 年 3 月,分别进行 1 次取样。每次采样、每种材料的鱼礁各取 3 个样,采样面积为 10 cm×10 cm。取得的样品用玻璃瓶装,加入 5% 的福尔马林溶液固定,带回实验室分析鉴定。

1.4 数据分析

附着生物量按照如下公式计算:

$$P = m / s$$

式中, P 为附着生物量(g/m^2), m 为附着生物干

重质量(g), s 为取样面积(m^2)。

附着生物群落多样性分析采用 Shannon-Wiener 多样性指数(H')和 Pielou 均匀度指数(J)。计算公式如下:

$$H' = -\sum_{i=1}^S P_i \log_2 P_i$$

$$J = H' / \log_2 S$$

式中, S 为采集样品的种类总数, P_i 为第 i 种的个体数与样品中的总个体数的比值(N_i/N)。

优势种由优势度指数(Y)确定, $Y > 0.02$ 为优势种。计算公式如下:

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

式中, f_i 为第 i 种出现的个体数, N 为采集样品中的所有种类总个体数, N_i 为第 i 种出现的频率。利用软件 Primer 5 计算不同礁体上附着生物群落的多样性参数。采用 SPSS 17.0 软件进行统计学分析,单因子方差分析(One-way ANOVA)检验组内差异, $P < 0.05$ 为差异显著, $P < 0.01$ 为差异极显著。

2 结果

2.1 礁体附着生物种类及生物量

2 次取样附着生物生长状况如图 2、图 3 所示,前后 2 次效果差异显著,且不同材质人工鱼礁上附着

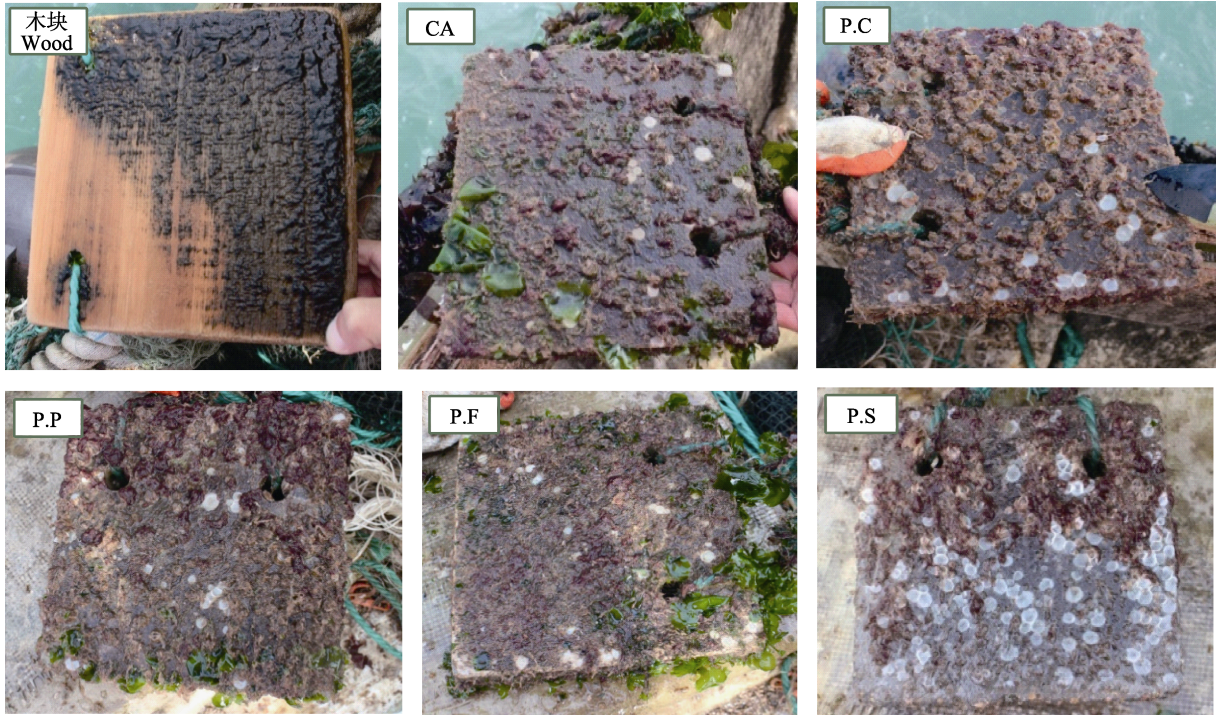


图 2 2015 年 11 月附着生物生长状况
 Fig.2 The growth status of fouling organisms in November, 2015

