

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*

李 娇 公丕海 关长涛^① 刘 毅

(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 碳汇渔业实验室 青岛 266071)

摘要 本研究将农渔废弃物(花生秸秆和海湾扇贝壳)作为鱼礁材料添加物,利用礁体自身碳封存增加人工鱼礁碳汇潜能的可行性,并通过研究礁体附着生物的变化特征,探讨礁体材料添加物对人工鱼礁生态系统生物固碳的影响。结果显示,实验海区礁体附着生物的优势种为褶牡蛎(*Ostrea plicatula* Gmelin),添加了花生秸秆和海湾扇贝壳的人工鱼礁并未显著增加褶牡蛎的附着量($P>0.05$)。通过对添加物礁体自身碳封存量的计算,海湾扇贝壳添加物单位实验礁的最小碳封存量为 104.13 kg,最大碳封存量为 260.32 kg;花生秸秆添加物单位实验礁的最小碳封存量为 296.28 kg,最大碳封存量为 740.70 kg;实验礁体添加物的总碳封存量达 2802.87 kg。以此估算,如将实验所在的 66.67 hm² 礁区已投放的圆管型混凝土礁材料加入添加物,以海湾扇贝壳替代率为 10%计算,至少可完成 52040.00 kg 碳的封存,以花生秸秆替代率为 25%计算,礁体自身的碳封存量可达 370350.00 kg。

关键词 人工鱼礁;碳封存;花生秸秆;海湾扇贝壳;附着生物

中图分类号 S953.1 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2016)06-0100-05

海洋作为一个巨大的碳汇、气-海界面的“溶解泵”和海洋生物的“生物泵”,影响全球碳循环并完成碳的传输和固定。每年海洋生物光合作用吸收的碳约占全球生物光合作用吸收碳的 55% (Falkowaki *et al.*, 2004; Arrigo *et al.*, 2005; Simon *et al.*, 2009; Bowler *et al.*, 2009), 渔业捕捞和水产增养殖则将大量碳以产品的形式捕获,为人类提供营养物质的同时实现碳移出。人工鱼礁增养殖业通过投放人工构造物为水生生物提供适宜的栖息地,礁区增养殖生物以海区自然饵料为食,无须人工投喂,既不会造成养殖污染又可逐步修复生态环境,增殖渔业资源,提高海洋生物的经济价值和海区的生物碳汇功能。人工鱼礁生态系统中的鱼礁材料可实现碳封存,生态系统环境的改善可提升礁

区的初级生产力,增加光合作用的固碳量,并为其他海洋生物提供丰富的饵料,使礁区渔业资源种类和生物量得到恢复,最终通过经济性渔业资源的捕获实现碳移出。但目前,国内外在人工鱼礁生态系统碳汇机理方面的研究非常匮乏。本研究利用在混凝土礁体材料中添加农渔生产中废弃物秸秆和贝壳,探讨增加礁体自身碳封存作用的可行性和潜能,并通过鱼礁海区投放、礁体生物取样和实验室生物元素检测、种类鉴定及生物量测量等实验手段,分析并对比材料添加物礁体和普通混凝土礁体对生物附着的影响。相关研究表明,2014 年全国秸秆资源的产量达 8 亿 t,秸秆资源目前主要的利用方式有能源、饲料、基料和肥料,但每年因过剩秸秆焚烧导致的环境污染仍影响着人

* 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(2016HY-ZD0103)资助。李 娇: E-mail: lijiao@ysfri.ac.cn。

① 通讯作者: 关长涛, 研究员, E-mail: guanct@ysfri.ac.cn

收稿日期: 2015-12-25, 收修改稿日期: 2016-01-27

们的身体健康和日常生活(韩鲁佳等, 2002; 张强等, 2015; Cao *et al.*, 2008; Wei *et al.*, 2013); 作为贝类养殖大国, 我国每年的贝类产量约占全球总产量的 50%, 而贝壳的利用率却非常低, 由此造成的土地占用和环境污染已成为养殖沿岸面临的主要环境问题(李金志等, 2011; 王金华等, 2003; 姜少杰等, 2001)。本研究选取花生秸秆和海湾扇贝壳作为礁体材料添加物并进行再利用, 不仅可以节约制作成本, 降低秸秆燃烧造成的碳排放, 还可在一定时期内实现碳封存的作用。

