

贝壳礁构建和生态效应研究进展

王莲莲^{1,2}, 陈丕茂¹, 陈勇², 罗虹霞^{1,3}

(1. 中国水产科学研究院南海水产研究所, 农业部南海渔业资源环境科学观测实验站, 中国水产科学研究院海洋牧场技术重点实验室, 广东广州 510300; 2. 大连海洋大学辽宁省海洋牧场工程技术研究中心, 辽宁大连 116023; 3. 上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306)

摘要: 利用水产养殖贝类和捕捞贝类的副产物废弃贝壳建设人工鱼礁, 既可为保护海洋环境开创新途径, 又可解决陆地大量废弃贝壳堆积占地和废弃贝壳老化分解污染环境等问题。本研究中综述了国内外对贝壳的利用概况, 从潮间带贝壳礁和浅海贝壳礁两方面概述了贝壳礁的发展现状和贝壳礁生态效应的研究进展, 对利用现有废弃贝壳建设贝壳礁的海洋生态系统服务价值进行了预测, 展望了贝壳礁的发展前景, 并提出中国应加大对贝壳礁利用开发的科研投入, 推广和发展贝壳礁。

关键词: 贝壳礁; 废弃贝壳; 附着生物; 生态效应

中图分类号: S931.5 **文献标志码:** A

中国水产养殖贝类和捕捞贝类产量较大, 2012年全国贝类产量达1318万t, 其中贝类养殖产量为1234万t, 贝类捕捞产量为84万t^[1]。由于中国对贝壳的利用率低^[2], 每年有大量的贝壳得不到有效利用, 造成了大量废弃贝壳堆积占地和因其老化分解等环境问题。

人工鱼礁种类繁多, 按材料可分为钢筋混凝土、钢制、石料、玻璃钢、竹制、木制、塑料和废弃物鱼礁^[3-4]。早期用作人工鱼礁材料的轮胎、汽车、船体等废弃物, 如果处理不当可能会对海水环境造成污染^[3]。贝壳礁是一种新型的环保人工鱼礁, 是将废弃贝壳固装制成礁体, 投放入海作为人工鱼礁。利用废弃贝壳建设人工鱼礁, 不仅可以解决因贝壳堆积造成的占地和环境污染问题, 还可为海洋生态修复和渔业资源养护开创新途径。本研究中, 介绍了国内外对贝壳的利用概况, 综述了贝壳礁的构建和生态效应研究进展, 展望了贝壳礁的开发前景, 以期推广和发展贝壳礁提供参考。

1 国内外贝壳的利用概况

据《易经》、《史记·平准书》和《说文·贝部》等记载, 在中国, 贝壳作为流通货币的历史可以追溯到夏、商、周时代, 而在世界范围内, 据

《西洋番国志》记载, 印度洋岛国溜山国时期(今马尔代夫), 当地居民采集的贝壳就已经被当作流通货币贩卖到其他国家。随着社会的发展, 国内外对贝壳的利用有了扩展: 在工艺品制造方面, 贝壳可作为观赏品、装饰品、工艺品和护肤品容器等^[5]; 在农畜养殖方面, 贝壳因含有大量碳酸钙, 可作为良好的钙质饲料或饲料添加料, 也作为贝类、海藻养殖的附着载体等^[6]; 在医药方面, 贝壳被用来制备活性离子钙、药物载体、骨替代仿生材料等^[7]; 贝壳也用于污水处理、构建海岸线^[8]和修复海岸生境^[9]等; 还用于融雪、食品保鲜剂、强化剂、燃煤脱硫剂^[10]、混凝土辅料^[11-12]等。目前, 在工农业和医药方面所利用的贝壳仅是水产贝类废弃贝壳的小部分。近年来, 随着海洋渔业资源的衰退和海洋生态环境的恶化, 利用水产养殖贝类和捕捞贝类废弃贝壳制作贝壳礁进行海洋生态修复的探索受到重视, 在天然牡蛎礁生态修复和浅海贝壳礁人工生境建设方面开始应用贝壳。

2 贝壳礁构建的研究进展

2.1 潮间带贝壳礁

近年来, 由于过度采捕、海岸工程建设、环境

收稿日期: 2014-09-20

基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划项目(2012BAD18B02, 2012BAD18B01-2); 国家公益性行业(农业)科研专项(201003068)

