

广西北部湾低碳海水增养殖的实现途径*

Approach for Realization of Low-carbon Enhancement Mariculture in Guangxi Beibu Gulf

黄国强, 童万平, 刘旭佳

HUANG Guo-qiang, TONG Wan-ping, LIU Xu-jia

(广西海洋生物技术重点实验室, 广西海洋研究所, 广西北海 536000)

(Guangxi Key Laboratory of Marine Biotechnology, Guangxi Institute of Oceanology, Beihai, Guangxi, 536000, China)

摘要:在分析近岸海水增养殖业对海洋环境潜在的负面影响的基础上,总结广西海水增养殖业的特点和进行低碳增养殖业的优势,探讨实现广西北部湾海水增养殖业低碳化途径,并提出根据增养殖容量合理规划增养殖类群、进行陆基海水综合养殖和适度发展工厂化养殖和深水网箱养殖的建议。

关键词:北部湾 低碳 增养殖 环境

中图分类号:S949 **文献标识码:**A **文章编号:**1002-7378(2012)04-0287-06

Abstract: Potential negative impacts of near shore enhancement mariculture and its effect on marine environment were analyzed. Based on the analysis results, the character of enhancement mariculture in Guangxi was summarized and the advantages of low-carbon enhancement mariculture in Guangxi were also illustrated. The approach to implement low-carbon enhancement mariculture was discussed. The suggestions on the development of low-carbon enhancement mariculture included reasonably planning enhancement mariculture based on the capacity programming species, adopting integrated culture in land-based mariculture, reasonably developing mariculture industrialization and deep-sea cage culture.

Key words: Beibu Gulf, low-carbon, mariculture and enhancement, environment

低碳经济是以“三低”(即低能耗、低排放、低污染)为基础的经济模式,其本质是为了创建清洁能源结构和提高能源利用效率^[1]。随着低碳经济概念的深入人心,海洋渔业等领域的相应概念也得到发展,海洋低碳渔业经济则是低碳经济理论运用于渔业各生产环节,通过进行相关技术、流程、管理等的创新,以实现既定碳排放量条件下的最大经济效益或既定经济效益下的最小碳排放^[2]。而更进一步的“碳汇渔业”就是指利用水生生物吸收水体中的CO₂的功能,运用海水养殖、人工增殖等手段增加水生生物

数量,从而促使大气中CO₂总量直接或间接降低的渔业生产活动^[3]。对于近岸海水增养殖业而言,碳排放基本上也伴随着营养元素氮和磷等向受纳水体的输出,进而对近海环境质量造成负面影响。因此,如何提高碳、氮、磷等营养元素的利用效率从而减少排放,是实现海水增养殖业低碳化的关键。作者通过海水增养殖对近海环境的影响分析,结合广西海水增养殖业的实际情况,对广西北部湾海域实现低碳海水增养殖的途径进行了探讨。

1 海水增养殖对近海环境的影响

1.1 陆基海水增养殖对近海环境的影响

粗放和开放式的陆基池塘养殖模式尽管具有成本相对较低和可以部分利用水体天然生产力的优势,但是却同时存在占用面积大、养殖密度低、单位面积产出低,并且不利于海水养殖的病害防治等弊

