

· 综述 ·

人工鱼礁礁体设计的研究进展

陶峰^{1,2}, 贾晓平¹, 陈丕茂¹, 唐振朝¹, 余景¹, 王宏^{1,2}

(1. 中国水产科学研究院南海水产研究所, 农业部渔业生态环境重点开放实验室, 广东广州 510300;

2. 上海水产大学海洋学院, 上海 200090)

摘要: 从水动力学、生物学和材料学等角度介绍了人工鱼礁礁体设计的研究进展, 探讨了水动力学与礁体设计间的相互作用, 并从构筑材料、水动力学、生物因素和配置等方面对人工鱼礁礁体设计研究进行了简要归纳, 以期为中国南海区人工鱼礁事业提供参考。

关键词: 人工鱼礁; 礁体设计; 构筑材料; 结构设计

中图分类号: S953.1

文献标识码: A

文章编号: 1673-2227-(2008)03-0064-06

Advance in the research on artificial reef design

TAO Feng^{1,2}, JIA Xiaoping¹, CHEN Pimao¹, TANG Zhenzhao¹, YU Jing¹, WANG Hong^{1,2}

(1. *South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Science, Key Laboratory of Fishery*

Ecology Environment, Ministry of Agriculture, Guangzhou 510300, China; 2. *College of Marine*

Science and Technology, Shanghai Fishery University, Shanghai 200090, China)

Abstract: In this paper, researches on artificial reef design were previewed in terms of hydrodynamics, biology and materials science. The interaction of hydrodynamics and design of artificial reef was discussed as well. Researches on materials science, hydrodynamics force, biological factors and reef deployment were summarized, in order to provide an excellent artificial reef model for construction of artificial reefs (ARs) in South China Sea area.

Key words: artificial reef; reef design; materials; structure design

人工鱼礁是人为设置在海中的构造物, 可为鱼类等水生生物营造适宜的栖息、生长、繁育场所。20世纪50年代以来, 人工鱼礁建设在国外取得了长足发展。通过建设人工鱼礁渔场, 能改善和修复海洋生态环境、增殖和养护渔业资源、提高水产品质量, 这已被发达国家的建设实践所证实^[1-2]。

日本的人工鱼礁建设已形成标准化、规模化、制度化体制, 现有1 000多种不同形状的鱼礁, 并且还在不断开发

新型鱼礁。美国的人工鱼礁已明显向游钓渔业转化^[2]。中国在20世纪70年代末期和80年代初期, 进行了人工鱼礁的研究与投放试验。21世纪初, 广东省等沿海各省市才陆续开始了大规模的人工鱼礁建设, 相对于其它发达国家而言, 尤其是相对日本、美国等发达国家, 中国缺乏系统、全面的人工鱼礁研究, 人工鱼礁礁体优化设计等很多问题亟待解决。

人工鱼礁建设是一项复杂的系统工程, 投资巨大, 必

收稿日期: 2007-12-07; 修回日期: 2008-03-06

资助项目: 国家高新技术研究发展计划(863计划)项目(2006AA100303); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(2007ZD03; 2007TS10; 2007TS22)

作者简介: 陶峰(1983-), 男, 硕士研究生, 从事渔业资源研究。E-mail: ddatf@163.com

通讯作者: 贾晓平, E-mail: jiaxiaoping53@163.com

须在礁体设计及其配置方案等方面提供必要的科技支撑。此文从人工鱼礁材料的选择、礁体对流场和鱼类行为的影响以及礁体配置方法等方面，对国内外人工鱼礁礁体设计的研究进展进行了综述，以期为中国的人工鱼礁礁体优化设计提供参考。