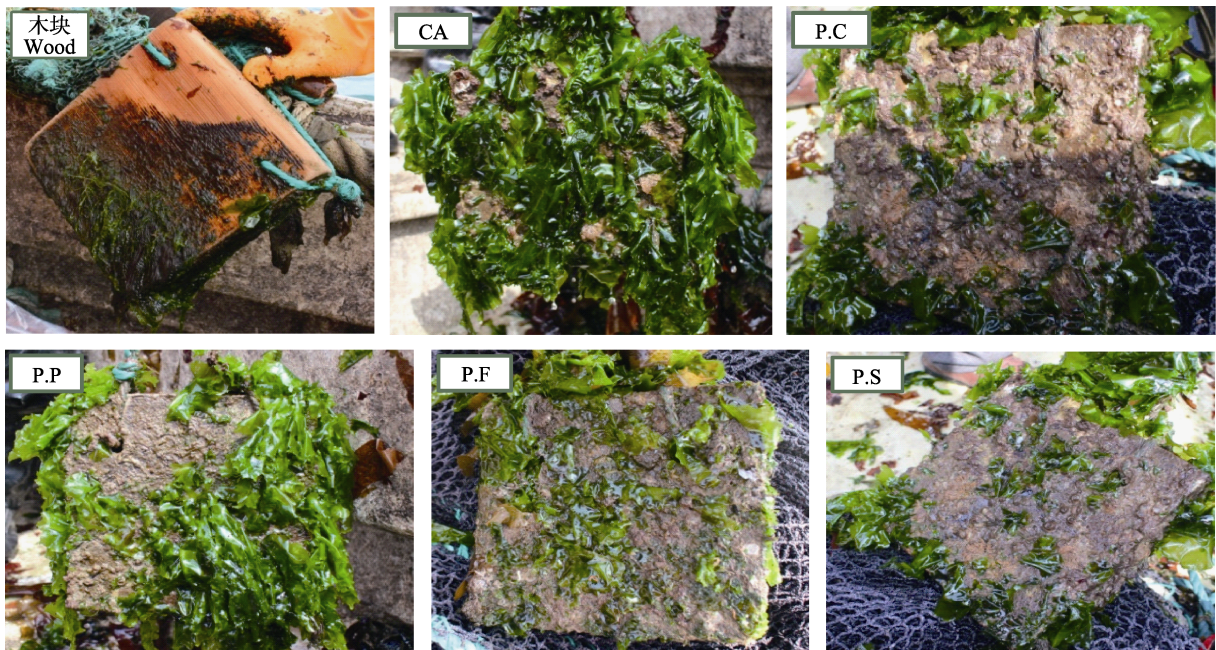


图 3 2016 年 3 月附着生物生长状况
 Fig.3 The growth status of fouling organisms in March, 2016

生物量有显著差异。附着生物大多数属于温带黄渤海常见物种(表 2)。2 次取样生物种类总数量差异较大, 第 1 次取样生物种类数为 13 种, 其中, 红藻门 2 种、绿藻门 2 种、褐藻门 2 种、节肢动物门 4 种及环节动物门 3 种; 第 2 次生物种类数为 27 种, 其中, 红藻门 4 种、绿藻门 3 种、褐藻门 2 种、节肢动物门 6 种、

环节动物门 8 种及软体动物门、腔肠动物门、纽形动物门、扁形动物门各 1 种。

从不同水泥类型上看(表 3), 2015 年 11 月 P.S 上生物种类为 7 种, P.F、P.P、CA 上为 5 种, P.C 上为 3 种; 2016 年 3 月生物种类由多到少为 P.F、CA、P.S、P.P、P.C, 种类分别为 17、15、12、11、8。2015 年

