

## 人工藻礁设计与投放的研究进展

# Advances in studies on the design and setting of artificial alga reef

于沛民<sup>1</sup>, 张秀梅<sup>1</sup>, 张沛东<sup>1</sup>, 田 涛<sup>1</sup>, 王云中<sup>2</sup>

(1. 中国海洋大学 鱼类行为实验室, 山东 青岛 266003; 2. 山东省海洋捕捞生产管理站, 山东 烟台 264001)

中图分类号: S953.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2007)05-0080-05

人工藻礁就是人为设置在水域中,为海洋藻类提供生长繁殖场所,从而吸引鱼虾贝类等水生动物到藻场来索饵繁育,以达到优化海底环境,保护、增殖渔业资源和提高渔获物质量为目的的构造物,是一种恢复海底植被的重要手段,受到许多国家的重视。目前,在人工礁设计以及投放方面,许多国家做了大量研究<sup>[1]</sup>,效果显著。例如,地中海 Posidonia 海区 50~60 m 的浅水区曾是一个茂密的藻场,是许多海洋生物的重要栖息地,也是许多重要经济鱼类幼鱼的培育场。可以说此处的海藻具有生态和经济的双重价值。但 20 世纪 80 年代后期底拖网破坏了这一地区的藻场,致使藻场退化,经济鱼类消失。直到 90 年代后期,沿岸国家意识到这一问题,向海中投放了人工礁体,才使海底的生态系统有所改善。这些水下构造物不但限制了底拖网作业,而且增加了海底硬地质的面积,为大型藻类提供了附着基,也为一些习惯于岩礁性生活的鱼类提供了栖息的场地。大量调查表明,西班牙的东南海岸,在使用人工礁体之前,海底植被被严重地破坏。在一些地区多达 48% 的海底藻床被破坏,平均每平方米只有 10 株藻类幼体,通过放置人工礁体,经过 6 a 的恢复,海底藻场明显改善,每平方米的藻类幼体达到 60 株。近年来,许多学者利用不同材料设计了不同式样的礁体投放到海中,从生物种类,丰富度和生物量等方面观察和统计分析了礁体投放后,其上藻类的附着,底栖动物的聚集,礁体周围群落的演替<sup>[2]</sup>。作者主要介绍了藻礁的制造材料,礁体的设计以及礁体的投放等方面的近期研究进展。

## 1 藻礁的设计

人工藻礁礁体的设计在人工藻礁的建设和投放中是重要而复杂的一项工作,涉及材料学、工程学、建筑学、水化学以及海洋藻类学等多个学科,其中礁体的材料和形状等因素在人工藻礁礁体的设计中是必须首先考虑的。

### 1.1 藻礁材料

传统的人工藻礁的建礁材料有石材、木材、钢材、混凝土等,目前这些材料仍被大量使用。但考虑到环保的因素,例如天然石材的提取在一定程度上是对陆地自然环境的破坏,混凝土则涉及到石灰石等矿物资源的消费,而木材的大量应用则破坏了陆上的植被<sup>[3]</sup>。在近年的人工藻礁建设中,用废弃物作为礁体的材料,逐渐成为一个趋势。

#### 1.1.1 混凝土

至今世界上建造礁体使用最多的材料是混凝土。2001 年有学者曾经对世界 309 处人工礁体进行了调查,混凝土礁体占 79 处,为总数的 25% 以上。这种材料本身不会影响自然环境,即使达到 30 a 使用寿命后,残余物留下来也可变为自然礁<sup>[4]</sup>。

收稿日期: 2006-03-06; 修回日期: 2007-03-02

基金项目: 山东省科技发展计划项目(2004GG2205110)

作者简介: 于沛民(1981-),男,山东烟台人,硕士,研究方向为人工藻礁, E-mail: woshiwoyupm@163.com; 张秀梅,通讯作者,电话: 0532-82032076, E-mail: gaozhang@ouc.edu.cn