收稿日期:2012-08-16

修回日期:2012-09-28

作者简介:黄国强(1973-),男,博士,主要从事水产养殖生态学 research。

* 广西科技攻关项目课题(桂科攻 1222013-3)资助。

端。相比较而言封闭式的陆基集约化养殖系统单位面积产量高并有利于病害预防,因而在经济价值较高的海水养殖种类(如鲑鳟类、鲆鲽类和对虾等)的养殖中逐渐得到广泛引用^[4~6]。在发达国家中,工厂化的养殖系统在鱼类和对虾的养殖中得到广泛应用^[7~10]。在这些封闭式的养殖系统中,为了保证养殖生物的健康(生物安全性)和减少对环境的污染,在苗种、饲料、水处理设施、病害防治等多个环节中有严格的要求,运行成本较高。我国的海水养殖业也饱受病害的困扰,在一些经济价值较高的海水养殖种类(如鲆鲽类和对虾等)中,也采用了封闭式或工厂化的养殖模式来减少病害的冲击^[11~13]。但是在这些系统中,由于采用的技术和管理水平有限,存在以下3个严重问题:(1)养殖生物对投入营养和能量的利用率一般不超过50%,这意味着这些养殖系统不仅浪费了大量营养物质,而且其排放可能导致邻近受纳水体的富营养化;(2)由于全封闭式养殖存在控制水质的难题,在大多数海水鱼的养殖系统中,采用过流式的用水模式或较高的水交换率,存在较高的引入和向环境排出病原的可能性;(3)海水没有循环利用,浪费了海水资源。在集约化的养殖系统中,零换水的或循环水的封闭式养殖系统(RAS)由于具有循环利用养殖用水和有利于控制病害的优势,在多种鱼虾类的养殖中得以广泛应用^[14~17]。但是养殖生物对投入饲料中能量和营养物(C、N、P)的利用率均在50%以下(根据文献结果或饲料系数推算)^[18~22],其余超过50%的部分以残饵、粪便、悬浮颗粒、溶解态等不同形态流出系统^[23,24],不仅浪费投入能量和营养,而且对受纳环境形成了污染负荷^[18,23,25]。例如,在法国过流式的虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*)养殖场、希腊的鲈鱼(*Dicentrarchus labrax*)网箱养殖和法国的循环水大菱鲆(*Scophthalmus maximus*)的养殖中,每生产1t鱼分别向环境中排放溶解N 57.8t、83.2t、68.8t,固态N 7.2t、18.5t、12.7t,溶解态P 4.0t、4.7t、2.6t,固态P 6.0t、12.0t、8.0t^[7]。由以上数据可以看出,陆基海水养殖系统对临近水域可能成为富营养化和有机污染源,未利用的饵料和排泄物会增加水体的碳负荷,并使陆基海水养殖业相对而言成为“高碳”产业。

1.2 网箱养殖对近海环境的影响

海水鱼类网箱养殖是一种结合高密度放养和大量投喂人工饲料以达到短时间内在较小水体中获得高产量的海上养殖方式。由于养殖生物对投入饲料

的利用率较低,残饵、粪便、排泄物及死亡养殖生物的分解等原因,会使养殖区水体富营养化,沉积物中有机物和硫化物含量增加。Hall等^[26]对鲑鱼(*Oncorhynchus mykiss*)网箱养殖的调查数据表明,生产1t鲑鱼会导致92~102kg N(约占饲料投入N的72%~79%)溶失到水体中,同时养殖的鲑鱼排泄物还会产生40kg N的排泄,在瑞典Gullmar湾,网箱养殖过程中投入的总P中有78%~81%进入到环境中^[27]。郭芳等^[28]在综述中指出,海水网箱养殖对近岸环境会造成水质污染和沉积物环境恶化。在国内一些海水鱼类网箱养殖区内也已经有对水质和底质影响的报道,如:哑铃湾网箱养殖使底层海水中TOC、SS、有机污染物和溶解态氮磷营养盐都有不同程度的增加^[29];大鹏澳海水鱼类网箱养殖区沉积物中有机物和硫化物含量明显高于对照区^[30];大亚湾海水鱼类网箱养殖区沉积物向水体释放营养盐(N和P)的通量远远大于贝类养殖区和对照区,贝类区又高于对照区^[31]。由于海水鱼类网箱养殖是一种碳排放量较高的渔业方式,只能在查明海区容量的基础上合理适度发展,才能避免其对环境的负面作用。