作者简介: 王莲莲(1990—), 女, 硕士研究生。E-mail: beenle_wang@163.com

通信作者: 陈丕茂(1969—), 男, 研究员。E-mail: chenpm@scsfri.ac.cn

污染等影响,天然牡蛎礁生境遭到严重破坏。潮间带贝壳礁作为人工鱼礁的一种,其建设已成为修复天然牡蛎礁海岸生态的重要措施。

20世纪60年代,Heffernan等^[13-14]使用已附着牡蛎卵的牡蛎壳构建潮间带贝壳礁,结果显示,当附着的牡蛎卵生长形成稳定牡蛎种群之后,3~4年就会形成天然牡蛎礁。1999—2004年,美国在弗吉尼亚州和南卡罗来纳州海岸开展了多次投放牡蛎壳促使天然牡蛎礁恢复的活动^[15]。Borde等^[16]用牡蛎壳制作防浪堤,以实现天然牡蛎礁的修复。Piazza等^[17]研究了使用牡蛎壳建筑海岸线、创建生物栖息地的方法,期望能够有效减缓海岸侵蚀,永久地延长海岸线。2010年,英国石油公司墨西哥湾油井漏油之后,各国海洋志愿者在岸边堆积袋装贝壳礁,重建天然牡蛎礁,以恢复生态环境^[18]。Scyphers^[19]将牡蛎壳与混凝土结合制成牡蛎壳防浪堤,以减缓海岸侵蚀,促进渔业发展。Soniat等^[20]研究表明,潮间带贝壳礁的垂直结构以及为海洋生物提供避敌、栖息场所是贝壳礁设计和建设需要考虑的重要方面。

在中国,天然牡蛎礁同样普遍受到破坏,但在长江口沿岸,通过堆放圆柱型塑料网袋固装牡蛎壳形成的贝壳礁构建防浪堤,对天然牡蛎礁的生态功能恢复^[9]起到了积极作用。

国外发达国家的潮间带贝壳礁建设和研究,在开发利用时间、构建规模和研究深度等方面,均较中国取得较大进展。

2.2 浅海贝壳礁

利用废弃贝壳制作人工鱼礁,已成为世界上建设人工鱼礁保护海洋资源环境的重要发展趋势。

在国外,20世纪50年代中期,美国就将贝壳(牡蛎壳、扇贝壳、蛤壳和海螺壳等)作为人工鱼礁的选材^[16]。但由于不同种类贝壳的性质差异,美国后期的贝壳礁建设主要依赖于牡蛎壳^[21]。Arve^[22]通过将牡蛎壳铺设到近岸海底的方式构建简易的牡蛎贝壳礁。到2000年,阿拉巴马州近岸共投放39 500 m³牡蛎贝壳礁^[6]。进入21世纪后,日本的人工鱼礁建设就朝着贝壳型鱼礁和高层鱼礁发展^[23],扇贝壳是其贝壳礁建设的主要选材。奥村重信等^[24]在正四棱台框架内放置4组由36个填充扇贝壳的不锈钢网状管道,构成扇贝壳礁。村上俊哉等^[25]将扇贝壳作为人工藻礁新型材料的添加原料。佐藤朱美等^[26]将完整扇贝壳和扇贝壳碎片分别装入圆柱体框架内制成圆柱型贝壳礁单体,

再将贝壳礁单体放入正方体架台内,形成贝壳礁。藤泽真也等^[5]将若干不锈钢网柱型贝壳礁进行组合,作为龙虾饵料培养设施。青山智等^[27]设计了两种保育型扇贝壳礁,其结构为正方体混凝土框架内分别放置9个和20个填充扇贝壳的不锈钢网状管道,并设定了两种扇贝壳的间隔,分别为30 mm和15 mm。岡本健太郎等^[28]设计了具有不同数目通水孔的不锈钢网架,在网架中填充扇贝壳后形成贝壳礁。