表2 不同材料人工鱼礁附着生物种类
Tab.2 Different kinds of material adhesion on artificial reefs

种类 Species	人工鱼礁材料 Material of artificial reef											
	木块 Wood		P.F		P.S		CA		P.C		P.P	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
带形蜈蚣藻 <i>Grateloupia turuturu</i>	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	-	-
仙菜 <i>Ceramium</i> sp.	-	-	-	+	-	-	-	+	-	-	-	+
紫菜 <i>Porphyra</i> sp.	+	+	-	+	-	+	-	-	-	-	-	-
海头红 <i>Plocamium telfairiae</i>	-	-	-	-	-	+	-	-	-	+	-	-
缘管浒苔 <i>Enteromorpha linza</i>	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
孔石莼 <i>Ulva pertusa</i>	-	+	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+
刚毛藻 <i>Cladophora</i> sp.	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+
幅叶藻 <i>Petalonia fascialidingba</i>	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
萱藻 <i>Scytosiphon lomentarius</i>	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-
麦秆虫 <i>Caprella</i> sp.	-	-	-	+	-	+	-	+	-	+	-	-
钩虾 <i>Gammarus</i> sp.	-	-	+	+	+	-	-	+	-	+	+	-
藻钩虾 <i>Amphithoe japonica</i>	-	-	-	-	+	-	+	+	+	-	+	-
青纵沟纽虫 <i>Lineus fuscoviridis</i> Takakura	-	-	-	+	-	+	-	-	-	-	-	-
东方小藤壶 <i>Chthamalus challenger</i>	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+
多室草苔虫 <i>Bugula neritina</i>	-	-	-	-	-	+	-	+	-	-	-	-
双管阔沙蚕 <i>Platynereis bicanaliculata</i>	-	-	-	-	+	-	-	+	-	-	-	-
多齿围沙蚕 <i>Perinereis nuntia</i>	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	+
中华内卷齿蚕 <i>Aglaophamus sinens</i>	-	-	-	-	+	+	-	+	-	-	-	-
异足索沙蚕 <i>Lumbricomeries heteropoda</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-
吻蛭虫 <i>Artacama proboscidea</i>	-	-	-	+	-	+	-	+	-	-	-	+
岩虫 <i>Marphysa sanguinea</i>	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-
扁模裂虫 <i>Typosyllis fasciata</i>	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	+
千岛模裂虫 <i>Typosyllis adamantens kurilensi</i>	-	-	-	+	-	-	-	-	-	+	-	+
哈鳞虫 <i>Harmothoe</i> sp.	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-
小肌蛤 <i>Muculusnanus</i>	-	-	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+
微点舌片海牛 <i>Armina (Linguella) babai</i>	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-
黑额近四眼纽虫 <i>Quasitetrastemma nigrifrons</i>	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+
平角涡虫 <i>Planocera riticulata</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+

注：“1”为第1次取样，“2”为第2次取样

Note: “1”: The first sampling, “2”: The second sampling

表3 不同材质人工鱼礁的附着生物种类总数及生物量
Tab.3 The species and biomass of the fouling organisms on different artificial reefs

人工鱼礁材料 Material of artificial reef	附着生物种类 Species of fouling organisms		附着生物量 Biomass of fouling organisms (g/m ²)	
	2015-11-19	2016-03-23	2015-11-19	2016-03-23
P.F	5	17	620.11	1453.06
P.S	7	12	755.43	1072.43
P.P	5	11	888.29	1601.44
P.C	3	8	402.01	1254.63
CA	5	15	752.07	1956.94

11 月, 不同材料人工鱼礁上附着生物量从大到小依次为 P.P、P.S、CA、P.F、P.C, 生物量分别为 888.29、755.43、752.07、620.11、402.01 g/m²。2016 年 3 月, 各实验组附着生物量均有明显增加, CA 组附着生物总量最多, 为 1956.94 g/m²; 其次分别为 P.P、P.F、P.C、P.S, 生物量分别为 1601.44、1453.06、1254.63、1072.43 g/m²。2 次取样中, 生物量最高为 CA 组, 其次为 P.P 及 P.F 两组。