相对于鱼类海水网箱养殖而言,筏式和笼式的海藻和贝类养殖对于近岸环境一般认为是有益的,主要原因是由于其产品是直接的初级生产者和利用初级生产者的滤食性动物。但是需要注意的是,一旦养殖规模过大和密度太高,也会对近岸环境产生负面影响。贝类养殖过程中滤食浮游植物和有机颗粒,并排出粪便产生生物沉积,如桑沟湾内养殖栉孔扇贝(*Chlamys farreri*)20亿粒,通过生物沉积可使高达 8.71×10^4 t的碳沉积到底质中^[32]。贝类养殖造成沉积物中有机碳和生源要素大量积累并释放到水体中导致污染或富营养化的报道已不鲜见^[33,34]。藻类养殖白天虽然会通过光合作用产生大量氧气,但是夜间的呼吸作用也会消耗大量氧气导致水体溶氧含量下降,而且筏架或海藻上脱落的生物沉积到海底后在水流交换受阻的海区或海湾也会导致水体和沉积物环境恶化,但是相关报道还很少见。

1.3 浅海滩涂增养殖对近海环境的影响

浅海滩涂增养殖的种类以滤食和沉积物食性的种类居多,如我国沿海增养殖的各种贝类、刺参(*Apostichopus japonicus*)、方格星虫(*Sipunculus nudus*)、双齿围沙蚕(*Perinereis aibuhitensis*)等。这些增养殖种类由于能够利用水体和表层沉积物有

机物,因而被认为能够降低浅海滩涂的有机物负荷,可以归于碳汇或低碳增养殖种类。但是,由于底播贝类同样存在的生物沉积问题,大规模高密度养殖也可能导致近岸环境的局部沉积物环境富营养化,沉积物种有机物和营养元素在特殊理化条件下集中释放会导致水质恶化。而方格星虫和双齿围沙蚕等以沉积物种有机碎屑为食物的底内生物,通过摄食、消化、排泄和代谢直接影响沉积物中有机物和生源要素的动态分布。国外已有的研究报道表明星虫类在海洋底质的有机物输送和生源要素的生物地化循环中起到重要作用,如 Shields 和 Kedra^[35]认为 *Nephasoma lilljeborgi* 在海底有机物向深层沉积物的输送过程中起到关键作用。星虫主要通过摄食将有机颗粒带入沉积物中向深层输送^[36], Graf^[37]认为星虫类向沉积物下层运输有机物的速度可达到 41 cm/d。Thomsen 和 Flach^[38]也报道了星虫类通过摄食沉积下来的有机颗粒可以将有机物向深层输送。由于大规模增养殖,这类动物有可能将表层有机物带入较深的沉积物中积累,集中释放时会引起水环境恶化。因此,浅海滩涂增养殖要实现低碳化,一定要合理控制规模和密度。

2 广西北部湾海水增养殖的特点和进行低碳增养殖的优势

2.1 广西北部湾海水增养殖的特点

2.1.1 单位面积产量高于全国平均水平

由广西 2011 年的渔业统计数据(表 1~3)^[39]可以发现,无论按增养殖方式、水域还是种类进行分类,广西的陆基和网箱养殖、鱼类和甲壳类产量远高于全国平均水平。由于前述海水养殖对投入饵料中的碳、氮、磷的利用率较低,并且养殖生物有一定的排泄量,因而投饵养殖的种类单位面积产量高也意味着往海洋输入的碳和其他营养元素也高于全国平均水平。

表 1 2011 年广西海水增养殖大类与全国平均水平比较^[39]

养殖种类	总产量(t)		总面积(hm ²)		平均单产(t/hm ²)	
	全国	广西	全国	广西	全国	广西
鱼类	964189	38984	73899	1019	13.05	38.26
甲壳类	1127189	193252	307371	21152	3.67	9.14
贝类	11543626	689181	1409107	28436	8.19	24.24
藻类	1601764	0	119233	0	13.43	0
其他类	276524	2387	196722	1605	1.41	1.49
合计	15513292	923804	2106382	52212	7.36	17.69

