

滤食性双壳贝类对工厂化养殖废水中悬浮物的生物滤除研究

张少军^{1,2}, 周毅², 张延青¹, 刘鹰², 徐洋¹

(1.青岛理工大学, 山东 青岛 266033; 2.中国科学院海洋研究所, 海洋生态与环境科学重点实验室, 山东 青岛 266071)

摘要:针对海水鱼类半滑舌鲷养殖池排出水中大量絮状悬浮物难以用常规机械过滤法去除的问题,选择适应能力强的滤食性双壳贝类长牡蛎(*Crassostrea gigas*)和紫贻贝(*Mytilus galloprovincialis*),通过现场实验测定了它们对鱼类养殖排出水中悬浮物的生物滤除能力。结果表明,在海水流速为 100 L·h⁻¹ 条件下,牡蛎[壳高(9.80±0.45)cm,湿重(117.0±10.0)g]和贻贝[壳高(6.54±0.26)cm,湿重(29.7±2.4)g]对养殖排出水悬浮物的生物沉积速率分别为 40.28~45.30 mg·ind⁻¹·d⁻¹[平均(43.40±2.16)mg·ind⁻¹·d⁻¹]和 6.96~8.87 mg·ind⁻¹·d⁻¹[平均(7.66±0.99)mg·ind⁻¹·d⁻¹];在实验海水流速为 150 L·h⁻¹ 条件下,牡蛎[壳高(9.33±0.99)cm,湿重(95.8±31.4)g]和贻贝[壳高(6.39±0.91)cm,湿重(28.0±15.4)g]对悬浮物的生物沉积速率分别为 13.68~22.50 mg·ind⁻¹·d⁻¹[平均(17.35±4.59)mg·ind⁻¹·d⁻¹]和 5.37~5.67 mg·ind⁻¹·d⁻¹[平均(5.55±0.15)mg·ind⁻¹·d⁻¹]。表明长牡蛎和贻贝两种双壳贝类对半滑舌鲷养殖池出水中悬浮物具备很强的生物滤除潜力,且能吸收和利用悬浮物中的有机质实现养殖废物的生物资源化利用。

关键词:工厂化海水养殖;悬浮颗粒物;滤食性双壳贝类;半滑舌鲷;生物滤除;沉积物

中图分类号:X703.1 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2010)02-0363-05

A Study on Biologically Filter-Removing of Suspended Particles in Industrial Aquaculture Wastewater with Filter-Feeding Bivalves

ZHANG Shao-jun¹, ZHOU Yi², ZHANG Yan-qing¹, LIU Ying², XU Yang¹

(1.Qingdao Technological University, Qingdao 266033, China; 2.Key Laboratory of Marine Ecology & Environmental Sciences, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China)

Abstract: In industrial aquaculture wastewater, there occur large quantities of suspended particles from undigested remains and fish feces that are easily physically broken up. Especially it is difficult to remove the flocculent suspended solids from culture pond of *Cynoglossus semilaevis* Günther with conventional mechanical filter methods. In this study, we chose two kinds of filter-feeding bivalves, the Pacific oyster *Crassostrea gigas* and the blue mussel *Mytilus galloprovincialis* to remove the suspended solids from fish aquaculture wastewater in flow through systems. Results showed that when water flow speed was 100 L·h⁻¹, the biologically filter-removing rate of suspended particles by *C. gigas* (shell height 9.80±0.45 cm; individual wet weight 117.0±10.0 g) and *M. galloprovincialis* (shell height 6.54±0.26 cm; individual wet weight 29.70±2.44 g) were 40.28~45.30 mg·ind⁻¹·d⁻¹ (average 43.37 mg·ind⁻¹·d⁻¹) and 6.96~8.87 mg·ind⁻¹·d⁻¹ (average 7.66 mg·ind⁻¹·d⁻¹), respectively; and when the flow waste-water speed was 150 L·h⁻¹, the biologically filter-removing rate of suspended particles by oysters (shell height 9.33±0.99 cm; individual wet weight 95.78±31.44 g) and mussels (shell height 6.39±0.91 cm; individual wet weight 28.03±15.4 g) were 13.68~22.50 (average 17.35) mg·ind⁻¹·d⁻¹ and 5.37~5.67 (average 5.55) mg·ind⁻¹·d⁻¹, respectively. Also, we found that the POM, and C, N, and P in sediments of oyster system were significantly lower than those of the control system. We conclude that the two species *C. Gigas* and *M. galloprovincialis* have a considerable potential to filter and remove suspended particles from aquaculture wastewater, and simultaneously yield the biological resource use.