1 材料与方法

1.1 鱼礁制作与投放

实验礁选用山东沿海常用的增殖型圆管礁(图 1), 礁体主尺度直径为 48 mm, 高为 90 mm, 厚度为 4 mm, 空方量为 0.16 m³/ind。常规圆管型增殖礁的制作材料是水泥、砂子、石子和石粉, 实验礁以海湾扇贝壳粉和花生秸秆粉为材料添加物, 按一定比例取代石粉(刘殿忠等, 2010; Yang *et al.*, 2009)。添加物混凝土预制件的制备符合相关规范和标准(中华人民共和国住房和城乡建设部, 2011、2008; 国家能源局, 2002; 中华人民共和国建设部国家质量监督检验检疫总局, 2010), 强度不低于 C20, 制作材料配合比例见表 1。从表 1 可以看出, 材料配比完成后, 利用特制的圆管礁模具完成礁体的浇筑, 成型后的礁体经过洒水、晾晒, 待完全凝固后开始在海区投放。每种添加物礁体各制作 250 个, 并由材料相同的 250 个礁体组成一个单位礁, 单位礁体积为 40 空/m³, 间距为 30 m。2012 年 4 月完成全部鱼礁的海区投放, 投放站位见表 2。



图 1 增殖型圆管礁

Fig.1 Stock enhancement type of tubular artificial reef

1.2 样品处理

分别于 2012 年 6 月、2013 年 4 月、8 月和 2014 年 4 月、8 月, 在山东莱州金城海区投放实验鱼礁, 对 9 种鱼礁附着生物进行调查取样, 其中, 2012 年 6 月取样时未见附着生物。每种添加物鱼礁均随机起吊 3 个进行礁体取样, 取样框尺寸为 20 cm×20 cm, 将取样框内鱼礁表面的礁体附着生物完全采集, 然后封装、标记, 放入保鲜箱中暂存。样品带回实验室后需进行分类、清洗, 贝壳和软体分离、烘干、测定干重、研磨, 最后采用元素分析仪分别测定软体部和贝壳 C、N 元素的含量。

1.3 固碳潜能估算方法

人工鱼礁生态系统的碳汇机理是一个复杂的生物地球化学过程, 李娇等(2013) 根据海区实验结果,

表 1 礁体材料和添加物比例
Tab.1 Reef material and proportion of additives

添加物种类 Category of additive	编号 Number of reef	水泥 Cement (kg)	砂 Sand (kg)	石 Stone (kg)	石粉 Powder of stone (kg)	添加物替代率 Substitution rate of additive (%)	添加物重量 Mass of additive (kg)
海湾扇贝壳 <i>Argopecten irradians</i> shell	B1	17	36	36	32.4	10	3.6
	B2	17	36	36	30.6	15	5.4
	B3	17	36	36	28.8	20	7.2
	B4	17	36	36	27.0	25	9.0
花生秸秆 Peanut straw	J1	17	36	36	32.4	10	3.6
	J2	17	36	36	30.6	15	5.4
	J3	17	36	36	28.8	20	7.2
	J4	17	36	36	27.0	25	9.0
无 None	SN	17	36	36	36.0	0	0

表2 实验礁体投放站位地理坐标

Tab.2 Geographic coordinate of experimental reefs deployed

礁体类型 Type of reef	试验礁编号 Number of reef	东经(E) Longitude(E)	北纬(N) Latitude(N)
海湾扇贝壳礁体 <i>A. irradians</i> shell reef	B1	120°03'48.24"	37°26'32.88"
	B2	120°03'46.98"	37°26'32.70"
	B3	120°03'45.78"	37°26'32.58"
	B4	120°03'48.42"	37°26'31.86"
花生秸秆礁体 Peanut straw reef	J1	120°03'47.22"	37°26'31.74"
	J2	120°03'45.96"	37°26'31.56"
	J3	120°03'44.76"	37°26'31.44"
	J4	120°03'43.56"	37°26'31.32"
常规礁体 Regular reef	SN	120°03'42.30"	37°26'31.14"

对礁体附着生物和礁体材料添加的固碳量进行估算, 计算公式如下:

$$C_B = C_S \times E_S + C_O \times E_O \quad (1)$$

$$C_T = \rho \times V \times C_R \quad (2)$$

式中, C_B 为附着褶牡蛎(*Ostrea plicatula*)的总固碳量, C_S 为褶牡蛎的壳体碳含量, E_S 为褶牡蛎的壳体总重, C_O 为褶牡蛎软体部碳含量, E_O 为附着褶牡蛎的软体部总重。 C_T 为礁体总固碳量, C_R 为礁体添加物碳含量, V 为添加物体积, ρ 为添加物密度。