1 礁体构筑材料的选择

人类使用人工鱼礁的历史较长。中国有关人工鱼礁使用的记载可以溯及商朝前，《诗经·周颂》中有“猗与漆沮，潜有多鱼”的记载。春秋战国至汉代期间，出现了向自然水域抛投树枝等以诱鱼聚集，提高捕鱼效果的“罾业”，投抛树枝的作用，相当于现在人工鱼礁的诱集鱼类作用。在晋朝古籍《尔雅》一书中记载渔民“投树枝、垒石块于海中诱集鱼类，然后聚而捕之”。明朝嘉靖年间，南海北部沿海渔民已经利用设置在海中的竹篱诱集鱼群进行捕鱼作业^[2]。日本在距今300年左右向海区抛石块用以增加鱼类和贝类数量；1804年以木材为造礁材料，明治至大正时代开始用石块、沙包、陶管；大正至昭和时代用舰船、车辆等废弃物；昭和二十六年以后则用混凝土构件等现代化材料。美国鱼礁的发明纯属偶然，1860年洪水带来了树木，从而招来了大量鱼类，而后人们又将石块装入木制小栅投入海底，也引来了大量的鱼群，于是纽约的船工协会采用水泥管做构筑材料投入海里，效果更佳，诱集了大批鱼类^[3]。

到了近代，人工鱼礁的种类增多，不同种类的鱼礁都有其相对的实用性，如养殖、增殖型鱼礁投放到不同水深的海域会产生不同的增殖效果；不同构筑材料的选择也将鱼礁的功用一一区分，如混凝土型经久耐用，钢材鱼礁适用于外海等，人们逐渐意识到鱼礁构筑材料的质地和组成能影响到人工鱼礁的性能，开始关注人工鱼礁材料选择与使用。研究表明，鱼礁构筑材料在海水中容易和海水发生化学反应而产生的腐化，往往导致鱼礁的构筑材料的不稳定，如钢铁等金属材质的礁体因为受到海水的腐蚀而导致鱼礁解体^[4]，或者因为鱼礁部件连接部位处的螺母和螺钉被腐蚀而导致解体。辽宁省海洋渔业开发中心曾试验用粉煤灰代替部分水泥制作鱼礁，但由于礁体强度较低，耐久性差，未能推广。大型石块抛于海底可用作贝类礁或海参礁，造价比较便宜，但大型石块在海中浸泡后，其强度低于 $5\,000 \times 10^4$ Pa后也会导致礁体的不稳定^[4]。

最近，韩国在钢制鱼礁建造中采用了铝合金流电两极方式进行防腐焊接，并且这种礁体适合松软的底质，不易下陷和倾覆，稳定性能好，几乎可以发挥半永久性的人工鱼礁功能，据测算可使鱼礁寿命延长至60~70年。1999~2001年韩国学者对钢材、混凝土和PVC 3种不同材质的鱼礁进行了连续3年的比较研究，结果表明钢制鱼礁的底

栖生物附着率比另外2种材料均高出1/3左右，PVC材料鱼礁的附着率比混凝土礁略高5%^[2]。SHAO和CHEN^[5]对位于台湾省北部万里海岸的100座煤灰材料鱼礁监测的结果发现，这些鱼礁对鱼类的诱集效果以及底栖生物附着率与附近的混凝土材料鱼礁大致相同。刘秀民等^[6]利用火电厂粉煤灰和碱厂碱渣代替水泥制作人工鱼礁，结果表明，所制人工鱼礁不仅具有较高的抗压强度，而且对海水无污染、造价低。相对于国外，国内投放的鱼礁多用钢筋混凝土所制作^[7]。黄梓荣等^[8]在河口海域比较了不同试验材料的生物附着效果，发现混凝土板、木板、铁板和塑料板的附着效果较好，铜板的生物附着效果最差，同种材料，表面粗糙的混凝土板、涂有红丹防锈漆的木板、涂有绿漆的铁板和灰色塑料板的附着效果最好。