Keywords: industrial seawater aquaculture; suspended particles; filter-feeding bivalve; *Cynoglossus semilaevis* Günther; bio-filter; sediment

收稿日期:2009-06-17

基金项目:国家 863 计划(2006AA100305);国家科技支撑计划资助(2006BAD09A09);国家自然科学基金委创新研究群体项目(40821004);中科院知识创新项目(KZCX2-YW-Q07-03);山东省科技攻关项目(2005GG3205072);国家自然科学基金项目(30571428)

作者简介:张少军(1983—),男,硕士研究生,研究方向为养殖环境科学。E-mail:zhangshaojun-zg@163.com

通讯作者:周毅 E-mail:yizhou@qdio.ac.cn

悬浮物的去除是海水工厂化循环水养殖系统中的关键工艺之一^[1],除采用一般机械过滤去除较大悬浮物外,还采用如微滤机或弧形筛等去除小粒径悬浮物,其去除率可以达到 80%^[2],对悬浮物的去除精度一般在 100~200 μm ,但对于 100 μm 以下的悬浮物去除率较低。Chen 等^[3]的研究表明,高密度养殖系统水体中,占颗粒物总质量 80%~90%的粒径小于 30 μm ,采用常规的筛滤工艺是难于去除的。特别是半滑舌鲷(*Cynoglossus semilaevis* Günther)养殖排出水中,其粪便很容易在水中分解为絮状悬浮物,不易沉淀,较难去除,不仅增加了工厂化循环水养殖系统中水处理单元的处理负荷,而且在生物膜法处理工艺中,由于细小悬浮物的粘附,减少了生物膜与废水中溶解态污染物的接触面积,影响了生物膜的处理效率。

滤食性双壳贝类,如牡蛎、贻贝和扇贝,具有很强的滤水能力,能够过滤大量细小的颗粒物质,包括浮游植物、浮游动物、微生物以及有机碎屑等,以贝类粪便及假粪的形式,使较难沉积的悬浮物沉积下来,这种过程被称生物沉积^[4-6],同时在滤食的过程中同样能够吸收利用悬浮物中的有机组分。国际上的许多研究表明,贻贝、牡蛎和蛤等滤食性双壳贝类往往是沿岸健康生态系统中很重要的组成成分,充当“关键种”和“功能群”的作用^[7],它们不仅在经济上而且在生态上都极为重要,它们通过滤水摄食和生物沉积等生理生态过程显著增强水层——底栖耦合作用,在沿岸生态系统的物质循环及能量流动中扮演着重要的角色^[8-11]。近年滤食性双壳贝类已被用于浅海鱼虾类养殖系统的水质净化,在综合多元化养殖模式中,不仅去除水体中的悬浮颗粒物,而且能够利用这些废物转化为经济产品^[12]。

本实验针对海水循环水养殖系统所存在的大量细小悬浮颗粒物这一问题,选择了适应能力和滤水能力都很强的滤食性双壳贝类——长牡蛎(*Crassostrea gigas*)和紫贻贝(*Mytilus galloprovincialis*),实验测定了两种贝类对养殖废水悬浮颗粒物的去除能力,以期为工厂化循环水养殖系统中悬浮物的高效去除和养殖废物的生物资源利用提供参考文献。

1 材料与方法

1.1 实验装置

实验包括 3 套系统,即牡蛎系统、贻贝系统和对照系统,每套系统由 5 个塑料水箱(75 cm×50 cm×50 cm)组成,共 15 个。实验贝类均匀地放于 3 层的吊笼