表 2 2011 年广西海水增养殖按水域分类与全国平均水平比较^[39]

养殖种类	总产量(t)		总面积(hm ²)		平均单产(t/hm ²)	
	全国	广西	全国	广西	全国	广西
海上	8180844	284489	1150795	16275	7.19	17.48
滩涂	5641770	444331	677207	19464	8.33	22.83
其他	1690678	194984	278380	16473	6.07	11.84
合计	15513292	923804	2106382	52212	7.36	17.69

表 3 2011 年广西海水增养殖按养殖方式分类与全国平均水平比较^[39]

养殖种类	产量(t)		面积或体积		平均单产	
	全国	广西	全国	广西	全国	广西
池塘	1957561	190212	405396 hm ²	19722 hm ²	4.83 t/hm ²	9.64 t/hm ²
普通网箱	348386	28793	21180352 m ²	384205 m ²	16.45 kg/m ²	74.94 kg/m ²
深水网箱	56190	1208	7236108 m ³	100608 m ³	7.77 kg/m ³	12.01 kg/m ³
筏式	4149901	242578	371641 hm ²	7784 hm ²	11.17 t/hm ²	31.16 t/hm ²
吊笼	832943	1999	84204 hm ²	153 hm ²	9.89 t/hm ²	13.07 t/hm ²
底播	4309850	188069	850011 hm ²	10917 hm ²	5.07 t/hm ²	17.23 t/hm ²
工厂化	131292	0	14904654 m ³	0	8.81 kg/m ³	0

2.1.2 贝类和底播方式产量远高于全国平均水平

广西贝类(牡蛎、扇贝、珍珠贝等)和底播增养殖(各种双壳贝类和方格星虫等)方式产量远高于全国平均水平(表 1 和表 3)。由于贝类滤食浮游植物和有机颗粒,并且贝壳形成过程也消耗水体中的碳酸盐,底播增养殖的方格星虫利用沉积物中的有机碎屑,因而两者在规模和密度适宜的情况下均能降低环境中的有机物负荷,从而减少碳分解排放,属于碳汇渔业范畴,对降低整个海洋渔业碳排放有益。

2.1.3 整体技术落后

从广西的养殖方式来看,主要以陆基池塘养殖、浅海底播养殖、笼养、浅海网箱养殖等方式为主,而在国内外,一些价值较高的养殖种类早已采用工厂化养殖模式进行养殖,如我国北方的鲆鲽类养殖。而目前集成水产养殖先进技术的工厂化养殖模式在广西尚未见有企业采用,鱼类的网箱养殖也以海湾和浅海网箱为主,深水抗风浪网箱也基本未见采用。这说明广西海水增养殖整体上技术相对于全国平均水平还比较落后,通过技术升级提高广西增养殖生态效益的潜力比较大。

2.2 广西北部进行低碳海水增养殖的优势

2.2.1 亚热带海洋生物资源丰富

广西北部湾水域分布有丰富的贝类资源,双壳类有31科178种,其中经济价值较大的双壳贝类10多种,包括马氏珍珠贝(*Pteria martensii*)、大獾蛤(*Lutraria maxima*)、栉江珧(*Atrina pectinata*)、巴非蛤(*Paphia textile*)、华贵栉孔扇贝(*Chlamys nobilis*)、近江牡蛎(*Crassostrea rivularis*)、文蛤(*Meretrix meretrix*)、长肋日月贝(*Amusium pleuronectes*)、泥蚶(*Arca granosa*)、毛蚶(*Scapharca subcrenata*)、菲律宾蛤仔(*Ruditapes philippinarum*)、缢蛏(*Sinonovacula construxta*)、翡翠贻贝(*Perna viridis*)等,因此,在广西沿海开展以浮游微藻和有机碎屑为食的经济贝类的增养殖具有得天独厚的条件。同时,以沉积物为食的海珍品——方格星虫(俗称沙虫)和革囊星虫(*Phascolosoma esculenta*)(泥虫)可充分发挥利用沉积物中有机碳的作用,降低沉积物的有机碳含量,从而降低增养殖向近岸的碳排放。包含双齿围沙蚕在内的沉积食性多毛类动物也是潜在的增养殖对象,也属于可降低沿岸沉积物有机碳含量和进行环境修复的种类。

