

文章编号: 1001-8166(2005)03-0359-07

中国浅海贝藻养殖对海洋碳循环的贡献*

张继红, 方建光, 唐启升

(农业部海洋渔业资源可持续利用重点开放实验室, 中国水产科学研究院黄海水产研究所, 山东 青岛 266071)

摘要: 中国是浅海贝藻养殖的第一大国, 年产量超过 1 000 万 t。根据贝藻养殖产量、贝藻体内碳元素的含量及其贝类能量收支, 推算出 2002 年中国海水养殖的贝类和藻类使浅海生态系统的碳可达 300 多万 t, 并通过收获从海中移出至少 120 万 t 的碳。该结果不仅为探讨全球“遗漏的碳汇”问题提供了一个新的线索, 同时也证明了浅海的贝类和藻类养殖活动直接或间接地使用了大量的海洋碳, 提高了浅海生态系统吸收大气 CO₂ 的能力。另外, 贝藻的养殖活动与浅海生态系统的碳循环之间关系复杂, 相互作用明显, 因此, 它的生物地球化学过程是一个值得深入研究的科学问题。

关键词: 碳循环; 贝藻养殖; 浅海; 中国

中图分类号: P73 **文献标识码:** A

0 引言

海洋是地球上最大的碳库, 海洋中的碳储量约为 3.8×10^5 亿 t, 比大气多 50 倍, 因此, 海洋对碳的吸收能力将直接影响到全球碳循环。全球海洋通量联合研究计划 (JGOFS) 10 年的研究表明^[1], 海洋吸收大气 CO₂ 的能力远远低于预先的估计 (30 亿 t/a), 也就是目前全球碳循环面临的主要难题之一——“遗漏的碳汇”问题——大约近 10 亿 t 碳不知去向。目前国际上对于“遗漏的碳汇”问题存在 2 种解释: 一种解释是这一部分碳是由陆地生态系统吸收; 另一种解释认为陆架边缘海是遗漏的碳汇, 因为 JGOFS 计划的研究结果主要是大洋观测数据的计算结果, 而陆架边缘海的作用几乎被完全忽略。越来越多的研究表明, 陆架边缘海域对全球海洋碳循环有着不可忽视的重要作用。直接 pCO₂ 观测结果显示许多边缘海至少在一年中的相当长的时段内是大气 CO₂ 的汇^[2,3], 有一些研究者认为全球陆架边缘海是大气的弱汇^[4]。虽然目前国际上对于“源汇”问题

尚存在争议^[5], 但是陆架边缘海在全球碳循环中的作用毋庸置疑。

我国陆架边缘海域十分广阔, 面积约有 300 万 km², 占全球陆架海的 12.5%, 是世界上最宽、生产力最高的陆架海之一。胡敦欣等^[6]对东海吸收大气 CO₂ 的能力进行了估算, 得出“东海是大气 CO₂ 弱汇区”的结论, 每年吸收约 430 万 t 碳; Tsunogai 等^[7]的研究认为, 东海是大气 CO₂ 的净汇区, 每年能够吸收大气 CO₂ 约 3 000 万 t。然而, 这些估算结果尚未包括拥有高生产力的近岸浅海滩涂区。我国 15 m 等深线以内的浅海滩涂面积只有 12.4 万 km², 占其陆架边缘海的 4.1%。但是, 该区域是海洋碳循环异常活跃的区域, 一方面因为它是自然生产力特别高的区域, 另一方它又是人类水产养殖活动最集中的区域, 2002 年我国海水养殖的贝类和藻类在该区域的收获量上千万吨。大型藻类通过光合作用将海水中的溶解无机碳转化为有机碳; 滤食性贝类通过摄食活动大量去除海水中的颗粒有机碳, 并且通过吸收碳酸钙形成贝壳能够埋藏大量的碳。尤其

* 收稿日期: 2005-01-18; 修回日期: 2005-03-02

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目“东黄海海洋生态系统动力学和生物资源可持续”(编号: G19990437); 国家自然科学基金项目“浅海规模化贝类养殖与环境相互作用的研究”(编号: 30271021)资助。

作者简介: 张继红 (1943-), 吉林公主岭人, 副研究员, 主要从事贝类养殖生态学研究。E-mail: zhangjh@ysfri.ac.cn

* 通讯作者: 唐启升 (1943-), 男, 辽宁大连人, 研究员, 中国工程院院士, 主要从事海洋生态与资源方面的研究。

E-mail: ysfri@public.qd.sd.cn

重要的是,伴随着养殖贝藻的收获,大量的碳能够直接从海水中移出,这势必对养殖海区以及邻近海域的碳循环产生重要的影响。因此,研究我国浅海贝藻养殖对海洋碳循环的贡献不仅有助于探索浅海“遗漏的碳汇”问题,同时也有助于了解浅海生态系统吸收大气 CO_2 的能力,以便更好地认识全球碳循环的规律。