混凝土礁占的体积大,密度较大,且可改变流向与海浪作用,又因为各地可根据各自海域的需要,建造不同高矮和质量的礁,所以混凝土礁比例目前占多数,高度为 2~10 m,其海底承压强度为 210~400 g/cm<sup>2</sup>。另外,混凝土通常和其他的材料一起使用,如报废的船舶,石头,旧轮胎和塑料<sup>[5]</sup>。有研究者实验设计了直径为 30~45 cm 的 6 个混凝土管子堆积成小型的金字塔结构,用不锈钢管和聚丙烯绳捆绑固定来作为人工藻礁。这些管子中间包括很多的洞,既保持水流顺畅,有利于周围生物群落的营养物质循环,还可以增加礁体的表面积,以此来提高藻类的附着量。

尽管混凝土材料造价便宜,强度高,利用率很高,但有碱性物质从其表面溢出,这对海洋硅藻类和大型藻类以及鱼类和贝类有害。为了改进这一情况,在礁体的表面涂抹一层硫酸亚铁或者其他亚铁离子的酸性氧化物,这些氧化物可以渗入礁体内部来中和其中的碱性。由于藻类和鱼贝等动物也喜欢亚铁的氧化物所创造出来的酸性环境,易于在这样的礁体上附着和在其周围聚集<sup>[6]</sup>。

另外可以在制作混凝土的过程中冲入 CO<sub>2</sub> 或者加入碳酸盐,就可以使制作出来的混凝土达到中性。分别用中性和碱性混凝土作藻类的附着基,比较发现,藻类更多地附着于 pH 中性的混凝土上。将混凝土中加入二氧化硅例如火山灰,熔炉煤渣,粉煤灰等,都可以中和混凝土中的碱性成分,使之 pH 显示中性。

#### 1.1.2 钢铁

钢铁礁建造容易,有很强的硬度,容易附着大型海藻,吸引鱼群,适于建造高、轻的礁型。日本常用 SS400 的各种型钢(管材,工字钢等),并在易腐蚀部位加厚处理。因为近海底处氧气稀少,腐蚀速度较慢,测算年度腐蚀速度 0.2 mm,根据礁体使用寿命 30 a 推算,大于 50 m 水深处建礁钢铁厚度 2.6 mm,小于 50 m 水深的建礁钢铁厚度 3.6 mm<sup>[7]</sup>。

出于废物利用和环保的角度考虑,世界很多国家都在考虑用废弃物制作人工礁体,改善海底环境。

#### 1.1.3 粉煤灰

从煤燃烧后的烟气中收集下来的细灰称为粉煤灰。粉煤灰是燃煤电厂排出的主要固体废物,是中国当前排量较大的工业废渣之一。世界上每年排放 4 亿 t。现阶段中国年排放量已达 3 000 万 t<sup>[8]</sup>。随着电力工业的发展,燃煤电厂的粉煤灰排放量逐年增加。大量的

粉煤灰不加处理,就会产生扬尘,污染大气;若排入江河中会造成河流淤塞,而其中的有毒化学物质还会对人体和生物造成危害。因此粉煤灰的处理和利用问题引起人们广泛的注意。

国外研究人员从 20 世纪 80 年代就开始了一系列利用火力发电站的粉煤灰制作人工礁体的可行性研究。在实验室中,人们利用粉煤灰、石灰、混凝土和工业废弃物所制成的多种混合物进行了实验<sup>[9]</sup>。美国学者观测发现,在 2.5 a 的时间里,从物种的丰富度来讲,煤灰礁体和混凝土礁体上生长的藻类和聚集的底栖生物没有显著差异。但是需要进一步的实验来检验是否有污染物,如 Cu, V, Ni, Zn 等重金属从粉煤灰制成的礁体中溶出。也有研究证明煤灰和混凝土的混合物做成的礁体对海洋环境没有副作用,可以用煤灰制作人工礁体来代替传统的混凝土礁体。但很多研究者还是担心其会对天然海域造成环境威胁,例如 1991 年,土耳其农业部禁止用废弃物来建设人工礁体,只有混凝土, PVC 和钢铁可以使用<sup>[10]</sup>。