2 结果与分析

2.1 礁体附着生物的分类和鉴定

通过礁体起吊观测和附着生物取样, 共鉴定出30种附着生物, 包括16种多毛类, 占53.3%; 软体类7种, 占23.3%; 甲壳类6种, 占20%; 附着植物1种, 占3.3%。多毛类中优势种是管栖性的盘管虫属(*Hydroides*), 甲壳类没有明显的优势种类, 附着植物以江篱(*Gracilaria confervoides*)为主, 褶牡蛎是软体类中的优势种, 同时是所有附着生物中的绝对优势种, 占礁体附着生物总生物量的99.7%。礁体附着生物观测显示, 绝大多数褶牡蛎的软体部脱落, 少量附着褶牡蛎含有非常小的软体部, 因此, 通过研究褶牡蛎壳

体的变化、分布, 分析材料添加物对礁体褶牡蛎附着的影响。

2.2 材料添加物礁体的附着褶牡蛎壳体碳含量测定及其变化

利用元素分析仪测得海湾扇贝壳体碳含量平均值为(11.57±0.04)%, 花生秸秆碳含量平均值为(32.92±0.62)%。表3为不同添加物和配合比礁体附着褶牡蛎的壳体平均碳含量。SPSS17.0 差异显著性检验及相关分析结果显示, 不同材料添加物和配合比礁体附着褶牡蛎壳体的碳含量差异不显著($P>0.05$)。不同添加物和配合比礁体附着褶牡蛎壳体干重变化统计显示(图2、表4), 褶牡蛎壳干重在同一取样时间也没有显著差异($P>0.05$), 说明礁体材料添加物对附着褶牡蛎的生长没有明显的影响; 相同添加物和配合比礁体的附着褶牡蛎壳干重有显著的季节变化($P<0.01$), 并随着投放时间的积累呈现增加的趋势。其中, 2014年4月的褶牡蛎壳干重略低于2013年12月, 这与公丕海等(2014)研究的每年4月取样褶牡蛎壳干重低于上一年12月相一致, 并符合范昌福等(2012)提出的渤海湾西岸牡蛎(*Ostrea gigas*)停止分泌壳体的最低平均水温为5.5℃的生长特性。根据2011–2014年对实验海区生态环境跟踪监测的数据, 4个年度12月底和3月下旬的底层海水温度均低于5℃, 因此, 壳体停止分泌, 褶牡蛎死亡和环境外力引起的壳体脱落等原因造成壳体干重在4月略低于上一年的12月。

2.3 添加物礁体碳封存量和潜能估算

添加物礁体碳封存量及实验礁总碳封存量见表5。从表5可以看出, 实验用海湾扇贝壳体碳含量平均值为11.57%, 花生秸秆碳含量平均值为32.92%, 单个贝壳添加物礁体的最小碳封存量为0.41652 kg, 最大碳封存量为1.0413 kg。单个花生秸秆添加物礁体的最小碳封存量为1.18512 kg, 最大碳封存量为2.96280 kg。本研究中单位鱼礁由250个单体鱼礁组成, 贝壳添加物

表3 不同添加物和配合比礁体附着褶牡蛎的壳体平均碳含量

Tab.3 Average carbon content of *O. plicatula* shell adhering to reefs with different additive types and proportions (%)

礁体编号 Number of reef	B1	B2	B3	B4	J1	J2	J3	J4	SN
碳含量分布 Range of carbon content	10.56–11.03	10.41–11.20	10.75–11.16	10.45–11.12	10.70–11.48	10.26–11.48	10.51–11.29	10.30–11.14	10.37–11.18
平均碳含量 Average carbon content	10.79±0.19	10.78±0.32	10.92±0.18	10.87±0.30	11.09±0.32	11.11±0.40	11.00±0.35	10.81±0.36	10.82±0.34

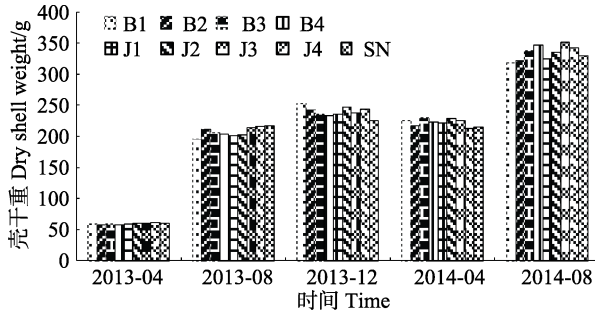


图 2 附着褶牡蛎壳干重的年季变化

Fig.2 Seasonal and annual weight variation of *O. plicatula* shell adhering to reefs

单位礁体的最小碳封存量为 104.13 kg、2.60 kg/空·m³、最大碳封存量为 260.33 kg、6.51 kg/空·m³；花生秸秆添加物单位礁体的最小碳封存量为 296.28 kg、7.41 kg/空·m³，最大碳封存量为 740.70 kg、18.52 kg/空·m³；实验礁体添加物的总碳封存量达 2802.87 kg，平均碳封存量为 8.76 kg/空·m³。