2.2.2 浅海和滩涂资源丰富

广西沿海20m等深线以内的海域面积约83.74万公顷,其中0~5m等深线的约13.48万公顷;5~10m等深线的约21.33万公顷;10~20m等深线的约48.93万公顷。整体而言广西的浅海和滩涂坡度较小,底质以沙质或沙泥底为主,同时北部湾海域本来也是多种双壳贝类和底栖生物分布区域,种质资源和环境资源均较优越,有利于底播贝类和方格星虫等进行增养殖增加碳汇渔业的比例。

2.2.3 近岸初级生产力高

广西沿海属亚热带季风海洋气候,光热充足,沿岸入海径流量及营养盐输入量大,初级生产力较高,每年可以达到180~223t/km²有机碳,为海洋生物的生长提供了营养基础,特别适宜营养级较低的海洋动物生长。广西沿海的浮游植物、红树林、海藻、海草和底栖硅藻等,以及河流带人的有机碎屑,或可以直接作为贝类和沉积食性生物饵料,或经过环境中生物、物理、化学作用变成可为它们利用的有机碎屑。因此,双壳贝类和方格星虫等以浮游植物和有机碎屑为营养来源的增养殖种类生长速度和产量高,碳汇渔业种类有较高的固碳效率。

3 广西北部弯低碳海水增养殖的主要建议

3.1 查明各生态类群的增养殖容量

由于增养殖活动是否会对海洋环境产生污染不仅取决于增养殖种类的选择,也受到养殖规模和密度的影响。因此,查明各生态类群的增养殖容量是实现合理规划增养殖业和减少增养殖业碳和其他营养元素排放量的前提条件。可以在查明海区初级生产力、海洋环境质量、各增养殖类群的生态效率、水文动力学等相关资料的基础上,根据海区的海洋功能区划,应用营养动态模型、沿岸能流模型、水质模型等计算模型,估算各生态类型的增养殖容量。

3.2 合理规划各生态类群的区域和规模

根据近海不同区域的底质、水环境、水动力学特征,合理规划不同食物源的增养殖类群分布区域,根据估算的增养殖容量确定增养殖规模和密度,避免食物资源不足导致生长缓慢及密度过高导致的负面生态效应。并通过不同生态类群增养殖种类的搭配,实现食物资源的多层次利用。如通过滤食性贝类和方格星虫或沙蚕的合理搭配,可过滤食性贝类捕获水层的浮游植物和有机碎屑,其产生的生物沉积又可被方格星虫或沙蚕利用,从而整体提高海区对食物资源的利用,增加增养殖种类的碳汇作用。

3.3 陆基养殖系统采用综合养殖模式

广西沿海的陆基养殖系统大多数为以对虾、青蟹等为对象的单种池塘养殖或简单的混养,因而对投入的碳和营养元素利用率较低,从而导致陆基养殖系统不能实现低碳化。已经报道有多种双壳贝类和鱼类可过滤食水体浮游植物和有机颗粒能够降低系统的颗粒态营养负荷^[40,41],大型藻类对N、P等营养盐的吸收作用在降低溶解态营养负荷中的作用极为明显^[5,42~45],而鲢梭鱼类、沙蚕及其他沉积食性底栖动物是极有潜力的降低沉积物营养负荷的处理者^[46~50]。Aubin等^[7]认为,从减少环境影响和节约资源的角度而言,将综合养殖与高效的水处理技术结合起来能够构建高效率低污染的养殖系统。因此,在广西的陆基池塘养殖系统中,采用“投饵种类+沉积食性种类+滤食性种类”同池或分池综合养殖,以增加对投入饲料中碳、氮、磷的利用层次从而提高整体利用率,是降低陆基养殖系统碳排放和减少其对近岸污染风险的可行途径。在广西沿海,潜在的沉积食性种类有鲢梭鱼类和双齿围沙蚕等,而滤食性种类有多种双壳贝类可供选择。