#### 1.1.4 硫磺固化体

从保护地球环境角度出发,人们对石油产品中含硫量的标准愈加严格。从石油中分离出来的硫的后处理是一个新的课题<sup>[11]</sup>。日本研究人员在 150 °C 下硫化硫磺、炼钢炉渣和粉煤灰,经造型处理,冷却制成硫磺固化体,用来做人工礁体。实验结果表明,由于硫磺是海水中存在的物质,为中性,因而硫磺固化体比起碱性的混凝土来讲,更容易让藻类附着。

#### 1.1.5 贝壳

随着牡蛎、马氏朱母贝、扇贝等贝类养殖技术的提高,养殖贝类的贝壳大量产生,加上捕捞的栉孔扇贝、虾夷扇贝等天然贝类的贝壳,全球贝壳的产出量很高,仅日本年产量估计在 100 万 m<sup>3</sup> 以上。这些贝壳一部分被作为工业材料、水质改良及土质改良材料等加以利用,而极大部分则作为一般废弃物埋掉或废置。不仅要花费高额的处理费用,而且在处理的过程中会发出恶臭,影响环境。因此,为了有效利用贝壳,改善沿岸环境,日本学者把贝壳(占 60% 以上)、硫磺和砂石(用来调节比重)在高温下进行融化,后冷却造型,制成贝壳礁。实验证实,藻类的附着效果不亚于天然的礁石<sup>[12]</sup>。

#### 1.1.6 人工合成材料

EPOC 是日本研究的一种新型的人工合成材料,具有溶透性。将其涂抹在人工礁体的表面,可以让礁



体中人工添加的无机肥料(磷肥和氮肥)通过材料溶出,为附着在礁体表面的藻类提供营养。纤维玻璃加强塑料和PVC材料在人工礁体的建设上也有所应用,但都存在稳定性的问题,在风浪中容易被破坏,这些构造物要起作用,则依靠于它们的工程学设计。

## 1.2 藻礁形状

20世纪70年代前人工藻礁的建设是粗放式的,即直接向海中投放废旧船只,石块作为近海藻类的附着基。近年来人造藻礁的设计逐渐向精细化、集约化方向发展,其设计有几个趋势:表面凹凸,表面和内部多孔结构,礁体内部材料添加肥料和藻类生长所需营养物质。目的是让藻类易于在其表面附着,附着后可以健康迅速生长。

### 1.2.1 礁体的表面设计为凹凸粗糙面

为了观察藻礁体表面的凹凸粗糙程度对藻类附着的影响,Seaman<sup>[13]</sup>用石材作为人工礁体进行实验,将石材表面加工处理,制造不同的粗糙面,分为凹凸区,平滑区。放入海底经过10个月的附着生长后观察测量,结果如下:凹凸区植被密度为80%,平滑区则不到10%。可见凹凸粗糙的表面比光滑的表面更加利于藻类的附着。

有学者进行了更加深入的探索,研究了礁体的凹面和凸面对藻类附着的影响,结果发现凸部附着的藻类比凹部要多,分析认为,凸部流速大,不利于浮泥等杂物的堆积,海藻的生长不会受到阻碍;凸部上聚集的藻食性动物少,因而对海藻的危害少,海藻的生长就好一些;海藻的根部在凸部有足够的空间伸张,因而附着力大,海浪难以将其剥离,利于附着,故凸部附着的藻类比凹部要多<sup>[13]</sup>。

### 1.2.2 礁体的表面和内部设计为多孔质结构

研究发现,礁体的内部和表面有连续的空隙,氧气和水可以自由地通过,这样有利于礁体表面附着藻类根部的水流循环,如果在礁体内部加入藻类生长所必需的营养物质,那么根部将有机会吸收更多的营养物质。这样也有利于形成一个微生物和小型水生

物所组成的小生态群落,也更加有利于礁体表面附着藻类的生长<sup>[13, 14]</sup>。

### 1.2.3 礁体内添加营养物质

在藻礁的制礁材料中添加营养盐,营养盐经过长期的渗透,可以渗透到藻礁的表面。在这种藻礁的周围,藻类生长茂盛,海胆、鲍鱼的增殖效果显著<sup>[14]</sup>。