构筑材料是礁体设计的重要指标之一，所以在设计和制造鱼礁之前，必须清楚了解筑礁材料的各种性能。目前常用的礁体构筑材料有钢制、煤灰、木材、混凝土等。钢制鱼礁的优点是有较高的加工性能，在海底稳定性好、无毒，并且溶入水中的铁离子还可以吸引大量的生物附着，但缺点是腐蚀性大、寿命短；煤灰制鱼礁也能达到混凝土鱼礁的效果，但是其强度低还会溶解出有毒物质；木材的优点是无毒、加工性强、来源容易、成本低廉，但容易被海洋生物侵蚀；混凝土是比较理想的构筑材料，可做成任意形状，强度好，与其他材料相比可算是最好的构筑鱼礁材料，中国使用较多。总之选择人工鱼礁的构筑材料应符合功能好、副作用低、结实耐用、成本低廉以及来源容易。

2 礁体结构的设计

20世纪60年代开始，国内外学者曾围绕人工鱼礁功能、特性等开展了相关的基础和应用技术研究，并获得了一定的成果，其中从水动力学、生物学和空间几何学等角度去进行礁体结构设计也有过相关报道。这些成果对人工鱼礁的建设起到了积极的推动作用。

基于前人对人工鱼礁设计方面的研究，可将人工鱼礁礁体设计有关的因素总结为以下几点：

(1) 流体力学因素。即鱼礁投放后，海流所引起的礁体的滑移、倾覆、沉陷和掩埋，即人工鱼礁的物理稳定性问题。

(2) 生物因素。即人工鱼礁投入海底后，引起的周围物理化学性质的变化，从而引起的礁区海洋生态系统的变化。

(3) 空间几何因素。即礁体的配置问题，也就是礁体布局时利用鱼礁排列方向来提高鱼礁性能问题。

2.1 结合流体力学进行礁体设计

日本自20世纪60年代开始对人工鱼礁的水动力学特性作过较为系统的研究。佐藤修和影山方郎^[9]设计了对角

形、圆筒形、四角形鱼礁单体模型,并通过水槽模型实验,定量研究了礁体模型周围流场的变化及影响范围;影山芳郎等^[10-11]通过水槽和风洞实验,测定了立方体、三角柱、四角锥型鱼礁模型周围的流态,得出的大量数据为进一步优化这3种礁型提供了实践依据。佐久田博司等^[12]设计出了立方体鱼礁模型并从很多试验数据中总结出流体力学特性。FUJIHARA等^[13]运用数值计算法对设置鱼礁后的定常层流水域的流场变化进行研究,得到了鱼礁流场的上升流范围及分布特点,为人工鱼礁构型优化提供了科学的数据。KIM等^[14]对浅水区鱼礁在波浪作用下的局部冲刷和下陷进行了实验室研究,认为鱼礁的型状对局部流有显著影响,从而也决定了局部冲刷程度。另外,底层流的扰动使鱼礁底部与底质的接触面积减少,造成了鱼礁的不稳定和下沉,提出了海流特征对人工鱼礁型的设计是一个重要因素。国外学者的研究表明,在鱼礁的阻流作用下,鱼礁下游的流场根据紊动程度可分为3个区域:紊流区、过渡区和未受扰动区,通透性礁体和非通透性礁体所产生的紊流区长度比和高度比均不同,通透性礁体的高度比小于1,长度比小于4,而非通透性礁体的高度比一般要大于1而略小于2,而长度比小于14^[15]。