3.4 适度发展高效工厂化养殖模式和深水网箱养殖

尽管从工厂化养殖和深水网箱养殖两种养殖方式对降低碳排放而言没有明显优势,但是由于两者都具有可以高密度养殖和具有很高的产量的特点,适度发展可以以较小的空间获得较多的水产品。工厂化养殖可以减少沿海用地的占用面积,并可以实现排放污水的集中收集和处理,结合分池综合养殖利用别的养殖种类来处理排放水也可达到降低碳和营养元素排放的效果。而深水网箱一般选在水交换好的较深海域进行,只要控制适度的规模不会超过海区的自净能力。由于其养殖密度大和产量高,也可以在一定程度上缓解陆基池塘养殖系统占地较多,排放分散不便集中处理的不利影响。

参考文献:

- [1] 周冬. 低碳经济与其他类似概念的辨析[J]. 经济研究导刊, 2010(32): 22-23.
- [2] 陈令杰. 我国海洋低碳渔业经济发展路径探究[J]. 商情, 2011, 50: 53.
- [3] 孙吉亭, 赵玉杰. 我国碳汇渔业发展模式研究[J]. 东岳论丛, 2011, 32(8): 150-155.
- [4] 王克行, 马甦, 潘鲁青, 等. 封闭内净养虾技术试验报告[J]. 齐鲁渔业, 1995(4): 20-23.
- [5] Schuenhoff A, Shpigel M, Lupatsch I, et al. A semi-recirculating, integrated system for the culture of fish and seaweed[J]. Aquaculture, 2003, 221(1-4): 167-181.
- [6] Schuur A M. Evaluation of biosecurity applications for intensive shrimp farming[J]. Aquacultural Engineering, 2003, 28(1-2): 3-20.
- [7] Aubin J, Papatryphon E, van der Werf H M G, et al. Assessment of the environmental impact of carnivorous finfish production systems using life cycle assessment[J]. Journal of Cleaner Production, 2009, 17(3): 354-36.
- [8] Fontaine P, Terver D, Georges A. Application of aquarological technique to an intensive fish-rearing process using recycled, warmed water for the production of rainbow trout fry, *Oncorhynchus mykiss* [J]. Aquacultural Engineering, 1996, 15(6): 485-498.
- [9] Summerfelt S T, Wilton G, Roberts D, et al. Developments in recirculating systems for Arctic char culture in North America[J]. Aquacultural Engineering, 2004, 30(1-2): 31-71.
- [10] Tal Y, Schreier H J, Sowers K R, et al. Environmentally sustainable land-based marine aquaculture[J]. Aquaculture, 2009, 286(1-2): 28-35.
- [11] 张文香, 王志敏, 张卫国. 海水鱼类工厂化养殖的现状与发展趋势[J]. 水产科学, 2005, 24(5): 50-52.
- [12] 常抗美, 吴剑锋. 海水池塘凡纳滨对虾工厂化养殖技术[J]. 浙江海洋学院学报: 自然科学版, 2006, 25(2): 228-230.
- [13] 刘晃, 倪琦, 顾川川. 海水对虾工厂化循环水养殖系统模式分析[J]. 渔业现代化, 2008, 35(1): 15-19.
- [14] Browdy C L, Bratvold D. Preliminary development of a biosecure shrimp production system[C]//MOSS S M(Ed). Proceedings of the US Marine shrimp farming program biosecurity workshop, 14 February 1998, Hawaii, United States. The Oceanic Institute, Hawaii, United States, 1998: 19-38.
- [15] Moss S M. Marine shrimp farming in the Western Hemisphere: past problems, present solutions, and future visions[C]//Lee C S, O'Brien P J(Eds). Proceedings of a workshop held by the Oceanic Institute, 12-15 February 2001, Honolulu, Hawaii, United States. Aquaculture Grow out Systems - Challenges and Technological Solutions, Reviews in Fisheries Science, 2002, 101(3-4): 601-620.
- [16] Pruder G D, Brown C L, Sweeney J N, et al. High health shrimp systems: seed supply-theory and practice[C]//Browdy C L, Hopkins J S(Eds). Proceedings of the special session on shrimp farming aquaculture 1995. Proceedings of the Special Session on Shrimp Farming, San Diego, California. Swimming Through Troubled Water, World Aquaculture Society, Baton Rouge, Louisiana, United States, 1995: 40-52.
- [17] Wyban J A, Swingle J S, Sweeney J N, et al. Specific pathogen free *Penaeus vannamei* [J]. Journal of the World Aquaculture Society, 1993, 24(1): 39-45.
- [18] 董双林, 潘克厚, Brockmann U. 海水养殖对沿岸生态环境影响的研究进展[J]. 青岛海洋大学学报, 2000, 30(4): 575-582.
- [19] Dall W, Hill B J, Rothlisberg P C, et al. The biology of Penaeidae[M]. Advances in Marine Biology 27. New York: Academic Press, 1990.
- [20] Schneider O, Sereti V, Eding E H, et al. Analysis of nutrient flows in integrated intensive aquaculture systems[J]. Aquacultural Engineering, 2005, 32(3-4): 379-401.
- [21] Smith D M, Tabrett S J, Glencross B D. Growth response of the black tiger shrimp, *Penaeus monodon* fed diets containing different lupin cultivars[J]. Aquaculture, 2007, 269(1-4): 436-446.