2.2 群落结构变化

结果显示(图 4), 2015 年 11 月, Pielou 均匀度指数分别为 CA>P.P>P.F>P.C>P.S, 依次为 0.44、0.33、0.32、0.28、0.20, 其中, P.P 与 P.F 差异不显著($P>0.05$),

其余各组均有显著差异($P<0.05$)。2016 年 3 月, 分别为 P.S>P.F>P.P>CA>P.C, Pielou 均匀度指数依次为 0.37、0.35、0.34、0.29、0.26, 其中, P.F、P.P 两组差异不显著($P>0.05$)。CA、P.C 两组均匀度指数下降, 其余各组均上升。第 1 次取样 Shannon-Wiener 多样性指数由高到低依次为 CA>P.P>P.F>P.C>P.S, 分别为 2.26、1.90、1.72、1.51、1.25, 各组均存在显著差异($P<0.05$)。第 2 次取样依次为 P.S>P.F>P.P>CA>P.C, Shannon-Wiener 多样性指数依次 2.80、2.79、2.72、2.31、1.92, 其中 P.S、P.F 两组差异不显著($P>0.05$), 其余各组均存在显著差异($P<0.05$)。2 次取样 Shannon-Wiener 多样性指数平均值最高为 P.P 组, 其次为 CA 及 P.F 组, 最低为 P.C 组。

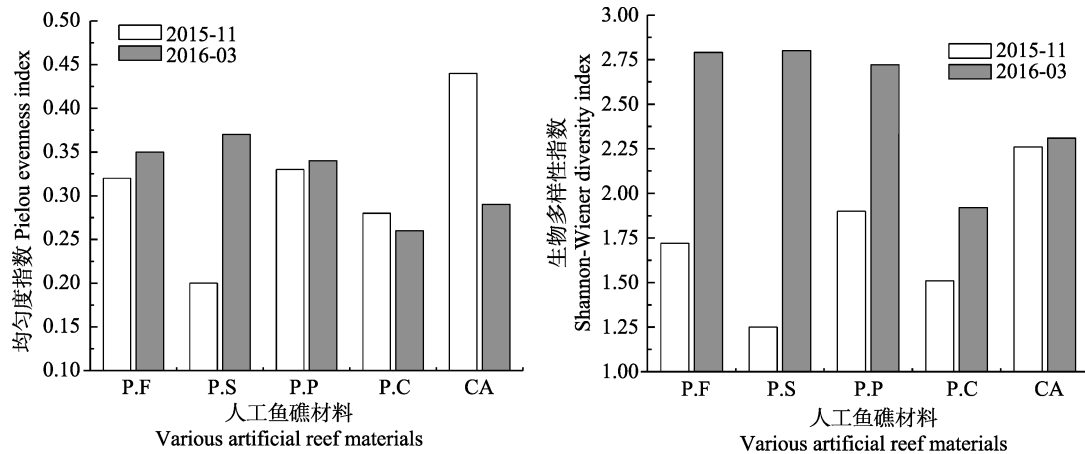


图 4 人工鱼礁上附着生物 Shannon-Wiener 多样性指数和 Pielou 均匀度指数

Fig.4 Shannon-Wiener biodiversity index and Pielou evenness index of fouling organisms on artificial reefs

2.3 附着生物优势种及优势度

2015 年 11 月, CA、P.S 两组分别有 6 个优势种, P.P 组有 5 个, P.F 组有 4 个, P.C 组有 3 个。东方小藤壶(*Chthamalus challenger*)在 P.C 组占绝对优势, 优势度为 0.48。钩虾(*Gammarus sp.*)在 P.F、P.P、P.S、CA 四组中占绝对优势, 优势度分别为 0.46、0.28、0.66、0.37。2016 年 3 月, P.F 及 P.P 两组优势种分别为 9 个, CA 及 P.S 两组分别有 8 个优势种, P.C 组有 5 个。孔石莼(*Ulva lactuca L.*)在各组中均占绝对优势, 小肌蛤为 5 种共有的优势种。