与国外相比,国内对人工鱼礁水动力数值模拟的研究,尤其是定量研究较少。刘同渝^[16]对梯形、半球形、三角锥体、堆叠式鱼礁模型作了水槽和烟风洞实验,提出人工鱼礁在风浪中的稳定性受鱼礁在海洋中所受的波浪力影响,为礁体结构设计提供外力荷载的依据;虞聪达等^[17]用数值计算方法分别对人工鱼礁单体和人工船礁的流场进行模拟计算,其结果用于礁体的铺设方法;吴子岳等^[18]通过对礁体作用力计算、不漂移时的安全校核和不翻滚时的安全性校核,设计了2 m×2 m×2 m的十字型混凝土礁体;钟术求等^[19]针对台州大陈海域的波流状况、水深等设计了钢制四方台型礁体,并根据波流动力学理论对此礁体在实际投放海域所受到的最大作用力、抗漂移系数以及抗倾覆系数等进行了计算;田文敏和杨安辉^[20]发现,礁体出现沉陷或遭到掩埋的主要原因与礁体物理量(尺寸与重量)、沉积物性质以及海况有密切关系,波浪及海流所造成的沉积物冲刷作用是鱼礁下沉的最主要原因,建议在人工鱼礁设计当中应当充分考虑波浪及海流所造成的影响;史红卫^[21]在水槽试验的基础上,对正方体人工鱼礁在与来流呈不同角度时的受力状况进行了研究,找出了方型鱼礁的自动模型区域,计算了实际鱼礁在海水流速下受到的阻力,设计出有盖鱼礁和无盖鱼礁2种礁体;赵海涛等^[22]针对中国人工鱼礁结构设计发展的实际状况对人工鱼礁的规划设计提出了比较系统的方法。

2.2 结合生物因素进行礁体设计

生物因素对礁体设计也起到关键作用,在适宜的海域

投放适宜材料所构筑的礁体后,其周围的海洋生态环境会产生明显的良性效应,礁体投放几天后就开始附着生物,而这些附着生物又是鱼类良好的饵料,故又能诱集大量的鱼群来繁衍栖息,如果人工制造的这种构造物能够在某一海区富集大量的生物,那么这个鱼礁类型就是我们所需要的。也就是说人工鱼礁的礁体构型与生物因素密切相关。

2.2.1 附着生物与礁体设计 人工鱼礁投放后的礁体表面通常会生附着生物,鱼礁周围的底栖生物和浮游生物的种类、数量、分布也发生变化,从而形成礁体特有的生物群落。日本学者大久保和柿原皓^[23]研究表明,一般情况下附着生物多着生在鱼礁上面和侧面的上部,其着生量在透明度高、底质较粗和流速较快的水域中较多而在鱼礁单体内部和附近区域内附着动物种类和个体数有减少的倾向,鱼礁内部和后方聚集着许多浮游动物,因此,在礁体设计的过程中应当充分考虑礁体的复杂性,也应当考虑礁体的型状所引起的水流改变。

附着生物是人工鱼礁最主要的生物环境因子,又是人工鱼礁渔业对象的主要饵料生物,国内外关于结合附着生物进行礁体设计方面的报道极少,在进行礁体结构设计时应该考虑附着生物因素。

2.2.2 鱼类行为学与礁体设计 日本学者^[24-27]通过鱼探仪对底层鱼类在礁区的昼夜活动规律进行了研究,通过水下摄像和潜水方式,对斑鳍光鳃鱼(*Chromis notatus*)、黑鳃梅童鱼(*Collichthys niveatus*)、真鲷(*Pagrosomus major*)和牙鲆(*Paralichthys olivaceus*)等鱼类在人工鱼礁中的行为特性进行了细致观察,发现不同构造和形状的鱼礁其诱集的鱼类也不同,形成小空间的鱼礁中小型鱼类较多,而真鲷却在多个小型鱼礁单体排列而成的鱼礁群中数量较多。鱼礁的构造越复杂,其诱集鱼类的种数和生物量越多。此外,鱼类所喜欢的鱼礁构造还会随着种类不同和生长阶段的不同而变化。因此,在设计鱼礁的过程中应当使鱼礁的结构复杂多变,或是使礁体内部的结构复杂一点,不能单一的使用一种礁型或是简单形状。柿本皓^[28]和武内智行^[29]研究表明鱼礁周边鱼群的移入、移出,与鱼礁区的生态条件(水流、水温、光照强度、饵料的质和量、敌害生物的密度等)有着密切关系。田中惯^[30]研究了鱼礁渔场的鱼类生态,认为鱼礁周围鱼的行为主要是由饵料密度、可能逃避空间的有无以及索饵欲求等生理状态决定的,逃避敌害、索饵和休息嬉戏尤其是鱼类幼稚时期的主要活动。SPIELER等^[31]研究了礁体结构复杂性与鱼类数量和物种多样性的关系。奥村重信等^[32]对赤点石斑鱼(*Epinephelus akaara*)幼鱼的研究结果表明,鱼礁结构的遮蔽越强、内部缝隙越小的鱼礁对幼鱼的聚集效果越好。D'ANNA等^[33]研究了人工鱼礁对少带重牙鲷(*Diplodus sargus lineatus*)行为的影响,认为在人工鱼礁场放养少带重牙鲷能增大其资