经实验证明,礁体表面和内部设计为多孔质结构、礁体表面制作的凹凸粗糙以及礁体内添加营养物质,将显著提高人工藻礁的功效,有利于礁体表面藻类的附着和生长。因此,目前许多新型人工藻礁在设计上都普遍具有以上三个特点,其优势在于<sup>[14]</sup>:(1)多孔质的结构能保证海藻生长必要的营养盐慢慢地渗透出来,有利于海藻初期的生长。(2)表面适度的凹凸不平,有利于海藻的附着生长。(3)如果在放礁区有植食动物存在,凹凸不平的表面有利于提高附着藻类叶片初期的存活率。因为有很大比例的藻类将在礁体表面的沟内生长,从而限制了植食动物的取食。

(4)表面水沟状凹面也适合海胆和鲍鱼等底栖动物的生活。

### 1.2.4 护岸藻礁

许多国家沿岸堤坝设施的水下部分都设计带有藻礁的功能,投入使用后,沿岸的藻类群落明显增多,海底森林茂盛,聚居的经济鱼类、贝类在种类和数量上都有所提高。例如,日本关西港护岸藻礁如图1所示分为A, B, C三种类型;C型中又设计了三个类型。A型,应用在倾斜的石头护岸部分,高度在50cm以下,这样重心低,可以在倾斜的斜面上固定。B型,应用在波浪小,海流小的护岸的水平部分,这种礁体比A型略高。C型,应用在波浪大,海流大的海区。此型礁体是实心的,重量很大,用于抵挡风浪。C型又分三种类型:C1, C2, C3。C1型上有贯穿的横洞,为喜欢钻洞的鱼类和贝类设计。C2型上有贯穿的纵洞。C3型的底盘侧面有供龙虾栖息的洞穴,顶部是阶梯形状的,便于藻类孢子和鱼、虾、贝类苗种的停留<sup>[15]</sup>。

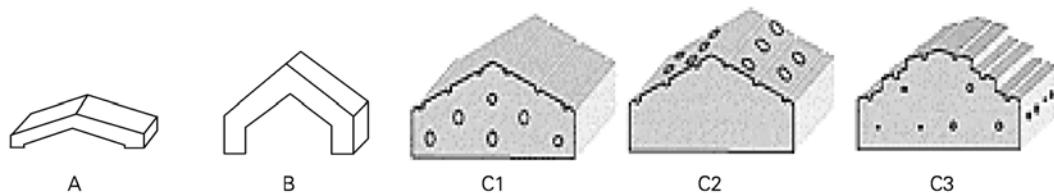


图1 日本关西港的护岸藻礁<sup>[15]</sup>



## 2 藻礁的投放

藻礁的投放是关系到藻场造成是否成功的重要环节。在投放前后过程中,藻场位置的选择、投放的前期准备、投放后的管理工作以及对其投放效果的评价是必须考虑的。

大型藻类是水域底部植被的重要组成部分,研究人员调查发现,影响大型藻类生长分布的诸因素中,生长基质是决定因素,例如大叶藻主要生长在软质沙底上<sup>[16]</sup>,马尾藻主要分布在基岩、花岗岩、流纹岩等坚硬的底质上。其次是海域的物理环境(包括波浪和海流等因素)也将影响海域的海草覆盖率以及海草覆盖的形式。

### 2.1 藻场位置的选择

藻场的位置是关系藻场能否建设成功的关键因素。一片海区是否可以用于建设人工藻场,需要对以下几方面的因素展开调查:物理因素(波浪、潮流、光照、水温、淤泥堆积、海水的温度、降雨),化学因素(溶解氧、盐度、营养盐、pH、有害物质、CO<sub>2</sub>的溶解量、污染物),生物因素(食草动物的危害,不同生物对附着基的竞争附着,杂藻的竞争附着)<sup>[17]</sup>。