3 讨论

附着生物生长受温度、盐度、光照、潮汐、海浪

这些环境因子的影响(Su *et al.*, 2009; 唐贵明, 2008¹⁾; 陈翔峰等, 2011), 2 次采样时间间隔为 4 个月, 附着生物的生物量、种类、群落结构及优势种都存在差异。2015 年 11 月, 由于水温较低、投放时间短, 附着生物量和种类总数均较少。2016 年 3 月, 附着平均生物量和生物种类增加, 约为第 1 次的 2 倍左右, 生物种类数由第 1 次的 13 种增加到第 2 次的 27 种。优势种也发生了变化, 5 种不同水泥类型的混凝土礁体优势种由钩虾和东方小藤壶均变为孔石莼。Shannon-Wiener 多样性指数和 Pielou 均匀度指数是 2 种表征群落稳定性的指标。一般来说, 一个群落的多样性指数和均匀度指数越高, 则预示着该群落所属的生态系统越稳定和成熟(孙军等, 2004)。Shannon-Wiener 多样性指数 (H')也有所升高, 第 1 次取样平均为 1.73, 第 2 次平

1) Tang GM. Study on biodiversity of macrobenthos in the rocky intertidal zone of Qingdao. Master's Thesis of Ocean University of China, 2008, 30-36 [唐贵明. 青岛岩相潮间带大型底栖生物生物多样性调查研究. 中国海洋大学硕士研究生学位论文, 2008, 30-36]

均为 2.51。Pielou 均匀度指数(J)两次取样变化较小, 各组平均值由 0.31 变为 0.32。生物群落更加成熟和稳定。

钢筋混凝土人工鱼礁对海洋生物的诱集效果明显高于油井类、舰船类等人工鱼礁(江艳娥等, 2013)。张伟等(2010)对大亚湾杨梅坑人工鱼礁区的混凝土鱼礁和铁制鱼礁上的附着生物进行了调查, 发现混凝土礁体比铁制礁体上附着生物生物量高, 说明混凝土人工鱼礁具有较好的生物附着效果。本研究中, 5 种不同水泥类型的人工鱼礁中, P.F、CA 两组生物附着种类最多, CA、P.P、P.F 三组生物量较多, P.F、P.S、P.P 三组生物群落较为稳定, 而 P.C 组生物种类及生物量最少, Shannon-Wiener 多样性指数和 Pielou 均匀度指数均最低。由此可知, 铝酸盐水泥(CA)及粉煤灰硅酸盐水泥(P.F)制成的人工鱼礁生物附着效果好。最常用的复合硅酸盐水泥(P.C)人工鱼礁生物附着效果相对较差。

从成本上看, 铝酸盐水泥(CA)的成本约为普通水泥的 2-4 倍, 主要用于紧急军事工程、修桥、筑路以及抢修(堵漏)等工程中, 作为人工鱼礁材料的性价比不高。火山灰质硅酸盐水泥(P.P)目前使用比较少, 生物附着效果不突出, 也不建议使用。最为常用的复合硅酸盐水泥(P.C)成本比粉煤灰硅酸盐水泥(P.F)及矿渣硅酸盐水泥(P.S)高, 其生物附着总量最少, 生态效益相对较差。而粉煤灰硅酸盐水泥(P.F)不仅成本低, 而且生物附着效果较好, 经济效益和生态效益均占优势。Kress 等(2002)研究发现, 在含 40%-60%粉煤灰的礁体上, 藻类附着效果要显著好于纯混凝土和纯粉煤灰礁体。粉煤灰和碱渣制作的人工鱼礁具有较高抗压强度、无污染、造价低及结构稳固等优点(刘秀民等, 2014; 覃维祖, 2006)。综上所述, 粉煤灰硅酸盐水泥制作的人工鱼礁不仅可以利用工业残余矿渣, 减少工业废渣对环境污染的压力, 同时可以作为人工鱼礁材料, 生物附着效果较好, 具有较高的生态效益。