在中国,王洪瑞等^[29]、王雪瑞^[30]均使用袋装贝壳礁作为刺参养殖礁体。于沛民等^[31]提出将贝壳作为人工藻礁选材之一。姜少杰等^[32]通过将贝壳嵌在钢筋混凝土方形框架表面的方法制成了贝壳方礁。刘国山等^[33]将钢板焊接制成框架,在框架内部盛载贝壳网袋,外部连接苗绳,形成了苗绳—贝壳复合式人工藻礁。田涛等^[34]采用将贝壳串与钢筋混凝土框架接合的方法,设计出饵料培养型贝壳礁。杨红生等^[35-36]发明了牡蛎贝壳礁制作方法及其配套制作装置,将牡蛎壳制成礁体投入海底后进行海珍品增殖。李国迎等^[37-38]设计了将钢筋混凝土、尼龙网绳和废弃贝壳进行组合而成的方型笼式增殖贝壳礁和抗沉陷三角型网状贝壳礁。王莲莲等^[39-42]针对广东沿海资源环境状况,设计、制作和试验了几种可形成较好流场效应、阴影效应和具抗风浪等作用的贝壳礁。

相对于美国和日本等渔业发达国家,中国的浅海贝壳礁构建起步较晚,已开展的贝壳礁建设还处于试验阶段,但在贝壳礁的设计和构建等方面已取得了一批成果。

3 贝壳礁生态效应的研究进展

3.1 潮间带贝壳礁的生态效应

Szedlmayer等^[43]研究表明,天然牡蛎礁是沙底海区鱼类的首选栖息场所。Coena等^[44]认为,天然牡蛎礁是鱼类重要的栖息地,海洋环境特征如潮差、海底底质、海水浊度和盐度等对天然牡蛎礁恢复具有重要影响。Waltersa等^[45]对天然牡蛎礁进行了连续7年的调查,建立了系统的天然牡蛎礁生态功能评价标准,并指出天然牡蛎礁在提供饵料、避难所和提高生物多样性等方面发挥了巨大作用。Juliana等^[46]、Harding等^[47]研究了潮间带贝壳礁浮游动物的群落组成和丰度的水平分布和时间变化,并对贝壳礁区与非礁区鱼类胃含物进行分析,发现贝壳礁区鱼类胃含物的生物多样性高于非礁

区。Yeager 等^[48]用同位素追踪的方法,对天然牡蛎礁的食物网进行研究,并指出天然牡蛎礁对重要渔业品种的幼鱼、稚鱼具有很好的保护作用,可有效促进渔业生产。Peterson 等^[49]研究表明,活体牡蛎礁的修复能够使渔业产量增加 $0.26 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,其生态系统服务价值平均达 $853 \text{ 万元}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ (2003 年美元兑换人民币汇率约为 8.28),尚未包括牡蛎提供的食品供给服务。

在中国,Quan 等^[9]使用牡蛎壳作为长江口牡蛎礁恢复的底物替代材料,结果表明,长江口导堤牡蛎种群数量有明显增长,牡蛎礁区水生生态系统的结构与功能得到明显改善,产生 $11 \text{ 万元}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 的海洋生态系统服务价值^[50]。王在峰等^[51]采用模糊综合评价模型,从潮间带牡蛎礁的环境、结构和稳定性三方面对海门市沿海牡蛎礁进行了生态健康评价。孙万胜等^[52]研究发现,天津近岸天然牡蛎礁已遭到严重破坏,海区浮游动物平均密度及鱼类、虾类、蟹类、头足类等游泳动物资源量显著降低,需要进行人工修复。

在潮间带贝壳礁生态效应研究方面,国外学者对天然牡蛎礁的修复已进行了相对充分的研究,并已建立起生态功能评价标准,中国在此方面的研究虽已起步,但在诸多方面仍需要努力探索。

3.2 浅海贝壳礁的生态效应

浅海贝壳礁的生态效应,主要表现在海洋环境修复效应、生物附着与聚集效应和固碳作用方面。

国外的一些学者通过分析不同海区贝壳礁诱集鱼类胃含物中生物种类的差异,推测海水盐度差异是影响贝壳礁生物诱集效果的重要因素^[46-47]。佐藤朱美等^[26]分析了扇贝壳礁降低水体污染和底质污染的能力,发现贝壳礁附着干质量为 1 g 钩虾类去除水体有机物的能力可达到 $20 \text{ mg C}/(\text{g} \cdot \text{d})$ 、 $0.327 \text{ mg N}/(\text{g} \cdot \text{d})$ 。岡本健太郎等^[28]研究表明,扇贝壳礁主要通过固着附着生物、诱集鱼类等的摄食行为,固定碳元素和氮元素的速率分别达到 $2273.9 \text{ mg C}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 和 $273.0 \text{ mg N}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。