1 海水养殖状况

中国是一个海水养殖发达的国家,养殖面积和产量居世界首位。世界粮农组织 (FAO) 的统计资料显示^[8],我国海水养殖业的产量 1955 年仅 10 万 t,此后逐步提高。近 20 多年里得到了快速发展,1990 年超过 300 万 t,而 2002 年上升到近 1 200 万 t,约占世界海水养殖总产量的 2/3。我国海水养殖业的大发展主要得益于浅海贝类和藻类养殖的兴起,如在 2002 年的海水养殖产量中贝类产量约占总产量的 79%,大型藻类约占 11%,二者相加占了我国海水养殖产量的 90%,虾类和鱼类各约占 5%,其它类别不足 0.5% (图 1)。可见,中国的水产养殖是一个以贝藻养殖为主的水产养殖业。

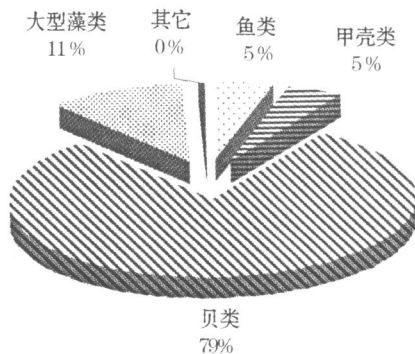


图 1 2002 年我国海水养殖产量组成

Fig 1 Composition of mariculture yields of China in 2002

我国贝类养殖始于 20 世纪 70 年代初。据统计,80 年代初,养殖贝类的年产量约为 30 万 t,90 年代初的年产量增为 100 万 t。随后产业有了较大的发展,到 2002 年,养殖贝类总产已达 965 万 t,主要的养殖种类为牡蛎、蛤类、扇贝和贻贝等,其产量约占我国养殖贝类年产量的 79%。

大型藻类 (如海带及紫菜等) 是我国海水养殖早期发展阶段的主要养殖种类。20 世纪 90 年代以来,大型藻类养殖又有了新的发展,其产量占了世界海藻人工养殖总产量的 20%。2002 年我国海藻养殖达 110.5 万 t (干重,相当于淡干产量 130 万

t)^[9],其中海带约占 64.7%,紫菜约占 5.2%,裙带菜、江蓠等其它藻类约占 30.2%。

2 藻类养殖对浅海碳收支的影响

近些年,随着海藻营养代谢如碳代谢的深入研究,对大型海藻在浅海生态系统物质循环中的重要作用已有了充分的认识^[10-12]。大型藻类通过光合作用将海水中的溶解无机碳转化为有机碳,从而使水中的 CO_2 分压降低,在其初级生产过程中,还需从海水中吸收溶解的营养盐如硝酸盐、磷酸盐,这使得表层水的碱度升高,将进一步降低水体中 CO_2 的分压,从而促进大气 CO_2 向海水中扩散。目前,大规模人工养殖的海藻已成为浅海生态系统的重要初级生产者,通过光合作用和营养盐的支持产生了很高的生产力。以黄海近岸的桑沟湾为例,根据表 1 资料估算,石莼、海带等大型藻类的年碳生产量可达 9 750 t,占整个海湾总初级生产量的 37%。从每平方米的年碳产量来看,大型藻类为浮游植物的 7.5 倍^[13]。

表 1 桑沟湾主要大型底栖植物的生产力^[12] ($\text{gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$)
Table 1 Production of benthic macrophytes in Sanggou Bay

种类	石莼	海带	裙带菜	石化菜	江蓠
	<i>U. pertusa</i>	<i>L. japonica</i>	<i>Un. pinnatifida</i>	<i>G. amansii</i>	<i>Gr. verrucosa</i>
年生产力	2664	2086	547	360	153

由于不同海区的营养盐结构、温度、光照等条件存在差异,导致藻类体内氮、磷的含量不同以及生产力间的差异,但是不同海区同种藻类碳占总干重的比例并无显著性差异^[11,12]。另外,通常海水中的无机碳不是大型藻类生长的限制因素,而营养盐氮、磷或者硅可能是其生长的限制因子。表 2 列出国内外一些大型藻类的营养成分,碳的含量 (干重) 在 20% ~ 35% 范围内,不同种类之间的营养成分差异较大。海带中碳的含量较其它大型藻类的碳含量高,占其干重的 31.2%^[12,13]。根据我国近年大型藻类养殖的年产量和藻类体内的碳含量来计算,我国人工养殖的海藻每年大约能从海水中移出 33 万 t 的碳。

3 贝类养殖对近海碳收支的影响

养殖贝类通过 2 种促进生长的方式使用海洋碳。一种方式是利用海水中的 HCO_3^- (碳酸氢根) 形成 CaCO_3 (碳酸盐) 躯壳 (俗称贝壳),其反应式如