- [22] Suárez J A ,Gaxiola G,Mendoza R,et al. Substitution of fish meal with plant protein sources and energy budget for white shrimp *Litopenaeus vannamei* (Boone, 1931)[J]. *Aquaculture*, 2009, 289(1-2): 118-123.
- [23] Tacon A G J, Forster I P. Aquafeeds and the environment; policy implications[J]. *Aquaculture*, 2003, 226(1-4): 181-189.
- [24] Tovar A, Moreno C, ManuelVez M P, et al. Environmental implications of intensive marine aquaculture in earthen ponds[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2000, 40(11): 981-988.
- [25] Mantzavrakos E, Kornaros M, Lyberatos G, et al. Impacts of a marine fish farm on in Argolikos Gulf (Greece) on the water column and the sediment[J]. *Desalination*, 2007, 210(1-3): 110-124.
- [26] Hall P O J, Holby O, Kollberg S, et al. Chemical fluxes and mass balances in a marine fish cage farm IV. Nitrogen [J]. *Marine Ecological Progress Series*, 1992, 89: 81-91.
- [27] Holby O, Hall P O J. Chemical fluxes and mass balances in a marine fish cage farm II. Phosphorus[J]. *Marine Ecological Progress Series*, 1991, 70: 263-272.
- [28] 郭芳, 黄小平. 海水网箱养殖对近岸环境影响的研究进展[J]. *水产科学*, 2006, 25(1): 37-41.
- [29] 韦献革, 温琰茂, 王文强, 等. 哑铃湾网箱养殖对底层水环境的影响研究[J]. *农业环境科学学报*, 2005, 24(2): 274-278.
- [30] 黄洪辉, 林钦, 甘居利, 等. 大鹏澳海水鱼类网箱养殖对沉积环境的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2007, 26(1): 75-80.
- [31] 黄小平, 郭芳, 黄道建. 大亚湾典型养殖区沉积物——海水界面营养盐扩散通量及其环境意义[J]. *海洋环境科学*, 2008, 增刊(2): 6-12.
- [32] 张明亮, 邹健, 毛玉泽, 等. 养殖栉孔扇贝对桑沟湾碳循环的贡献[J]. *渔业现代化*, 2011, 38(4): 13-17.
- [33] Graf G, Rosenberg R. Bioresuspension and biodeposition; a review[J]. *Journal of Marine Systems*, 1997, 11(3-4): 269-278.
- [34] Newell R I E, Fisher T R, Holyoke R R, et al. Influence of eastern oysters on nitrogen and phosphorus regeneration in Chesapeake Bay. USA[C]//The comparative roles of suspension feeders in ecosystems. Netherlands: Springer Publishing, 2005.