本研究选择的海区截至 2011 年已完成 66.67 hm² 海洋牧场的投建，共投放圆管型单位鱼礁 500 座，每个单位礁由 250 个单体鱼礁组成，圆管礁均采用普通

混凝土构件制作材料，如果在礁体材料中加入添加物，以海湾扇贝壳替代率 10% 计算，可完成 52040.00 kg 碳的封存，以花生秸秆替代率 25% 计算，66.67 hm² 海洋牧场礁体自身的碳封存量可达 370350.00 kg。

3 结论

研究结果显示，花生秸秆和海湾扇贝壳的添加物在扩增礁体附着褶牡蛎生物固碳方面没有明显优势 ($P>0.05$)；但添加物可有效提高礁体自身的碳封存能力，贝壳添加物单位实验礁的最小碳封存量为 104.13 kg，最大碳封存量为 260.33 kg；花生秸秆添加物单位实验礁的最小碳封存量为 296.28 kg，最大碳封存量为 740.70 kg；实验礁体添加物的总碳封存量达 2802.87 kg。通过对材料添加物混凝土礁体的试制和海区实测，本研究验证了以花生秸秆和海湾扇贝壳作为添加物制作礁体的可行性，为利用人工鱼礁的制作和投放来实现对废弃物资源中碳的封存提供了有效方法，而材料添加物的使用不仅可以通过礁体的海底投放来完成碳封存，同时节约鱼礁成本，实现废弃资源的循环再利用，为生态型鱼礁材料的开发利用提供了依据。

表 4 不同添加物和配合比礁体附着褶牡蛎壳体干重分布

Tab.4 Dry weight of *O. plicatula* shell adhering to reefs with different additive types and proportions

编号 Number	采样时间 Sampling time				
	2013-04	2013-08	2013-12	2014-04	2014-08
B1	58.90±1.53	196.30±22.86	253.30±12.19	225.40±11.62	319.00±15.19
B2	58.40±3.08	212.00±13.20	243.20±6.26	218.00±18.46	323.00±5.71
B3	59.60±2.32	206.60±12.57	236.60±31.94	230.00±7.53	339.00±25.91
B4	58.00±1.69	204.10±7.96	234.50±18.35	223.20±7.91	347.50±27.30
J1	59.80±1.74	201.40±17.23	235.90±18.17	222.50±6.85	325.70±17.97
J2	60.30±3.20	203.30±7.32	248.20±19.40	229.90±15.18	335.80±21.20
J3	61.00±1.27	214.90±5.99	239.00±37.96	226.50±19.27	352.20±16.30
J4	61.60±1.17	217.30±17.80	244.30±22.55	213.00±6.53	343.70±27.35
SN	60.90±3.09	217.70±14.35	225.90±28.10	215.40±14.29	331.00±27.14

表 5 礁体添加物固碳量及实验礁体总固碳量

Tab.5 Carbon fixed by additives and its total amount fixed by experimental reefs

编号 Number	添加物种类及碳含量 Category and carbon content of additive	添加物重量 Mass of additive (kg)	单个礁体固碳量 Carbon fixed by single reef (kg)	单位礁体固碳量 Carbon fixed by unit reef (kg)	总固碳量 Total carbon fixed (kg)
B1	海湾扇贝壳 11.57%	3.6	0.42	104.1	2802.9
B2	<i>A. irradians</i> shell 11.57%	5.4	0.63	156.2	
B3		7.2	0.83	208.3	
B4		9.0	1.04	260.3	
J1	花生秸秆 32.92%	3.6	1.19	296.3	
J2	Peanut straw 32.92%	5.4	1.11	444.4	
J3		7.2	2.37	592.6	
J4		9.0	2.96	740.7	
SN	无 None	0	0	0	0