源量。

中国学者也对不同结构的模型礁对鱼类的诱集效果进行了比较。陈勇等^[34-35]通过对不同结构的模型礁对许氏平鲷 (*Sebastes schlegeli*) 幼鱼的诱集效果和模型礁对幼鲍 (*Haliotis* sp)、幼海胆 (*Hemicentrotus pulcherrimus*) 行为影响的研究表明, 许氏平鲷、幼鲍、幼海胆对不同模型礁均表现出明显的趋集反应; 吴静等^[36]研究了牙鲆对不同结构模型礁的行为反应; 何大仁等^[37-38]研究了鱼礁模型对黑鲷 (*Sparus macrocephalus*) 和赤点石斑鱼的诱集效果。另外, 对于物理与生物环境的关系也有相关的报道。有研究表明礁体和主流流(优势流)的相互作用往往在礁体下游形成一个充满漩涡的背涡流区, 当礁体厚度或宽度与鱼礁周围流速的乘积超过 $100 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 漩涡将从礁体上脱落, 某些鱼类将被吸引到礁后的背涡流区中, 背涡流区又可观察到明显的底质和营养盐的沉积, 礁体高度为水深的 10% 时, 紊流范围即可达到水柱的 80% ~ 100%。弄清海域的优势流以后, 就能设计一定的礁体以产生预期尺度的背涡流区。而背涡流区外的高紊流区可以用来吸引其它的趋流性鱼种。

通过前人的研究得出, 鱼礁的结构设计取决于鱼类的趋性。对于以鱼礁作为栖息场的鱼种来说, 鱼礁的空隙是非常重要的条件。所以, 鱼礁的结构应以中空型式为主, 通常希望空隙率越大越好, 如用钢筋混凝土制作的鱼礁, 其结构型式多为空隙率很大的规则几何体, 对栖息于鱼礁的鱼类, 必须选择适合鱼体形状及大小的鱼礁空隙; 对于索饵鱼类, 人工鱼礁则以全潮时为设置条件; 对于表、中层鱼类, 鱼礁要有足够的高度, 应有遮断流体的机能, 有产生流体声音的设计, 因为部分能产生声学效果的礁体对鱼类的行为也有一定的影响^[2]。

2.3 空间几何要素与礁体设计

应针对特定海域特征, 确定礁高水深比和能充分发挥鱼礁功能的礁体(群)配置规模等参数的较适值范围, 制定人工鱼礁的优化组合方案、配置规模大小及礁区的整体布局模式。应通过配置组合的验证进一步优化鱼礁的性能, 设计出适宜的鱼礁单体构型。

张怀慧等^[39]在利用人工鱼礁工程增殖海洋水产资源的研究中得出单位鱼礁是构成鱼礁渔场的基本单元, 其有效包络面积的大小等于单位鱼礁在海底投影面积的 20 倍左右时效果最佳; 虞聪达等^[17]分别对不同的鱼礁模型作了水槽和烟风洞实验, 并通过数值模拟确定评价鱼礁铺设方式的影响因子, 为礁体结构设计和实际礁体的铺设提供外力荷载的依据; 史红卫等^[21]对设计的边长为 3 m 的正方体沉箱型鱼礁进行配置计算, 得出单位鱼礁的有效边缘在 200 ~ 300 m 之间, 单位鱼礁之间的距离一般为 400 ~ 600 m, 为防止鱼群从一个鱼礁群游到另一个鱼礁群, 最好取鱼群可能感知距离的 2 倍以上, 即鱼礁群的间隔数可取为 2 km。