参 考 文 献

- Alongi DM, Trott LA, Pfitzner J. Biogeochemistry of inter-reef sediments on the northern and central Great Barrier Reef. *Coral Reefs*, 2008, 27(2): 407-420
- Baine M. Artificial reefs: A review of their design, application, management and performance. *Ocean and Coastal Management*, 2001, 44(3): 241-259
- Chen XF, Hou J, Mu ZJ, *et al.* Study on the adhesion and variety of marine fouling organisms. *Development and Application of Materials*, 2011, 26(1): 24-28 [陈翔峰, 侯健, 穆振军, 等. 海洋污损生物变化及附着规律研究. 材料开发与应
- 用, 2011, 26(1): 24-28]
- Chen Y, Tian Tao, Zhao ZY, *et al.* The feasibility of congealing stone materials used as artificial reef—the species composition and biomass of organisms attached to the tested modules. *Journal of Dalian Ocean University*, 2012, 27(4): 344-349 [陈勇, 田涛, 赵子仪, 等. 凝石胶凝材料作为人工鱼礁材料的可行性研究 II. 大连海洋大学学报, 2012, 27(4): 344-349]
- Falace A, Bressan G. Evaluation of the influence of inclination of substrate panels on seasonal changes in a macrophytobenthic community. *ICES Journal of Marine Science*, 2002, 59(5): 116-121
- Falcao M, Santos MN, Vicente M, *et al.* Biogeochemical processes and nutrient cycling within an artificial reef off Southern Portugal. *Marine Environmental Research*, 2007, 63(5): 429-440
- Henderson MJ, Fabrizio MC, Lucy JA. Movement patterns of summer flounder near an artificial reef: Effects of fish size and environmental cues. *Fisheries Research*, 2014, 153(5): 1-8
- Howe JC. Artificial reef evaluation with application to natural marine habitats: William Seaman Jr. (Ed.); CRC Press, New York, NY, 2000. *Fisheries Research*, 2003, 63(2): 297-298
- Huang ZR, Liang XY, Zeng J. Preliminary study on effects of accrete organisms of artificial reef material. *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. 南方水产, 2006, 2(1): 34-38]
- Jiang YE, Chen PM, Lin ZJ, *et al.* Comparison of effectiveness of various artificial reef materials for fish attraction. *Journal of Applied Oceanography*, 2013, 32(3): 418-424 [江艳娥, 陈丕茂, 林昭进, 等. 不同材料人工鱼礁生物诱集效果的比较. 应用海洋学学报, 2013, 32(3): 418-424]
- Kress N, Tom M, Spanier E. The use of coal fly ash in concrete for marine artificial reefs in the southeastern Mediterranean: compressive strength, sessile biota, and chemical composition. *ICES Journal of Marine Science*, 2002, 59(5): 231-237
- Li J, Gong PH, Guan CT, *et al.* Carbon sequestration of additives of artificial reefs and its effect on carbon fixation of *Ostrea Plicatula*. *Progress in Fishery Sciences*, 2016, 37(6): 100-104 [李娇, 公丕海, 关长涛, 等. 人工鱼礁材料添加物碳封存能力及其对褶牡蛎(*Ostrea plicatula*)固碳量的影响. 渔业科学进展, 2016, 37(6): 100-104]
- Lin J, Zhang SY. Research advances on physical stability and ecological effects of artificial reef. *Marine Fishery*, 2006, 28(3): 257-262 [林军, 章守宇. 人工鱼礁物理稳定性及其生态效应的研究进展. 海洋渔业, 2006, 28(3): 257-262]
- Liu TY. Bait effect of artificial reefs. *Jiangxi Fishery Sciences and Technology*, 2003(4): 37-38 [刘同渝. 人工鱼礁的饵料效应(一). 江西水产科技, 2003(4): 37-38]
- Liu XM, Zhang HH, Luo MW. Research on building of artificial fish-reef by using fly ash and alkaline dregs. *Journal of Building Materials*, 2007, 10(5): 622-626 [刘秀民, 张怀慧, 罗迈威. 利用粉煤灰和碱渣制作人工鱼礁的研究. 建筑