### 2.2 投放的前期准备

主要包括海藻种类的选定和附着礁体的选择两个方面。海藻种类的选择主要从海区的物理化学因素考虑,例如海区的光照强度、水温、盐度以及海水中营养盐类是否适合增殖藻类的生长。选定藻类后,就需要进行藻类苗种的移植,这样在藻场的周围应该建有苗种的供应场所<sup>[18]</sup>。礁体的设计主要考虑海区的条件。例如,设置藻礁形状时,应该考虑海域波浪条件、海流条件以及海区的底质条件。设计礁体的高度时应该考虑海底沙面的垂直变动范围。为使增殖藻类附着的牢固,礁体的表面要设计适当大小的突起<sup>[18]</sup>。

### 2.3 投放后的管理工作

在藻场造成过程中需要不间断的监测和管理,主要工作包括防止草食动物对增殖藻类的摄食,及时清除附着基上的杂藻。有研究者开展了海胆对藻类摄食的实验,在海底放置四座金字塔结构的礁体,其中两座表面用塑料网(65 mm×45 mm 网眼)覆盖。在 1.5 a 的时间里,季节性采集礁体上的藻类进行检验。结果表明,礁体上附着的植物种类无显著差异,而植物生物量差异明显,被塑料网保护的礁体上生物量显著高于其他礁体。由此看来,在礁体上设置保护网,

确实可以减少海胆引起的捕食压力<sup>[19]</sup>。

### 2.4 投放效果的评价

藻场造成后需要对藻场内的海藻和动物的种类及数量有所把握,对造成效果进行评价。藻场造成评价的指标包括:移植苗种的成活率、生长长度、生长密度、成熟状况。观察时用目测,辅助以水下监测系统。如果监测指标良好,而且移植的藻体开始供给孢子,且孢子萌发产生新的藻体,则说明人工藻场建设成功<sup>[20]</sup>。

## 3 展望

目前,中国近岸水域和许多内陆大型湖泊由于人为的原因,底部植被被严重破坏,并由此导致一系列的生态危机。例如,山东荣成天鹅湖入海口建坝围养海参,致使水交换断绝,湖中大叶藻大批死亡,依赖大叶藻生存的海参也随之大幅减产,给天鹅湖的生态结构造成巨大的破坏,后经炸坝疏通,又使天鹅湖的生态环境逐步恢复<sup>[21]</sup>。再如广东省沿海岸域的马尾藻,曾是广东省重要的经济海藻,通常被用作饲料、藻胶和医药工业的原料,但由于近年过度的采摘,海水富营养化和赤潮频繁发生,导致马尾藻资源逐渐减少。

藻场中生长的大型藻类可以充分吸收海水中过量营养盐,为植食动物提供食物,植食动物又吸引更高一级的消费者前来觅食。这样,就会在藻场周围形成丰富的动物种群,复杂稳定的食物网和生态系统。因此,在中国近岸水域有计划有目的地开展人工藻场的建设,对于解决海水富营养化,防止赤潮频发,恢复受损的海底生态系统都有十分重要的意义。

利用人工藻礁来形成人工藻场,是各国普遍采用而且行之有效的海底资源恢复方式。可以按照以下步骤和思路来进行:(1)从自然气候、海底地貌、水质条件、生物资源等方面综合调查评估,来选择可以作为人工藻场的水域。(2)针对此处水域中将要增殖的藻类自身特点,设计不同材料和形状的藻礁,以达到藻类附着率高,附着后生长好的目的。(3)根据此处水域的具体情况来确定建设此处藻场将要采用的增殖方式。目前普遍采用的有两种方法:第一,人工藻礁直接投放到该处水域,为藻类提供附着基,利用天然的资源来进行藻类增殖形成藻场;第二,人为地往藻礁上附着藻类孢子或者移植藻类幼体后,再将藻礁投放到该处水域,来形成藻场。(4)投放前,调查海

底情况,规划藻礁的投放规模,海底布局,然后按照规划投放。(5)投放后,采用水下探测,潜水调查等多种方法,进行管理维护和数据统计,例如清除藻类敌害生物,清除藻礁上杂藻,定期记录藻场内的海藻和动物的种类及数量。如果投放藻礁后,此处水域的藻类密度显著上升,海底荒漠化的面积显著缩小,证明此处人工藻场建设成功。