金昌义^[40]认为要减缓人工鱼礁下陷, 应从礁体形状设计以及礁体排列方式着手。

以上的研究都是人工鱼礁各个单体间配置组合问题的研究探讨, 合理的鱼礁配置能扩大渔场面积和鱼群的诱集范围, 增加渔业资源, 从而提高鱼礁经济效益。适宜的鱼礁配置应根据礁区环境、生物特性、渔具渔法等多方面加以综合考虑确定。一般来说, 设计小型鱼礁, 则分散配置对底层鱼类较为有利, 但不能过于分散。目前中国的鱼礁配置设置是和鱼礁的高度相关的, 一般取礁体高度的 10 ~ 15 倍作为鱼礁的间距^[2]。

3 人工鱼礁的成本问题

对于人工鱼礁的礁体设计所涉及的学科主要有材料学、流体力学、海洋学、鱼类行为学等。所以, 在礁体的设计中往往需要考虑多种因素, 根据不同的需要设计不同的礁体类型以及配置方式, 从而在实际的生产应用中能降低一定的成本。

首先, 可以从材料上节省成本, 混凝土鱼礁可塑性强, 效果好而且经久耐用; 钢质材料制作容易, 运输方便, 多用于外海, 效果显著; 木质材料用于制作浮式人工鱼礁。其次从生物学角度出发, 可以针对诱集鱼类品种对制作的人工鱼礁的大小和内部结构加以改造, 如对于表层鱼类要产生光和流影, 使鱼对鱼礁有感应; 对于中、底层游泳性鱼类, 礁体的内部空间要大, 使用和周围环境相异的结构体; 对于底栖鱼类, 要考虑具有保护性能的复杂空间结构。还可以根据鱼礁的多种配置形式将单位鱼礁渔场相互联系起来构成最佳区域的渔场, 从而降低礁体制作成本。另外, 有些学者建议设计出生物与具体材料结合的人工鱼礁, 如礁体顶部可以附着藻类, 下部可以设计成龙虾礁、海参礁、海胆礁等, 或者根据不同海区生物环境状况设计出引诱珊瑚虫聚集的礁体, 利用天然礁的形成来加固人工鱼礁的稳定性和增加其实用性, 这些种类的礁体具有体积小、成本低、见效快的优点。

综上所述, 在人工鱼礁的设计中应在选材上挖掘潜力, 除了目前常用的混凝土外, 应综合考虑材料的性价比等因素, 利用某些废旧材料, 变废为宝, 设计出水动力性能好、稳定性强、成本低廉的礁体模型。

4 人工鱼礁的大小

礁体的大小是指鱼礁的外形尺寸, 主要是指高和宽, 其取决于水深、流速及鱼种。随着鱼礁事业的发展, 礁体的大小产生了很大的变化, 从简单到组合, 从小型到大型。鱼礁大小型号的具体数值界定也没有一个统一的标准, 一般大型单体鱼礁体积在 $100 \sim 400 \text{ m}^3$, 重量约 15 ~ 70 t; 小

型的鱼礁单体的体积约 $1 \sim 30 \text{ m}^3$ ，重量约 $0.1 \sim 3 \text{ t}$ ；而中型鱼礁单体的体积和重量则位于前两者之间^[2]。

目前，关于这方面的理论性研究较少，通常是根据海域的水深、底质和流速，并结合礁鱼的资源量及海上交通等信息综合判定所需礁体的大小。小型鱼礁单体铺设比较分散，集鱼效果相对较强，但对底层鱼类具有较好的集鱼效果，如鲷、鲹和鳗等，鱼礁高度控制在 1 m 左右就可以收到良好的集鱼效果；大型鱼礁单体虽然造价较高，但在外海的深海海域集鱼效果明显，可以同时诱集高、中、低不同水层的鱼类，收效较为理想。