- 材料学报, 2007, 10(5): 622–626]
- Manoudis, Antoniadou C, Dounas C, *et al.* Successional stages of experimental artificial reefs deployed in Vistonikos Gulf (North Aegean Sea, Greece): Preliminary results. *Belgian Journal of Zoology*, 2005, 135(2): 209–215
- Su ZX, Xiao H, Huang LM. Effect of fouling in Daya Bay *Scallop chlamysnobilis* (reeve) cultivation: Food competition and nutrient release. *Marine Science Bulletin*, 2009, 11(2): 37–44
- Sun J, Liu DY. The application of diversity indices in marine phytoplankton studies. *Acta Oceanologica Sinica*, 2004, 26(1): 62–75 [孙军, 刘东艳. 多样性指数在海洋浮游植物研究中的应用. *海洋学报*, 2004, 26(1): 62–75]
- Tan WZ. The application of fly ash in concrete. *Fly Ash Comprehensive Utilization*, 2006, 14(2): 1–7 [覃维祖. 粉煤灰在混凝土中的应用技术. *粉煤灰综合利用*, 2006, 14(2): 1–7]
- Walker BK, Henderson B, Spieler RE. Fish assemblages associated with artificial reefs of concrete aggregates or quarry stone offshore Miami Beach, Florida. *Aquatic Living Resources*, 2002, 15(2): 95–105
- Wilding TA, Sayer MDJ. Evaluating artificial reef performance: Approaches to pre- and post-deployment research. *ICES Journal of Marine Science*, 2002, 59(5): 222–230
- Zhang W, Li CH, Jia XP, *et al.* Ecological characteristics of fouling organisms on concrete and steel of in Daya Bay. *Marine Environmental Science*, 2010, 29(4): 509–512 [张伟, 李纯厚, 贾晓平, 等. 大亚湾混凝土鱼礁和铁制鱼礁附着生物生态特征. *海洋环境科学*, 2010, 29(4): 509–512]
- Zhou YB, Cai WG, Chen HG, *et al.* The mechanism and research progress on fish attraction technique for artificial reef. *Marine Fishery*, 2010, 32(2): 225–230 [周艳波, 蔡文贵, 陈海刚, 等. 人工鱼礁生态诱集技术的机理及研究进展. *海洋渔业*, 2010, 32(2): 225–230]

(编辑 冯小花)

Study on the Organisms Attachment of Artificial Reefs Constructed with Five Different Cements

LI Zhenzhen^{1,2}, GONG Pihai², GUAN Changtao², LI Jiao^{2①}, WANG Tengting^{1,2}

(1. College of Marine Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306; 2. Key Laboratory of Sustainable Development of Marine Fisheries, Ministry of Agriculture, Qingdao Key Laboratory for Marine Fish Breeding and Biotechnology, Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071)

Abstract In order to study organism attachment on artificial reefs made of different cements, we hanged the artificial reefs constructed with five different cements including Composite Portland cement (P.C), slag Portland cement (P.S), pozzolana Portland cement (P.P), fly ash Portland cement (P.F) and aluminate cement (CA). The artificial reefs were exposed to the marine environment near the Xuejia Island in September 2015. In November 2015, we collected the first water samples to analyze different reef materials on organism attachment. We found that the biomass of fouling organisms on different artificial reefs followed the order P.P > P.S > CA > P.F > P.C, and the values were 888.29 g/m², 755.43 g/m², 752.07 g/m², 620.11 g/m² and 402.01 g/m² respectively. The number of organism species on P.S was 7, and it was 5 on P.F, P.P and CA. We collected the second samples in March 2016 and found that CA still had the largest biomass that was 1956.94 g/m², followed by P.P, P.F, P.C and P.S on which the biomass was 1601.44 g/m², 1453.06 g/m², 1254.63 g/m² and 1072.43 g/m² respectively. The number of species on P.F, CA, P.S, P.P and P.C was 17, 15, 12, 11 and 8. In the first sampling, the Pielou evenness index (*J*) followed the order CA > P.P > P.F > P.C > P.S; in the second sampling, the order was P.S > P.F > P.P > CA > P.C. In the first sampling, the Shannon-Wiener diversity index (*H'*) of fouling organisms followed the order CA > P.P > P.F > P.C > P.S; in the second sampling, the order was P.S > P.F > P.P > CA > P.C. Our study showed that the aluminate cement and fly ash cement artificial reefs were most suitable for organism attachment, whereas the composite Portland cement had poor biological adhesion capability.

Key words Different types of cement; Concrete artificial reef; Attaching organisms

① Corresponding author: LI Jiao, E-mail: lijiao@ysfri.ac.cn