表 2 大型海藻的营养成分

Table 2 Nutrient composition in marine seaweed

大型海藻	营养成分 (%)			主要资料来源
	C	N	P	
<i>Laminaria japonica</i> (海带)	31.2	1.63	0.379	文献 [15]
<i>Ulva pertusa</i> (石莼)	30.7	1.87	0.392	
<i>Laminaria laongicnris</i>	28.77	1.40		文献 [17]
<i>Laminaria saccharina</i>	23.36	2.26		文献 [18]
<i>Neocystis luetkeana</i>	23.64	1.86		文献 [16]
<i>Laminaria groenlandica</i>	28.7	1.83		
<i>Porphyra</i> (紫菜)	(27.39)			*
<i>Ulva lactuca</i> (石莼)	23.5	0.88	0.14	
<i>Gracilaria tikvahiae</i> (江蓠)	28.4	2.23	0.04	文献 [14]
<i>Gracilaria ferox</i> (江蓠)	20.6	1.52	0.07	
<i>Fucus distichus</i>	35.0	1.81		文献 [19]

注: *紫菜体内碳的含量为表中各种海藻碳含量的平均值

下^[20]: $Ca^{2+} + 2HCO_3^- = CaCO_3 + CO_2 + H_2O$, 虽然每形成 1 mol 的碳酸钙, 会释放 1 mol 的 CO_2 , 但是可以吸收 2 mol 的碳酸氢根。实际上, 形成的 $CaCO_3$ 贝壳, 少量随有机碳从表面海水垂直输送到海洋深处, 绝大部分通过收获从海水中移出; 另一种方式是通过滤食摄取水体中的悬浮颗粒有机碳 (包括浮游植物和颗粒有机碎屑等) 促进贝类个体软组织的生长。贝类的滤食系统十分发达, 有着极高的滤水率, 能够利用上覆水中乃至整个水体的浮游植物及颗粒有机物质。大规模的贝类养殖活动对水体中悬浮颗粒有机物质的数量以及组成有一定的控制作用^[21~25]。以贻贝为例: 贻贝 (*Mytilus edulis*) 的滤水率可达 $5L / (g \cdot h)$, 在均匀混合的海区, 如东斯海尔德水道 (Oosterschelde) 湾和 Western wadden 湾, 贻贝能在 4~7 天中将整个水体过滤一遍。作者等使用模拟现场流水法^[26]于 1999 年的 4~5 月、8 月、10 月分别对黄海桑沟湾的主要养殖种类栉孔扇贝、太平洋牡蛎、紫贻贝的滤水率进行了测定 (表 3), 结果表明这些养殖贝类有很高的滤水能力。桑沟湾的水体约为 $1.3 \times 10^9 m^3$, 只需要 3~4 天时间, 养殖的贝类就能够将整个湾的海水滤过一遍。桑沟湾颗粒有机碳的平均值为 $470 \mu g/L$, 因此, 在桑沟湾每年将有 5.6 万 t 的颗粒有机碳被养殖的贝类所摄食。

表 4 和表 5 列出一些重要养殖贝类的软组织和贝壳的化学组成^[15], 表 6 是对 2002 年桑沟湾收获贝类的一些相关生物学参数的测定结果。资料表明, 滤食性贝类的软组织中碳的含量通常为软组织干重 44%, 而贝壳中碳的含量为贝壳干重的 12%, 不同海区和种类之间的差异不显著。不同海区或种类之间的 C、H、N 元素比例的变化, 主要是由于 N

含量的变化所致^[15, 27~29]。根据 2002 年我国各种海水贝类养殖的产量 (湿重) 和表 4~6 的生物学参数, 可以推算出 2002 年通过养殖贝类的收获从海水中移出的总碳约为 86 万 t, 其中, 贝壳中的碳含量约为 67 万 t (表 7)。

由于生物量难以估计, 以上推算并没有把附着生物的考虑在内。贝类筏式养殖的器材上附着大量、多种附着生物^[30]。这些附着生物多为滤食性,

表 3 桑沟湾滤食性贝类的滤水能力

Table 3 Depleting ability of bivalves in Sanggou Bay

种类	现存量 ($\times 10^8$ 个)	滤水率 (L/ind h)	滤水量* ($\times 10^8 m^3/d$)
栉孔扇贝	20	4.14	1.99
太平洋牡蛎	10	4.10	0.98
紫贻贝	3.2	4.00	0.31
总计			3.28