因此，礁体大小设计要考虑到礁体投放后的稳定性，礁体建造技术的复杂性，投放的难易程度，并兼顾经济效益，力求达到集鱼效果好，施工简单、投放方便并且成本低廉^[2]。

5 发展趋势

现阶段，随着水动力学、生物学及材料学的发展，为人工鱼礁的礁体设计奠定了坚实的理论基础。礁体构筑材料的选择、投放的方式和地点、礁体群的配置方式、综合效益等方面的因素对礁体的设计都有很大的影响，应当从经济性和实用性的角度出发，通过对单体鱼礁和礁体群进行水动力学数值模拟计算与分析，结合特定海域的海洋环境特性、海洋生物对礁体模型的反应行为观察等研究，设计出水动力性能好，稳定性强的人工鱼礁礁体，进行人工鱼礁的礁体设计与结构优化升级，为人工鱼礁工程设计提供参考材料。

参考文献：

- [1] 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 [J]. 海洋渔业, 2006, 28 (3): 258-262.
- [2] 杨吝, 刘同渝, 黄汝堪. 中国人工鱼礁理论与实践 [M]. 广州: 广东科技出版社, 2005.
- [3] 陈锤. 鱼礁史话 [J]. 海洋开发与管理, 2001, 4 (4): 74-75.
- [4] 海洋技术研究所. 海洋开发技术进展 [M]. 北京: 海洋出版社, 1987: 265.
- [5] SHAO K, CHEN L. Evaluating the effectiveness of the coal ash artificial reefs at WanLi northern of Taiwan [J]. J Fish Soc Taiwan, 1992, 19 (4): 239-250.
- [6] 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 [J]. 建筑材料学报, 2007, 10 (5): 622-626.
- [7] 张怀慧, 孙龙. 利用人工鱼礁工程增殖海洋水产资源的研究 [J]. 资源科学, 2001, 23 (5): 6-10.
- [8] 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.
- [9] 佐藤修, 影山方郎. 人工鱼礁 [M]. 东京: 恒星社厚生阁, 1984: 17-26; 38-42.
- [10] 影山方郎, 大阪英雄, 山田英已, 等. 平面上に置かれた透過壁立方体周りの流れの可視化 [J]. 水産土木, 1982, 19 (2): 1-9.
- [11] 影山方郎, 大阪英雄, 山田英已, 等. 人工礁モデル周りの流況 [J]. 水産土木, 1986, 23 (2): 1-8.
- [12] 佐久田博司, 佐久田昌昭, 渡边浩一郎, 等. 人工沉設魚礁模型に関する基础研究 [J]. 水産土木, 1981, 18 (1): 7-19.
- [13] FUJIHARA M, KAUACHI T, OHASHI G. Physical-biological coupled modeling for artificially generated upwelling [J]. Mar Biol, 1997, 189: 69-79.
- [14] KIM J Q, ITZUTANI N M, IWATA K. Experimental study on the local scour and embedment of fish reef by wave action in shallow water depth [C]. Tokyo: Proceedings, International Conference on Ecological System Enhancement Technology for Aquatic Environments. Japan International Marine Science and Technology Federation, 1995: 168-173.
- [15] SEAMAN W. Artificial reef evaluation with application to natural marine habitats [M]. Boca Raton: CRC press, 2000: 51-94.
- [16] 刘同渝. 人工鱼礁的流态效应 [J]. 水产科技, 2003 (6): 43-44.
- [17] 虞聪达, 俞存根, 严世强. 人工船礁铺设模式优选方法研究 [J]. 海洋与湖沼, 2004, 35 (4): 299-305.
- [18] 吴子岳, 孙满昌, 汤威. 十字型人工鱼礁礁体的水动力计算 [J]. 海洋水产研究, 2003, 24 (4): 32-35.
- [19] 钟术求, 孙满昌, 章守宇, 等. 钢制四方台型人工鱼礁礁体设计及稳定性研究 [J]. 海洋渔业, 2006, 28 (3): 234-240.
- [20] 田文敏, 楊安輝. 永安港外海人工鱼礁之下陷量與下沉機制分析 [G]. 台湾: 中華民國第十九屆海洋工程研討會論文集, 1997: 545-552.
- [21] 史红卫. 正方体人工鱼礁模型试验与礁体设计 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2006.
- [22] 赵海涛, 张亦飞, 郝春玲, 等. 人工鱼礁的投放区选址和礁体设计 [J]. 海洋学研究, 2006, 24 (4): 72-74.
- [23] 大久保久直, 柿原皓. 施設実験 [R]. 大規模増養場開発事業調査報告書 (上越地区・マダイ). 新潟県: [s. n.], 1980: 102-122.
- [24] 小川良徳, 竹村嘉夫. 人工鱼礁に対する魚群行動の試験的研究 I ~ VI [J]. 东海水研报, 1966 (45): 107-161.
- [25] 小川良徳. 人工鱼礁と魚付き: 人工鱼礁とその効果 [J]. 水产增殖臨号, 1968 (7): 1-21.
- [26] 岗本峰雄, 黒木敏郎, 村井彻. 人工魚礁近傍の魚群生に関する予備的研究-猿島北方魚礁群の概要 [J]. 日本水产学会誌, 1979, 45: 709-713.
- [27] 増沢寿. 人工鱼礁と生産交力果 [J]. 水産土木, 1974, 11 (1): 19-25.