Arve^[22]研究表明,牡蛎贝壳礁区所聚集的鱼类明显多于非礁区的鱼类,并且投放时间为 2 年的礁体比 1 年的礁体具有更大的食物存储潜力,能够吸引更多鱼类。Warren 等^[53]研究显示,相对于混凝土鱼礁,牡蛎贝壳礁对鱼类有更好的诱集效果。奥村重信等^[24]研究发现,扇贝壳礁区幼鱼的捕获率较高,说明贝壳礁具有很好的饵料效应,并且能够为幼鱼提供避敌、栖息场所。青山智等^[27]研

究显示,扇贝壳礁区的保卵效果是非礁区的 2.8 倍,且贝壳礁结构越复杂对鱼卵及幼鱼的保护效果越好。佐藤朱美等^[26]分析了扇贝壳礁区底栖生物的种类、数量和生物量指标,并得出底栖生物是贝壳礁发挥净化水体与底质的重要原因。岡元節雄等^[54]通过分析扇贝壳礁附着生物种类、数量、食性等指标,并与石块礁体进行对比,发现扇贝壳礁具有更好的生物聚集效果。贝壳礁能够为龙虾生长、摄食和繁殖提供良好的环境条件,藤澤真也等^[5]也采用贝壳礁作为龙虾的饵料培养基,结果显示,贝壳礁区龙虾产量大幅上升。岡本健太郎等^[28]对扇贝壳礁进行研究,结果表明,扇贝壳礁具有很好的生物附着效果,同时也为鱼类等提供了良好的产卵场。

Zhang 等^[55]、Xu 等^[56]分别对浅海网袋型牡蛎贝壳礁的海参增殖效果及其底栖生物进行了试验研究,结果表明,牡蛎贝壳礁能够促进海参的增殖,但是在较小的时间尺度内对底栖生物群落结构的影响不显著。张立斌^[57]估算了用于增殖刺参的贝壳礁单位面积固碳量可达 $2.70 \text{ kg}/\text{m}^2$,相当于构建 1110 hm^2 的热带雨林所产生的生态效益。王洪瑞等^[29]利用袋装扇贝壳礁进行刺参增殖,每年每 667 m^2 海域纯收益可达 $12\ 850 \sim 13\ 850$ 元。徐增勤^[58]对牡蛎壳贝壳礁刺参增殖生态效应进行评估,得出牡蛎壳贝壳礁平均生态系统服务价值为 $1291 \text{ 万元}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,包括直接使用价值(供给服务)为 $939 \text{ 万元}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,间接使用价值(调节服务、文化服务)为 $351 \text{ 万元}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。

国内外研究表明,浅海贝壳礁以具有不规则表面形态的贝壳制作,能有效增加礁体的生物附着量,改良海区海洋生态环境,增加水域生产力,提高海洋生态系统服务价值,为鱼类等游泳生物提供优良的栖息、产卵、避敌场所,加速有机物的积累和循环,提高海洋固碳能力,有效促进参鲍等海珍品的增殖。

相对于国外,中国浅海贝壳礁生态效应的研究主要集中于黄渤海海参等海珍品的增殖效果评价和固碳作用的探索等,在海洋环境修复效应、生物附着与聚集效应等方面的研究鲜有涉及,将是中国贝壳礁的建设发展方向。

4 展望

4.1 利用废弃贝壳建设贝壳礁的生态效应预测

目前,贝壳礁建设主要使用扇贝壳和牡蛎壳,

根据 2013 年中国渔业年鉴提供的牡蛎与扇贝产量^[1], 并参考深圳杨梅坑人工鱼礁区的布局方案^[59], 以 20 cm×20 cm 方形混凝土梁柱框架固制贝壳礁单体的规格为 3 m×3 m×3 m, 贝壳装量按贝壳礁体积的 90% 计算, 构建 1 个贝壳礁单体需要贝壳 24.3 m³。按照此贝壳礁构建模式, 参考王洪瑞等^[29]、徐增勤^[58]和秦传新等^[59]分别对扇贝壳礁、牡蛎贝壳礁和混凝土人工鱼礁海洋生态系统服务价值的计算方法, 构建以下计算公式, 对利用废弃贝壳建设贝壳礁可形成的海洋生态系统服务价值等方面进行预测, 即:

单体贝壳礁数量为

$$N = P \times (1 - i) / (\rho \times V), \quad (1)$$

牡蛎贝壳礁海洋生态系统的服务价值为

$$V = 0.1 \times M_1 + 0.9 \times M_2, \quad (2)$$

扇贝壳礁海洋生态系统的服务价值为

$$V = 0.1 \times M_1 + 0.9 \times M_3, \quad (3)$$

清理废弃贝壳堆积填埋占地的面积为

$$S = P \times (1 - i) / (\rho \times h)。 \quad (4)$$

其中: P 为贝类产量; i 为贝类出肉率, 牡蛎和扇贝的出肉率分别取 15.5%^[60]、36.7%^[61]; ρ 为贝

壳堆积密度, 牡蛎壳、扇贝壳堆积密度分别取 404.4 kg/m³^[59]、4.17 kg/m³^[29]; V 为贝壳礁单体体积; M_1 为混凝土人工鱼礁生态系统服务价值, $M_1 = 1715$ 万元/(km²·a)^[58], M_2 为牡蛎贝壳礁系统生态服务价值, $M_2 = 1291$ 万元/(km²·a)^[58], M_3 为扇贝壳礁系统生态的服务价值, $M_3 = 2003$ 万元/(km²·a)^[29]; h 为陆地贝壳堆积高度, 取 $h = 1$ m。

根据公式, 仅利用中国 2012 年养殖牡蛎和扇贝废弃贝壳, 就可构建单体贝壳礁 338.9 万个, 可建贝壳礁礁区约 24 461.9 km², 其生态调控区面积可达 64 854 km², 平均生态系统服务价值可达 1653 万元/(km²·a), 高于全球近海生态系统服务价值平均值 2.48 万元/(km²·a)^[62] (按汇率 1 美元 = 6.1238 元人民币计算); 另外, 可清理陆地废弃贝壳堆积面积 803.1 km², 或者可减少陆地废弃贝壳填埋体积 8.031×10⁸ m³ (表 1)。

可见, 利用废弃贝壳建设贝壳礁, 无论是在解决陆地大量废弃贝壳堆积填埋占地和废弃贝壳老化分解污染环境等问题方面, 还是在变废为宝形成海洋生态系统服务价值方面, 作用是巨大的。

表 1 利用中国 2012 年养殖牡蛎和扇贝废弃贝壳建设贝壳礁的生态效应预测

Tab. 1 Ecological effect prediction of artificial shell reefs built by discarded farmed oyster and scallop shells in China in 2012

种类 species	养殖产量 aquaculture production/ 万 t	出肉率 soft part rate/ %	贝壳产量 shell production/ 万 t	贝壳堆积密度 shell bulk density/ (kg·m ⁻³)	贝壳礁单体数量 number of monomer shell reef/ 万个	陆地堆积面积 accumulation area/ km ²	礁区面积 reef area/ km ²	生态调控区面积 ecological control area/ km ²	生态系统服务价值 ecosystem services value/ (万元·km ⁻² ·a ⁻¹)
牡蛎 oyster	395	15.5	334	4.17	329.7	800.9	23800	63100	1333
扇贝 scallop	142	36.7	90	404.4	9.17	2.2	661.9	1754	1973
合计 total	537	—	427	—	338.9	803.1	24461.9	64854	—

4.2 贝壳礁发展展望

人工鱼礁能够修复海洋生态环境, 养护海洋渔业资源。贝壳礁作为人工鱼礁投入建设和使用, 能够降低人工鱼礁建设成本, 促进生态渔业和生态旅游的发展, 发挥蓝色碳汇的功能, 满足保护海洋环境和可持续发展的需求。

以废弃贝壳作为贝壳礁材料具有以下优点:

(1) 来源广, 易获得, 建设投资少; (2) 具有良好的生物亲和性, 不会释放碱性物质^[63]; (3) 表面结构复杂, 粗糙度高, 能为附着生物提供良好附着基, 充分发挥固碳能力; (4) 贝壳礁生态系统更早达到稳定阶段, 有利于发挥人工鱼礁生态效应、修复海洋生态环境。因此, 利用废弃贝壳建设贝壳礁, 是使用生物材料进行海洋生态修复的低碳环保

行为, 是值得大力推广和发展的生态环保措施。

但是, 中国的贝壳礁无论是建设还是研究均处于起步阶段, 科技支撑力量不足, 科研投入少。在贝壳礁的选材处理、礁型设计制作、礁区布局投放、海洋环境调控功能、生物附着效果、渔业资源增殖效果、贝壳礁建设与天然牡蛎礁生态修复结合、休闲渔业开发等方面, 需要进一步加大投入, 加强研究。

参考文献:

- [1] 农业部渔业局. 中国渔业年鉴 2013 [M]. 北京: 中国农业出版社 2013: 165.
- [2] 徐文其, 沈建. 中国贝类前处理加工技术研究进展 [J]. 南方水产科学 2013, 9(2): 76-79.