参考文献:

- [1] Bombace G, Fabi G, Fiorentini S. Analysis of the efficacy of artificial reefs located in five different areas of the Adriatic Sea [J]. **Bull Mar Sci**, 1994, **55**(2-3): 559-580.
- [2] Jensen A C. Artificial reefs of Europe: perspective and future [J]. **ICES Journal of Marine Science**, 2002, **59**(Supplement 1): 3-13.
- [3] Omar R M N R, Kean C E. Design and construction of artificial reefs in Malaysia [J]. **Bull Mar Sci**, 1994, **55**(2-3), 1 050-1 061.
- [4] Meier M H, Eskridge J B. Made in Virginia – the past, present and potential future of Virginia’s artificial reef program [J]. **Bull Mar Sci**, 1994, **55**(2-3): 1 463.
- [5] Blancher E C, Jones B G, Greene R E. Reef structure and reef function: engineering and materials considerations for artificial reef design [J]. **Bull Mar Sci**, 1994, **55**(2-3): 1 329.
- [6] Guilbeau B P, Harry F P, Gambrell R P, *et al.* Algae attachment on carbonated cements in fresh and brackish waters-preliminary results [J]. **Ecological Engineering**, 2003, **20**(4): 309-319.
- [7] Gregg K L. Comparisons of three manufactured artificial reef units in Onslow Bay, North Carolina [J]. **North American Journal of Fisheries Management**, 1995, **15**(3): 316-324.
- [8] 邵靖邦. 国外煤灰利用现状及发展趋势[J]. **中国煤炭**, 1996, **22**(8): 62-70.
- [9] 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 [J]. **ICES Journal of Marine Science**, 2002, **59**(Supplement): 231-237.
- [10] Collins K J, Jensen A C. Stabilized coal ash artificial reef studies[J]. **Fuel and Energy Abstracts**, 1996, **37**(3): 168-188.
- [11] 张义玲, 达建文. 硫磺回收现状及发展前景 [J]. **硫酸工业**, 2005, 4: 18-20.
- [12] Svane I b, Jens K P. On the problems of epibioses, fouling and artificial reefs, a review [J]. **Marine Ecology**, 2001, **22**(3): 169-178.
- [13] Seaman W. Does the level of design influence success of an artificial reef [A]. Jensen A C. **European Artificial Reef Research [C]**. Southampton(U K): Southampton Oceanography Centre Publ Inc, 1997. 359-376.
- [14] Shaw M, Kerry B. A multipurpose, artificial reef at Mount Maunganui Beach, New Zealand [J]. **Coastal Management**, 1999, **27**(4): 355 - 365.
- [15] Doty D C. Design of juvenile rockfish recruitment habitat on artificial reefs in Puget Sound [J]. **Bull Mar Sci**, 1994, **55**(2-3): 1 333-1 339.
- [16] Mary H, Estimation of genetic neighborhood parameters from pollen and seed dispersal in the marine angiosperm *Zostera marina* L. [J]. **Evolution**, 1996, **50**(2), 856-864.
- [17] Mcneill S E. The selection and design of marine protected areas: Australia as a case study [J]. **Biodiversity and Conservation**, 1994, **3**(7): 586-605.
- [18] Clark S, Edwards A J. An evaluation of artificial reef structures as tools for marine habitat rehabilitation in the Maldives [J]. **Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems**, 1999, **9**(1): 5-21.
- [19] Edwards R A, Smith S D A. Subtidal assemblages associated with a geotextile reef in south-east Queensland, Australia [J]. **Marine & Freshwater Research**, 2005, **56**(2): 133-142.
- [20] Whitmarsh D. Cost-benefit analysis of artificial reefs [A]. Jensen A C. **European Artificial Reef Research [C]**. Southampton(U K): Southampton Oceanography Centre Publ Inc, 1997. 175-193.
- [21] 叶春江, 赵可夫. 移植大叶藻研究进展及其对海洋沉水生活的适应[J]. **植物学通报**, 2002, **19**(2): 184-193.

(本文编辑: 刘珊珊)