- [28] 武内智行. 鱼礁による環境形成と設計技術 [M]. 东京: 国际海洋科学技术学会, 1991: 97-102.
- [29] 柿本皓. 新潟県沿岸域における魚類の行動学的研究 [J]. 新潟県水産試験場, 1984 (1): 147-152.
- [30] 田中惯. 鱼礁渔场における鱼类生态に門关する研究IV, 计量鱼探による鱼礁渔场附近の广域鱼群量调查 [J]. 水産土木, 1985, 22 (2): 9-16.
- [31] SPIELER R E, GILLIAM D S, SHERMAN R L. Artificial substrate and coral reef restoration: what do we need to know what we need [J]. Bull Mar Sci, 2001, 69 (2): 1 013-1 030.
- [32] 奥村重信, 津村誠一, 丸山敬悟. 水槽実験による幼魚保護礁の素材評価 [J]. 日本水产学会誌, 2002, 68 (2): 186-191.
- [33] D'ANNA G, GIACALONE V M, BADALAMENTI F, et al. Releasing of hatchery-reared juveniles of the white sea bream *Diplodus sargetus* (L. 1758) in the Gulf of Castellammare artificial reef area (NW Sicily) [J]. Aquac, 2004, 233 (4): 251-268.
- [34] 陈勇, 吴晓郁, 邵丽萍, 等. 模型礁对幼鲍、幼海胆行为的影响 [J]. 大连水产学院学报, 2006, 21 (4): 361-365.
- [35] 陈勇, 于长清, 张国胜, 等. 人工鱼礁的环境功能与集鱼效果 [J]. 大连水产学院学报, 2002, 17 (1): 64-68.
- [36] 吴静, 张硕, 孙满昌, 等. 不同结构的人工鱼礁模型对牙鲆的诱集效果初探 [J]. 海洋渔业, 2004, 26 (4): 394-398.
- [37] 何大仁, 丁云. 鱼礁模型对赤点石斑鱼的诱集效果 [J]. 台湾海峡, 1995, 14 (4): 394-398.
- [38] 何大仁, 施养明. 鱼礁模型对黑鲷的诱集效果 [J]. 厦门大学学报: 自然科学版, 1995, 34 (4): 653-657.
- [39] 张怀慧, 孙龙. 利用人工鱼礁工程增殖海洋水产资源的研究 [J]. 资源科学, 2001, 23 (5): 6-10.
- [40] 金昌义. 海洋沉积物稳定性与重力式结构物工程行为分析 [D]. 广州: 中山大学海洋环境及工程研究所, 2002.