- [3] 陈心,冯全英,邓中日.人工鱼礁建设现状及发展对策研究[J].海南大学学报:自然科学版,2006,24(1):83-88.
- [4] 杨咨,刘同渝.我国人工鱼礁种类的划分方法[J].渔业现代化,2005(6):22-25.
- [5] 藤澤真也,片山貴之,片山真基,等.廃棄貝殻を利用したイセエビの増殖施設の開発[J].海洋開発論文集,2007,23:585-590.
- [6] 孙汝增.贻贝壳在饲料上的应用初探[J].饲料工业,1993,14(4):18.
- [7] 许永安.国内外贝类加工流通研究动态[J].福建水产,2007,26(2):58-63.
- [8] Piazza B P, Banks P D, Lapeyre M K. The potential for created oyster shell reefs as a sustainable shoreline protection strategy in Louisiana[J]. Restoration Ecology, 2005, 13(3): 499-506.
- [9] Quan W M, She X Q, Luo M B, et al. Ecological function and restoration measures of oyster reef in estuaries[J]. Chinese Journal of Ecology, 2006, 25(10): 1234-1239.
- [10] 张雷,路春美,程世庆.贝壳类新型钙基脱硫剂的试验研究[J].环境科学学报,2003,23(5):648-651.
- [11] 王金华,胡宗玢.一种以贝壳为骨料的混凝土:中国,CN1388081A[P].2003-01-01.
- [12] 王卓,王金华,梁书琴,等.一种以贝壳和废灰渣为原料的小型混凝土砌块:中国,610134269.4[P].2006-11-14.
- [13] Heffernan T L. Development of an artificial oyster reef in Aransas Bay Texas game and fish commission[R]. Marine Fisheries Project Report. Washington D.C.: Department of Environment, 1961.
- [14] Heffernan T L. Computation analysis and preparation of coastwide oyster population data——survey of oyster population and associated organisms[R]. Marine Fisheries Project Report. Washington D.C.: Department of Environment, 1963.
- [15] 刘国山,江曙光.在临港工业区开展海岸生态修复的设想——以牡蛎修复和大型海藻修复为例[J].天津水产,2010(4):12-23.
- [16] Borde A B, Rourke L K O, Thom R M, et al. National review of innovative and successful coastal habitat restoration[M]. Washington: Battelle Marine Sciences Laboratory, Sequim, 2004.
- [17] Piazza B P, Banks P D, La Peyre M K. The potential for created oyster shell reefs as a sustainable shoreline protection strategy in Louisiana[J]. Restoration Ecology, 2005, 13(3): 499-506.
- [18] 中国网络电视台. 志愿者欲重建墨西哥湾牡蛎礁[EB/OL]. [2011-01-28]. <http://news.cntv.cn/20110128/104089.shtml>.
- [19] Scyphers S B, Powers S P, Heck Jr K L, et al. Oyster reefs as natural breakwaters mitigate shoreline loss and facilitate fisheries[EB/OL]. [2011-06-11]. PLoS One, 2011, 6(8): e22396.
- [20] Soniat T M, Finelli C M, Ruiz J T. Vertical structure and predator refuge mediate oyster reef development and community dynamics[J]. Exp Mar Biol Ecol, 2004, 310(2): 163-182.
- [21] Ansley H, Bailey C M, Bedford D. Guidelines for marine artificial reef materials—second edition[M]. Washington D.C.: Artificial Reef Subcommittees, The Atlantic and Gulf States Marine Fisheries Commission, 2004.
- [22] Arve J. Preliminary report on attracting fish by oyster-shell planting in Chincoteague Bay, Maryland[J]. Chesapeake Science, 1960, 1(1): 58-65.
- [23] 刘惠飞.日本人工鱼礁建设的现状[J].现代渔业信息,2001,16(12):15-16.
- [24] 奥村重信,萱野泰久,草加耕司,等.ホタテガイ貝殻を利用した人工魚礁へのキジハタ幼魚の放流実験[C].水産科学学会,2003,69(6):917-925.
- [25] 村上俊哉,武田史絵,太田義高,等.石油精製副産物である硫黄を活用した水産増殖資材(レコサル藻礁)についての評価[J].海洋開発論文集,2007,23:441-446.
- [26] 佐藤朱美,牧田佳巳.ホタテ貝殻礁の底質浄化能力に関する現地実験[J].海岸工学論文集,2007,54:1276-1280.
- [27] 青山智,藤澤真也,瀧岡仁志,等.貝殻を利用した幼稚魚保護育成施設の開発[J].海洋開発論文集,2008,24:321-326.
- [28] 岡本健太郎,山本潤.ホタテ貝殻礁による効果の持続性とナマコ中間育成場としての検討[J].土木学会論文集,2011,67(2):388-393.
- [29] 王洪瑞,吴明月,马克武,等.扇贝壳装袋筑礁养殖刺参技术[J].齐鲁渔业,2006,23(12):26.
- [30] 王雪瑞.贝壳装包造礁底播海参养殖试验[J].河北渔业,2009(1):33.
- [31] 于沛民,张秀梅.日本美国人工鱼礁建设对我国的启示[J].渔业现代化,2006(2):6-7.
- [32] 姜少杰,王伟定,胡庆松,等.一种贝壳方礁的制备方法:中国,CN102217565A[P].2011-10-19.
- [33] 刘国山,张沛东,张秀梅,等.一种苗绳-贝壳复合式人工藻礁:中国,CN102405868A[P].2011-11-07.
- [34] 田涛,陈勇,刘永虎,等.饵料培养型贝壳混凝土礁:中国,CN200920351739.1[P].2011-07-13.
- [35] 杨红生,张立斌,张涛,等.一种以牡蛎壳为材料的刺参养殖海珍礁及其增殖方法:中国,ZL200910017420.X[P].2011-05-11.
- [36] 杨红生,张立斌,曲光伟,等.一种牡蛎壳海珍礁的配套制作装置及其使用方法:中国,ZL201010113501.2[P].2011-05-11.
- [37] 李国迎,陈丕茂,王莲莲,等.一种方形笼式增殖贝壳人工鱼礁:中国,ZL201320584450.0[P].2014-04-09.
- [38] 李国迎,陈丕茂,王莲莲,等.一种抗沉陷三角型网状贝壳人工鱼礁:中国,ZL201320584924.1[P].2014-04-09.
- [39] 王莲莲,陈丕茂,黎小国,等.一种三角柱状人工鱼礁:中国,ZL201420158604.4[P].2014-04-01.
- [40] 王莲莲,陈丕茂,黎小国,等.一种可用于海藻附着的抗风浪贝壳礁:中国,ZL201420158609.7[P].2014-04-02.
- [41] 王莲莲,陈丕茂,黎小国,等.一种可提供较好阴影效应的贝壳礁:中国,ZL201420155590.0[P].2014-04-01.
- [42] 王莲莲,陈丕茂,黎小国,等.一种可提供较好流场效应的贝壳礁:中国,ZL201420155524.3[P].2014-04-02.
- [43] Szedlmayer S T, Howe J C. Substrate preference in age-0 red snapper *Lutjanus campechanus* [J]. Environmental Biology of Fishes, 1997, 50: 203-207.
- [44] Coena L D, Luckenbach M W. Developing success criteria and goals for evaluating oyster reef restoration: ecological function or resource exploitation? [J]. Ecological Engineering, 2000, 15(3/4): 323-343.
- [45] Walters K, Coen L D. A comparison of statistical approaches to