*滤水量 = 现存量 \times 滤水率 $\times 24$

表 4 滤食性贝类软组织的化学组成

Table 4 Chemical composition of some bivalves' soft tissue parts

动物名称	重量百分比 (%)		
	C	H	N
栉孔扇贝 (<i>Chlamys farreri</i>)	43.87	6.81	12.36
紫贻贝 (<i>Mytilus edulis</i>)	45.98	7.16	11.40
太平洋牡蛎 (<i>Grassastrea gigas</i>)	44.90	6.99	8.9
菲律宾蛤仔 (<i>Ruditapes philippinann</i>)	42.84	6.76	10.76
毛蚶 (<i>Soaphaxa suberenata</i>)	45.86	7.37	8.71
中国蛤蜊 (<i>Maetra chinensis</i>)	42.21	6.73	10.57

表 5 滤食性贝类贝壳的化学组成

Table 5 Chemical compositions of shell of some filter-feeder bivalves

动物名称	总碳	TC	氢 H	氮 N	有机碳
	(%)	(%)	(%)	(%)	OC (%)
栉孔扇贝 (<i>Chlamys farreri</i>)	11.44	0.05	0.09	0.58	
紫贻贝 (<i>Mytilus edulis</i>)	12.68	0.32	0.55	3.57	
太平洋牡蛎 (<i>Grassastrea gigas</i>)	11.52	0.10	0.12	0.78	
菲律宾蛤仔 (<i>Ruditapes philippinann</i>)	11.40	0.34	0.56	3.63	
毛蚶 (<i>Soaphaxa suberenata</i>)	11.29	0.07	0.07	0.45	
中国蛤蜊 (<i>Maetra chinensis</i>)	11.52	0.17	0.19	1.23	

表 6 桑沟湾滤食性贝类的一些生物学参数

Table 6 Certain biological parameters of filter-feeder shellfish in Sanggou Bay

	栉孔扇贝	紫贻贝	太平洋牡蛎	菲律宾蛤仔
软组织干重 (g)	1.63 ± 0.28	0.29 ± 0.059	1.43 ± 0.70	0.68 ± 0.049
壳干重 (g)	12.65 ± 2.22	4.43 ± 0.78	70.75 ± 17.60	4.06 ± 0.064
总湿重 (g)	22.35 ± 3.49	6.27 ± 1.04	110.88 ± 26.54	9.02 ± 0.79

表 7 2002年海水养殖贝类收获从海水中移出的碳量 (单位: t)

Table 7 Carbon removal by harvest of shellfish in 2002

种类	产量	总干重	软组织中碳	贝壳中碳	总碳
扇贝 scallop	935 585	597 769	29 962	60 579	90 541
贻贝 mussel	663 866	499 752	14 041	59 429	73 471
牡蛎 oyster	3 625 548	2 360 138	21 162	266 469	287 631
蛤仔 clam	2 300 941	1 209 142	75 900	131 678	207 578
其它 other	2 125 787	1 364 856	48 948	149 207	198 155
总计 total			190 014	667 363	857 378

以水体中的悬浮颗粒有机物为食,并且草苔虫、藤壶、盘管虫、贻贝等都带有石灰质的躯壳。以桑沟湾 2001 年为例,附着生物主要为玻璃海鞘,在附着盛季的 8 月,其生物量(湿重)可达 $1\ 600\ \text{g}/\text{m}^2$,每个网笼上玻璃海鞘的数量平均为 800 个。整个桑沟湾贝类养殖面积约为 5 万亩,每亩养殖 400 笼,桑沟湾玻璃海鞘的数量约为 1.6×10^{10} 个。玻璃海鞘体内碳的含量约为其干重的 33.19%^[15],干重平均 0.055 g,滤水率每克干重为 6 L/h,每天玻璃海鞘群体的滤水量达到 $1.6 \times 10^8\ \text{m}^3$ 。据此来推算,8 月份桑沟湾玻璃海鞘碳的净生产量约为 320 t,相当于栉孔扇贝碳净生产量的 6.4%。因此,贝类养殖的附着生物在浅海生态系统的碳循环中的作用也不可忽视,目前主要通过换笼去除附着生物,大量的附着生物从海中移出,使得贝类养殖实际从海洋中移出的碳应在 86 万 t 以上。

根据能量收支模型^[31]: $C = F + U + R + G$ (其中, C 为摄食能, F 为粪便能, U 为排泄能, R 为代谢能, G 为生长能),贝类养殖实际利用的颗粒有机碳相当于式中的 C ,贝类的产量近似为式中的 G 部分。已有的资料显示,不同的种类在不同的环境条件下, G 在 C 中的比例不同,在 6.13% ~ 90.97% 范围内(表 8)。考虑产量因素,养殖贝类 G/C 的加权估算值约为 25%。据此概算,2002 年中国浅海生态系统中约有 344 万 t 的颗粒有机碳被养殖的贝类所利用,除了 86 多万吨的碳从海中移出外,部分碳通过呼吸代谢以 CO_2 的形式排入水中,部分碳以粪便的形式形成生物性沉积,参与到生物地化循环中去,加快了悬浮颗粒物质从水体到底质中的垂直运移。