参 考 文 献

- 中华人民共和国住房和城乡建设部. 普通混凝土混合比设计规程(JGJ55-2011). 北京: 中国建筑工业出版社, 2011
- 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国建设部国家质量监督检验检疫总局. 混凝土结构耐久性设计规范(GB/T50476-2007). 北京: 中国建筑工业出版社, 2008
- 中华人民共和国建设部国家质量监督检验检疫总局. 混凝土强度检验评定标准(GB50107-2010). 北京: 中国建筑工业出版社, 2010
- 公丕海, 李娇, 关长涛, 等. 莱州湾增殖礁附着牡蛎的固碳量试验与估算. 应用生态学报, 2014, 25(10): 3032-3038
- 王金华, 胡宗玢. 一种以贝壳为骨料的混凝土. 专利号: CNB88081A, 2003
- 李娇, 关长涛, 公丕海, 等. 人工鱼礁生态系统碳汇机理及潜能分析. 渔业科学进展, 2013, 24(1): 65-69
- 李金志. 贝壳的综合利用. 淮海工学院学报, 2001, 10(s1): 22-23
- 刘殿忠, 于莹, 夏法磊, 等. 秸秆混凝土配合比设计. 吉林建筑工程学院学报, 2010, 27(1): 19-21
- 张强, 李耀庄, 刘保华. 秸秆资源在混凝土中应用的研究进展. 硅酸盐通报, 2015, 34(4): 1000-1003
- 国家能源局. 水下混凝土施工规范(DL/T5144-2001). 北京: 中国电力出版社, 2002
- 范昌福, 王宏, 裴艳东, 等. 渤海湾太平洋牡蛎壳体记录的冬季停止分泌/春季恢复生长的最低水温. 地球学报, 2012, 33(6): 953-960
- 姜少杰, 王伟定, 胡庆松, 等. 一种贝壳方礁的制备方法. 专利号: CN102217565A, 2011, 10, 19
- 韩鲁佳, 闰巧娟, 刘向阳, 等. 中国农作物秸秆资源及其利用现状. 农业工程学报, 2002, 18(3): 87-91
- Arrigo KR. Marine microorganisms and global nutrient cycles. Nature, 2005, 437 (7057): 349-355
- Bowler C, Karl DM, Colwell RR. Microbial oceanography in a sea of opportunity. Nature, 2009, 459(7244): 180-184
- Cao GL, Zhang XY, Wang YQ, et al. Estimation of emissions from field burning of crop straw in China. Chinese Sci Bul, 2008, 53(5): 784-790
- Falkowski PG, Katz ME, Knoll AH, et al. The evolution of modern eukaryotic phytoplankton. Science, 2004, 305(5682): 354-360.
- Simon N, Cras AL, Foulon E, et al. Diversity and evolution of marine phytoplankton. Comp Rendus Biol, 2009, 332(2-3): 159-170
- Wei SY, Shen GF, Zhang YY, et al. Field measurement on the emissions of PM, OC, EC and PAHs from indoor crop straw burning in rural China. Environ Pollut, 2013, 184(1): 18-24
- Yang EI, Kim MY, Park HG, et al. Effect of partial replacement of sand with dry oyster shell on the long-term performance of concrete. Cons Build Mater, 2009, 24(5): 758-765

(编辑 陈严)

Carbon Sequestration of Additives of Artificial Reefs and Its Effect on Carbon Fixation of *Ostrea Plicatula* Gmelin

LI Jiao, GONG Pihai, GUAN Changtao^①, LIU Yi

(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, Carbon-Sink Fisheries Laboratory, Qingdao 266071)

Abstract In this study we investigated the potential alteration of carbon sequestration capability of artificial reef eco-system caused by the additives peanut straw and *Argopecten irradians* shell. After the intensity test four types of reefs with different proportions of additives were selected for experiments, and the effects of additives on carbon fixation by various fouling organisms adhering to the reefs were analyzed. It was found that *Ostrea plicatula* Gmelin was the dominant species of fouling organisms, and that additives did not apparently affect the fouling organisms. Peanut straw and *A. irradians* shell did not improve the carbon sequestration of *O. plicatula* Gmelin ($P>0.05$). The calculation of carbon sequestration in the reefs with addition of shell showed that the minimum carbon content per unit reef was 104.13 kg and 2.60 kg per hollow stere, and that the maximum content per unit reef was 260.32 kg and 6.51 kg per hollow stere. As for reefs with straw, the minimum content per unit reef was 296.28 kg and 7.41 kg per hollow stere; the maximum content per unit reef was 740.70 kg and 18.52 kg per hollow stere. The total carbon fixed by experimental reefs was up to 2802.87 kg. In this experiment each unit included 250 reefs. Assuming all the reefs within the marine area of about 66.67 hm² contain additives, we calculated that reefs with 10% substitution of *A. irradians* shell could fix 52040.00 kg carbon, and that reefs with 25% substitution of peanut straw could fix 370350.00 kg carbon. Our results suggested that sequestration of reefs could be an effective method to improve carbon sinking. The effects of crop straws and shell as additives of artificial reefs need to be further investigated in the future.

Key words Artificial reefs; Carbon sequestration; Peanut straw; *Argopecten irradians* shell; Fouling organism

① Corresponding author: GUAN Changtao, E-mail: guanct@ysfri.ac.cn