- analyzing community convergence between natural and constructed oyster reefs [J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 2006 330(1): 81-95.
- [46] Harding J M ,Mann R. Diet and habitat use by bluefish *Pomatomus saltatrix* in a Chesapeake Bay estuary [J]. *Environmental Biology of Fishes* 2001 60: 401-409.
- [47] Harding J M. Temporal variation and patchiness of zooplankton around a restored oyster reef [J]. *Estuaries* ,2001 ,24(3) : 453-466.
- [48] Yeager L A ,Layman C A. Energy flow to two abundant consumers in a subtropical oyster reef food web [J]. *Aquat Ecol* ,2011 45: 267-277.
- [49] Peterson C H ,Grabowski J H ,Powers S P. Estimated enhancement of fish production resulting from restoring oyster reef habitat: quantitative valuation [J]. *Marine Ecology Progress* ,2003 ,264: 249-264.
- [50] 陈亚瞿 ,施利燕 ,全为民 等. 长江口生态修复工程底栖动物群落的增殖放流及效果评估 [J]. *渔业现代化* ,2007(2) : 35-39.
- [51] 王在峰 ,刘晴 ,徐敏 等. 海口市蚶峙山牡蛎礁海洋特别保护区生态系统健康评价 [J]. *生态与农村环境学报* ,2011 ,27(2) : 21-27.
- [52] 孙万胜 ,温国义 ,白明 等. 天津大神堂浅海活牡蛎礁区生物资源状况调查分析 [J]. *河北渔业* ,2014(9) : 23-26.
- [53] Warren J ,McCall R ,Hendon L ,et al. Assessment and monitoring of artificial inshore low profile reefs located adjacent to Mississippi's coastal marshes [R]//Final Report Submitted to Mississippi Department of Marine Resources. Washington D. C.: Department of Environment 2000: 279.
- [54] 岡元節雄 ,岩田真 ,松野健. 白老港に設置したホタテ貝殻礁の生物増集効果 [C]//北海道開発技術研究発表会 ,2012 ,第55回(平成23年度).
- [55] Zhang L B ,Zhang T ,Xu Q Z ,et al. An artificial oyster-shell reef for the culture and stock enhancement of sea cucumber *Apostichopus japonicus* in shallow seawater [J]. *Aquaculture Research* ,2014 45(1) : 1-10.
- [56] Xu Q Z ,Zhang L B ,Zhang T ,et al. Effects of an artificial oyster shell reef on macrobenthic communities in Rongcheng Bay ,East China [J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology* ,2014 ,32(1) : 99-110.
- [57] 张立斌. 几种典型海域生境增殖设施研制与应用 [D]. 青岛: 中国科学院研究生院(海洋研究所) 2010.
- [58] 徐勤增. 牡蛎壳人工礁生态效应与生态系统服务价值评价 [D]. 青岛: 中国科学院研究生院(海洋研究所) 2013.
- [59] 秦传新 ,陈丕茂 ,贾小平. 人工鱼礁构建对海洋生态系统服务价值的影响——以深圳杨梅坑人工鱼礁区为例 [J]. *应用生态学报* 2011 22(8) : 2160-2166.
- [60] 王庆志 ,李琪 ,刘世凯 等. 长牡蛎成体生长性状的遗传参数估计 [J]. *中国水产科学* ,2012 ,19(4) : 700-706.
- [61] 丁君 ,常亚青 ,张晴. 虾夷扇贝“象牙白”品系与普通品系营养成分分析及评价 [J]. *中国农业科技导报* ,2011 ,13(2) : 121-128.
- [62] Costanza R. The value of ecosystem service [J]. *Ecological Economics* ,1998 25: 1-2.
- [63] 王志强. 混凝土表面泛碱防治措施浅析 [J]. *中国科技信息* ,2010: 73.