4 结语与讨论

上述分析研究表明,中国大规模的贝藻养殖对浅海碳循环的影响是明显的,成为一个“可移出的碳汇”,仅 2002 年养殖的大型海藻可以从海中移出

近 33 万 t 的碳,养殖的贝类可移出 86 多万 t 的碳,合计至少移出了 120 万 t 碳。尤其重要的是移出的贝壳中碳含量约 67 万 t,成为较为持久的碳汇。陆地上的森林植被,它们对碳循环的影响是短期的,因为树木植被的腐烂分解,碳很快又被释放大气中了。而沉入海底的贝壳中的碳通过生物地化循环再回到大气中需要数百万年。即使是收获到陆地上的贝壳,其中的碳经再循环回到大气中也需要很长的时间。另外,1997 年《京都协议书》预计工业化国家减排 CO_2 的开支为 $150 \sim 600\ \text{\$/t C}^{[37]}$,由此算来中国浅海贝藻养殖的年产出对减排大气 CO_2 的经济价值相当于 1.8 ~ 7.2 亿美元。中国浅海贝藻养殖不仅为人类社会提供了大量优质、健康的蓝色海洋食物,同时又可能对减排大气 CO_2 做出如此大的贡献,是一种双赢的人类生产活动。

虽然上述结果证实贝藻类养殖通过收获能够从海洋中取出大量的碳,但是,我们对由此引起的海洋碳的生物地球化学循环的全过程还不十分清楚。如养殖的贝类作为近海海洋生物泵的重要环节,在促使海洋从大气中吸收人类排放的 CO_2 中所起的作用是间接的,即通过降低表面海水中 CO_2 的浓度而促使更多的大气 CO_2 溶解到海水中。但是,只有当海洋生态系统的固碳能力足以引起表面海水中 CO_2 的浓度下降时,海洋生物泵才会对人类排放到大气中的 CO_2 的吸收产生影响。目前虽已开展了若干养殖容量评估研究^[39~41],但很少与碳循环联系,对营养盐、浮游植物、大型藻类和养殖贝类之间的相互作用机理研究的也很少。另外,国内外许多的研究表明,贝类通过摄食能够将水中较小的颗粒转变成体积较大的粪便颗粒,从而增大颗粒物质的沉降速率^[42~45],如 Hayakawa 等测定日本大船渡 (Ofunato) 湾牡蛎养殖区碳的沉积速率高达 $23\ \text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。2002 年 7 月,作者等在桑沟湾的贝类养殖区和非养殖对照区分别悬挂沉积物捕捉器,测得贝类养殖区的悬浮颗粒的沉降速率是非养殖对照区的 1.75

表 8 贝类的生长能在摄食能中所占的比例

Table 8 Percentage of growth energy in total energy income in some kind of shellfish

贝类种类 (Shellfish)	实验条件 (Experiment conditions)	生长能在摄食能中的比例 (p/C ×100%)	主要资料来源 (References)
栉孔扇贝 (<i>Chlamys fareri</i>)	青岛海区一模拟现场流水法,		[32]
	不同规格的贝类:	平均为:	
	壳长 25.6mm	19.82	
	壳长 40.3mm	16.55	
	壳长 65.7mm	14.19	
菲律宾蛤仔 (<i>Ruditapes philippinana</i>)	不同的温度条件:		[33]
	3	6.13	
	5	26.82	
	8	34.63	
太平洋牡蛎 (<i>Crassostrea gigas</i>)	17	19.76	[34]
绿贻贝 (<i>Perna viridis</i>)	不同季节:		[35]
	2月	6.87	
	5月	45.84	
	7月	52.43	
	10月	90.97	
贻贝 (<i>Mytilus trossulus</i>)	不同的饵料质量和浓度:		[36]
	algae only	36.85	
	algae + silt (3:1)	55.69	
	algae + silt (1:1)	57.64	

倍^[46]。春季的实验表明,栉孔扇贝的同化率约为 76%,摄入的初级生产部分大约有 1/4 以粪便的形式排出体外。据此推算,在桑沟湾春季每天有 8 t 有机碳通过栉孔扇贝的生理活动从上层向底层的转移,加速了碳的垂直输运。这样,对一个长期进行大规模贝类养殖的海域来说,就可能产生大量的生物沉积。由于近海的水深较浅,受风浪的影响较大,这些生物沉积随时可能发生再悬浮,增加了水体碳循环的复杂性。但是,这个领域的研究进行的很少,且较为肤浅。显然,对由于大规模贝藻养殖引起的海洋碳生物地球化学循环变化的全过程进行深入的研究是十分必要的。它不仅对全面认识贝藻养殖对海洋碳循环的贡献有十分重要意义,而且对保证近海生态系统的健康和可持续发展也十分重要。