- [35] Shields M A, Kedra M. A deep burrowing sipunculan of ecological and geochemical importance[J]. *Deep-Sea Research I*, 2009, 56(11): 2057-2064.
- [36] Graf G. Benthic-pelagic coupling; a benthic view[J]. *Oceanography and Marine Biology: An Annual Review*, 1992, 30: 149-190.
- [37] Graf G. Benthic-pelagic coupling in a deep-sea benthic community[J]. *Nature*, 1989, 341: 437-439.
- [38] Thomsen L, Flach E. Mesocosm observations of fluxes of particulate matter within the benthic boundary layer[J]. *Journal of Sea Research*, 1997, 37(1-2): 67-79.
- [39] 农业部渔业局(编制). 2012 中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2012.
- [40] 王吉桥, 李德尚, 董双林, 等. 对虾池不同综合养殖系统效率和效益的比较研究[J]. *水产学报*, 1999, 23(1): 45-51.
- [41] Shpigel M, Blaylock R A. The Pacific oyster, *Crassostrea gigas*, as a biological filter for a marine fish aquaculture pond[J]. *Aquaculture*, 1991, 92(C): 187-197.
- [42] Hernnández I, Pérez-Pastof A, Vergara J J. Studies on the biofiltration capacity of *Gracilariopsis longissima*: From microscale to macroscale[J]. *Aquaculture*, 2006, 252(1): 43-53.
- [43] Neori A, Chopin T, Troell M, et al. Integrated aquaculture; rationale, evolution and state of the art emphasizing seaweed biofiltration in modern mariculture [J]. *Aquaculture*, 2004, 231(1-4): 361-391.
- [44] Paul N A, de Nys R. Promise and pitfalls of locally abundant seaweeds as biofilters for integrated aquaculture[J]. *Aquaculture*, 2008, 281(1-4): 49-55.
- [45] Porrello S, Ferrari G, Lenzi M, et al. Ammonia variations in phytotreatment ponds of land-based fish farm wastewater[J]. *Aquaculture*, 2003, 219(1-4): 485-494.
- [46] 康斌, 线薇薇. 鲮作为清洁者在养殖系统中理论混养量的计算方法[J]. *广东海洋大学学报*, 2007, 27(3): 74-77.
- [47] 邱丽华, 吴进锋, 张汉华, 等. 海水池塘鳊鱼、斑节对虾混养的初步研究[J]. *湛江海洋大学学报*, 2000, 20(4): 69-71.
- [48] 王诗红, 张志南. 日本刺沙蚕摄食沉积物的实验研究[J]. *青岛海洋大学学报*, 1998, 28(4): 587-592.
- [49] 线薇薇, 孙松, 刘瑞玉. 一种腐屑食性鱼类对生态系统氮循环的影响[J]. *中国海洋大学学报*, 2004, 34(4): 549-554.
- [50] 张付国, 侯明泉, 郭建军. 利用生物改善虾池底质试验[J]. *齐鲁渔业*, 1996, 13(2): 5-7.

(责任编辑: 邓大玉)