A review: research progress of construction and ecological effect of artificial shell reefs

WANG Lian-lian^{1,2} , CHEN Pi-mao¹ , CHEN Yong² , LUO Hong-xia^{1,3}

(1. Scientific Observing and Experimental Station of South China Sea Fishery Resources and Environment , Ministry of Agriculture , Key Laboratory of Marine Ranching Technology , South China Sea Fisheries Research Institute , Chinese Academy of Fishery Sciences , Guangzhou 510300 , China; 2. Center for Marine Ranching Engineering Science Research of Liaoning , Dalian Ocean University , Dalian 116023 , China; 3. College of Marine Sciences , Shanghai Ocean University , Shanghai 201306 , China)

Abstract: Construction of artificial reefs using shells , by-products in aquaculture , can not only protect the marine environment and fisheries resources , but also solve the problems caused by stacking , backfilling and decomposition of large numbers of discarded shells. The utilization of shells , and current development and ecological efficiency of artificial shell reefs are described from development history of both intertidal and neritic artificial shell reefs , and a reasonable way to predict the value of marine artificial shell reef ecosystem service and its development prospects are discussed. The further study on shell reef constructions is suggested via increasing research investments in many aspects and exploiting the advantages of shell reefs.

Key words: artificial shell reef; discarded shell; epiphyte; ecological effect