致谢:衷心地感谢审稿者对本文提供的修改意见及相关文献。

参考文献 (References):

[1] Beatriz M B, Michael J R F, Margaret C B. Ocean biogeochemistry and global change: JGOFS research highlights 1988-2000 [J]. *IGBP Science*, 2001, 2: 1-32
 [2] Frankignoulle M, Borges A V. European continental shelf as a significant sink for atmospheric carbon dioxide [J]. *Global Biogeo-*

chemical Cycles, 2001, 15: 569-576.
 [3] Thomas H, Bozec Y, Elkalay K, et al. Enhanced open ocean storage of CO₂ from shelf sea pumping [J]. *Science*, 2004, 304: 1 005-1 008.
 [4] Liu K K, Atkinson L, Chen C T A, et al. Exploring continental margin carbon fluxes on a global scale [J]. *The Earth Observing System, Transactions, American Geophysical Union*, 2000, 81: 641-644.
 [5] Cai W J, Dai M H. Comment on "Enhanced open ocean storage of CO₂ from shelf sea pumping" [J]. *Science*, 2004, 306: 1 477.
 [6] Hu Dunxin. Study on Chinese ocean flux [J]. *Advances in Earth Science*, 1996, 11 (2): 227-229. [胡敦欣. 我国的海洋通量研究 [J]. *地球科学进展*, 1996, 11 (2): 227-229].
 [7] Tsunogai S, Watanabe S, Sato T. Is there a continental shelf pump for the absorption of atmospheric CO₂? [J]. *Tellus B*, 1999, 51: 701-712.
 [8] Coates D. Aquaculture production: Quantities 1950-2002 [EB/OL]. [Ftp. faa.org/fi/stat/windows/fishplus/aquaq.zip](http://faa.org/fi/stat/windows/fishplus/aquaq.zip), 2002.
 [9] Shen Zhenzhao, Zhang Hecheng. China Fisheries Yearbook [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2002. [沈镇昭, 张合成主编. 中国渔业统计年鉴 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2002.]
 [10] Gao K S, Mckinley K R. Use of macroalgae for marine biomass production and CO₂ remediation [J]. *Journal of Applied Phycology*, 1994, 6: 45-60.
 [11] Flynn K J. Algal carbon-nitrogen metabolism: A biochemical basis for modeling the interactions between nitrate and ammonium uptake [J]. *Journal of Plankton Research*, 1991, 13 (2): 373-



- 387.
- [12] Rivkin R B. phytoadaptation in marine phytoplankton: Variations in ribulose 1, 5-bisphosphate activity [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1990, 62: 61-72.
- [13] Mao Xinghua, Zhu Mingyuan, Yang Xiaolong. The photosynthesis and productivity of benthic macrophytes in Sanggou Bay [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1993, 13 (1): 25-29. [毛兴华, 朱明远, 杨小龙. 桑沟湾大型底栖植物的光合作用和生产力的初步研究 [J]. *生态学报*, 1993, 13 (1): 25-29.]
- [14] Lapointe B E, Littler M M, Littler D S. Nutrient availability to marine macroalgae in siliciclastic versus carbonate-rich coastal waters [J]. *Estuaries*, 1992, 15 (1): 75-82.
- [15] Zhou Yi, Yang Hongsheng, Liu Shilin, et al. Chemical composition and net organic production of cultivated and fouling organisms in Sishili Bay and their ecological effects [J]. *Journal of fisheries of China*, 2002, 26 (1): 21-27. [周毅, 杨红生, 刘石林, 等. 烟台四十里湾浅海养殖生物及附着生物的化学组成、有机净生产量及其生态效应 [J]. *水产学报*, 2002, 26 (1): 21-27.]
- [16] Harrison P J, Druhl D, Løyd K E, et al. Nitrogen uptake kinetics in three year-classes of *Laminaria groenlandica* (Laminariales: Phaeophyta) [J]. *Marine Biology*, 1986, 93: 29-35.
- [17] Chapman A R O, Markham J W, Lüning K. Effects of nitrate concentration on the growth and physiology of *Laminaria saccharina* (Phaeophyta) in culture [J]. *Journal of Phycology*, 1978, 14 (2): 195-198.
- [18] Ahn O, Petrell R J, Harrison P J. Ammonium and nitrate uptake by *Laminaria saccharina* and *Nereocystis luetkeana* originating from a salmon sea cage farm [J]. *Journal of Applied Phycology*, 1998, 10: 333-340.
- [19] Rosenberg G, Probyn T A. Nutrient uptake and growth kinetics in brown seaweeds: Response to continuous and single additions of ammonium [J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 1984, 80: 125-146.
- [20] Chauvaud L, Thompson K J, Clemen J E. Clams as CO₂ generators: The *Potamocorbula amurensis* example in San Francisco Bay [J]. *Limnology Oceanography*, 2003, 48 (2): 2 086-2 092.
- [21] Young Ahn. Enhanced particle flux through the biodeposition by the Antarctic suspension-feeding bivalve *Latemula elliptica* in Marian Cove, King George Island [J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 1993, 171: 75-90.
- [22] Kaspar H F, Gillespie P A, Boyer I C, et al. Effects of mussel aquaculture on the nitrogen cycle and benthic communities in Kenepu Sounds, New Zealand [J]. *Marine Biology*, 1985, 85: 127-136.
- [23] Nakamura Y, Kerciku F. Effects of filter-feeding bivalves on the distribution of water quality and nutrient cycling in a eutrophic coastal lagoon [J]. *Journal of Marine Systems*, 2000, 26: 209-221.
- [24] Prins T C, Escaravage V, Smaal A C, et al. Functional and structural changes in the pelagic system induced by bivalve grazing in marine mesocosms [J]. *Water Science Technique*, 1995, 32 (4): 183-185.
- [25] Dong Shuangling, Wang Fang, Wang Jun, et al. Effects of bay scallop on plankton and water quality of mariculture pond [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1999, 21 (6): 138-143. [董双林, 王芳, 王俊, 等. 海湾栉孔扇贝对海水浮游生物和水质的影响 [J]. *海洋学报*, 1999, 21 (6): 138-143.]
- [26] Kuang Shihuan, Fang Jianguang, Sun Huiling, et al. Seasonal variation of filtration rate and assimilation efficiency of scallop *Chlamys farreri* in Sanggou Bay [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1996, 27 (2): 194-199. [匡世焕, 方建光, 孙慧玲, 等. 桑沟湾栉孔扇贝不同季节滤水率和同化率的比较 [J]. *海洋与湖沼*, 1996, 27 (2) 194-199.]
- [27] Grant J, Granford P J. Carbon & nitrogen scope for growth as a function as diet in the sea scallop *Placopecten magellanicus* [J]. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 1991, 71: 437-450.
- [28] Hawkins A J S, Bayne B L. Seasonal variation in the relative utilization of carbon and nitrogen by the mussel *Mytilus edulis*: Budgets, conversion efficiencies as maintenance requirements [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1985, 25: 181-188.
- [29] Gouletquer P, Wolowicz. The shell of *Cardium edule*, *Cardium glaucum* and *Ruditapes philippinarum*: Organic content, composition and energy value, as determined by different methods [J]. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 1989, 69: 563-572.
- [30] Huang Zongguo, Cai Ruxing. *Marine Biofouling and Its Prevention* [M]. Beijing: China Ocean Press, 1984. 61-138. [黄宗国, 蔡如星. 海洋污损生物及其防除 [M]. 北京: 中国海洋出版社, 1984. 61-138.]
- [31] Karfoot T H. *Animal Energetics* [M]. New York: Academic Press, 1987. 89-172.
- [32] Wang Jun, Jiang Zuhui, Zhang Bo, et al. Study on energy budget of farreri scallop (*Chlamys farreri*) [J]. *Marine Fisheries Research*, 1999, 20 (2): 71-75. [王俊, 姜祖辉, 张波, 等. 栉孔扇贝能量收支的研究 [J]. *海洋水产研究*, 1999, 20 (2): 71-75.]
- [33] Zhang Jihong, Fang Jianguang, Jin Xianshi, et al. Effect of energy budget of short-necked clam *Ruditapes philippinarum* under low temperature [J]. *Journal of fisheries of China*, 2002, 26 (5): 423-427. [张继红, 方建光, 金显仕, 等. 低温对菲律宾蛤仔能量收支的影响 [J]. *水产学报*, 2002, 26 (5): 423-427.]
- [34] Ropert M, Gouletquer P. Comparative physiological energetics of two suspension feeders: Polychaete annelid *Lanice conchilega* (Pallas 1766) and Pacific cupped oyster *Crassostrea gigas* (Thunberg 1795) [J]. *Aquaculture*, 2000, 181: 171-189.
- [35] Wong W H, Cheung S G. Feeding rates and scope for growth of green mussels, *Perna viridis* L. and their relationship with food availability in Kat, Hong Kong [J]. *Aquaculture*, 2001, 193: 123-137.
- [36] Arifin Z, Leah I, Bendell-Young. Cost of selective feeding by the blue mussel *Mytilus trossulus* as measured by respiration and ammonia excretion rates [J]. *Journal of Experimental Marine Biology*

- gy and Ecology, 2001, 260: 259-269.
- [37] Chen Panqin, Huang Yao, Yu Guirui Carbon Cycle of Earth System [M]. Beijing: China Science Press, 2004. [陈洋勤, 黄耀, 于贵瑞. 地球系统碳循环 [M]. 北京: 科学出版社, 2004.]
- [38] Tang Qisheng On the carrying capacity and its study [J]. *Marine Fisheries Research*, 1996, 17(2): 1-6. [唐启升. 关于养殖容量及其研究 [J]. 海洋水产研究, 1996, 17(2): 1-6.]
- [39] Fang Jianguang, Kuang Shihuan, Sun Huiling, et al Study on the carrying capacity of sanggou bay for the culture of scallop *Chlamys farreri* [J]. *Marine Fisheries Research*, 1996, 17(2): 18-31. [方建光, 匡世焕, 孙慧玲, 等. 桑沟湾栉孔扇贝养殖容量的研究 [J]. 海洋水产研究, 1996, 17(2): 18-31.]
- [40] Fang Jianguang, Sun Huiling, Kuang Shihuan et al Assession the carrying capacity of sanggou bay for culture of kelp *Laminaria japonica* [J]. *Marine Fisheries Research*, 1996, 17(2): 7-17. [方建光, 孙慧玲, 匡世焕, 等. 桑沟湾海带养殖容量的研究 [J]. 海洋水产研究, 1996, 17(2): 7-17.]
- [41] Yang H, Zhang T, Wang J, et al Growth characteristics of *Chlamys farreri* and its relation with environmental factors in intensive raft-culture areas of Sishiliwan Bay, Yan tai [J]. *Journal of Shellfish Reach*, 1999, 18(1): 71-76.
- [42] Zhang Zhinan, Zhou Yu, Han Jie, et al A study on the biodeposition of bivalves with the application of annular flux system [J]. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 2000, 30(2): 270-276. [张志南, 周宇, 韩洁, 等. 应用生物扰动实验系统 (Annular Flux System) 研究双壳类生物沉降作用 [J]. 青岛海洋大学学报, 2000, 30(2): 270-276.]
- [43] Hatcher A, Grant J, Schofield B. Effects of suspended mussel culture (*Mytilus* spp.) on sedimentation [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1994, 115: 219-235.
- [44] Gilbert F, Souchu P, Bianchi M, et al Influence of shellfish farming activities on nitrification, nitrate reduction to ammonium and denitrification at the water-sediment interface of the Thau lagoon, France [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1997, 151: 143-159.
- [45] Navarro JM, Thompon R J. Biodeposition produced by horse mussel *Modiolus modiolus* during spring diatom bloom [J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 1997, 209: 1-13.
- [46] Cai Lisheng, Fang Jianguang, Liang Xingning Natural sedimentation in large-scale aquaculture areas of Sungo Bay, north China sea [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2003, 10(4): 305-311. [蔡立胜, 方建光, 梁兴明. 规模化浅海养殖水域沉积作用的初步研究 [J]. 中国水产科学, 2003, 10(4): 305-311.]

THE CONTRIBUTION OF SHELLFISH AND SEAWEED MARICULTURE IN CHINA TO THE CARBON CYCLE OF COASTAL ECOSYSTEM

ZHANG Ji-hong, FANG Jian-guang, TANG Qi-sheng

(Key Laboratory for Sustainable Utilization of Marine Fisheries Resource, Ministry of Agriculture, Yellow Sea Fisheries Research Institute, Qingdao 266071, China)

Abstract: China is the largest mariculture country of shellfish and seaweed in the world. The total annual yields of these in 2002 are more than 10 million tons. Among of which, the yields of seaweed and shellfish are 1.3 and 9.7 million tons, respectively. Seaweeds can transform dissolved inorganic carbon into organic carbon by photosynthesis; filtering shellfish can clear out particle organic carbon by feeding activity and through the process of calcification a lot of carbon can be imbedded into the shells at the form of CaCO_3 . Especially, a mass of carbons can be removed out of ocean through harvest, which must have great influence on the carbon cycle of coastal ecosystem. Through the activity of shellfish and seaweed mariculture, there were more than 3 million tons carbon being utilized and about 1.2 million tons carbon being taken away from the shallow sea by harvesting, which is calculated basing on the data of annual production, the C content of both shellfish and seaweed and the energy budget of shellfish. Most important was that there were about 670000 tons carbon were fixed by shells and became the long-term carbon sink. The result not only discusses a new clue for probing into the question of "missing sink" in the global carbon cycle, but also testifies that the aquaculture of shellfish and seaweed in the coastal ocean can utilize a great deal of oceanic carbon directly or indirectly and improve the capacity of shallow sea absorbing atmospheric CO_2 . In addition, the relationship between the aquaculture and the carbon cycle of the coastal ecosystem is very complicated and its interaction is evident, consequently, its biogeochemical process should be paid great attention for further and deeply study as a science problem.

Key words: Carbon cycle; Shellfish and seaweed mariculture; Shallow sea