中,对照系统,只放空笼子。实验装置采用上升流方式,进水管底部封口,管底部以上约 10 cm 管壁凿有小孔,使进水平流进入水箱中。实验装置单体水箱示意图见图 1。

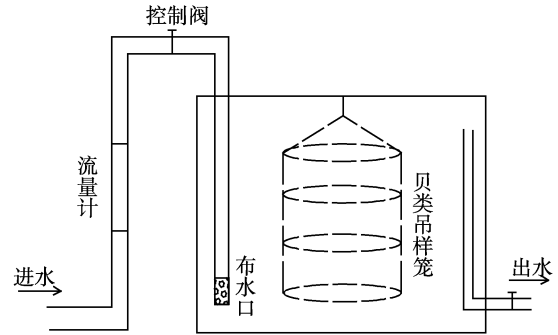


图 1 实验装置单个水箱示意图

Figure 1 The schematic diagram of individual experimental tanks

1.2 实验方法

实验地点为天津海发公司半滑舌鲷(*Cynoglossus semilaevis* Günther)养殖车间,实验所采用的贝类(长牡蛎 *Crassostrea gigas* 和紫贻贝 *Mytilus galloprovincialis*)采集于青岛胶州湾。贝类养殖水体为经弧形筛过滤后的半滑舌鲷养殖池排水,水温 16.7~17.2 $^{\circ}\text{C}$, DO 8.5~9.8 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, pH 7.82~7.91。实验系统进水由水泵将经弧形筛过滤后的养殖池排水泵到高位水箱里,然后经管道进入系统,实验水箱用水的体积为 150 L。本实验的进行分为两个时间段:

阶段 I: 于 2008 年 12 月 12 日起始,运行 16.7 d,进水流量为 100 $\text{L}\cdot\text{h}^{-1}$,每个水箱的放养密度为:牡蛎 $(1.75\pm0.09)\text{kg}$;贻贝为 $(1.19\pm0.05)\text{kg}$ 。

阶段 II: 于 2009 年 1 月 1 日开始,运行 13 d,进水流量为 150 $\text{L}\cdot\text{h}^{-1}$,每个水箱的放养密度为:牡蛎 $(2.38\pm0.03)\text{kg}$;贻贝为 $(1.31\pm0.08)\text{kg}$ 。

实验结束系统停水后将贝取出,静置 5 h 后采用虹吸法收集沉积物,将沉积物脱盐并烘干(60 $^{\circ}\text{C}$)后称量干重。测定沉积物中的有机质(POM)、有机碳(POC)、有机氮(PON)以及无机磷(IP)、有机磷(OP)和总磷(TP)含量。POM 通过灰化前后的重量差计算(500 $^{\circ}\text{C}$, 3 h);沉积物去碳酸盐后(浓盐酸酸雾, 5 h),用 CHN 元素分析仪测定 POC 和 PON;沉积物中的无机磷 IP、有机磷 OP 和总磷 TP 用灰化法测定^[13]。对每个吊笼中的牡蛎和贻贝测量壳高和湿重。

系统对悬浮物的沉降速率计算公式为:

$$DR(\text{mg}\cdot\text{d}^{-1})=W_{\text{M(O,C)}}/t,$$

式中 $W_{M(O,C)}$ 表示牡蛎(贻贝、对照)系统单体水箱底部收集的沉积物总量干重(mg), t 为持续时间(d)。

两种双壳贝类对悬浮物的生物沉积速率(BDR)由下列公式计算:

$$BDR(mg \cdot ind^{-1} \cdot d^{-1}) = (W_{M(O,C)} - W_C) / N \cdot t,$$

式中 $W_{M(O,C)}$ 表示放有牡蛎(或贻贝)的水箱底部收集的沉积物总量干重, mg; W_C 表示对照组水箱底部收集到的自然沉积物总量干重, mg; t 为持续时间, d; N 为贝类数量, 个。

2 结果

2.1 实验系统进水特征

实验开始前, 于 2008 年 12 月 12 日、13 日对系统进水 TSS 浓度进行了 24 h 连续测定, 结果见图 2。系统进水的 TSS 浓度在 $1.8 \sim 9.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间(由直径为 $1.0 \mu\text{m}$ 的混合纤维滤膜测得)。

2.2 实验贝类规格

两个阶段的实验贝类规格见表 1。

表 1 实验系统中贝类的规格

Table 1 Biological parameters of bivalves used in the experimental systems

	系统	壳高/cm	湿重/ $\text{g} \cdot \text{ind}^{-1}$	软体干重/ $\text{g} \cdot \text{ind}^{-1}$	肥满度
阶段 I	牡蛎	9.80 ± 0.45	117.0 ± 10.0	2.81 ± 0.24	3.89 ± 0.01
	贻贝	6.54 ± 0.26	29.7 ± 2.4	1.48 ± 0.12	17.81 ± 0.02
阶段 II	牡蛎	9.33 ± 0.99	95.8 ± 31.4	2.30 ± 0.03	3.22 ± 0.01
	贻贝	6.39 ± 0.91	28.0 ± 15.4	1.40 ± 0.17	16.84 ± 0.09

注: 肥满度=软体干重/壳干重 $\times 100$ 。

2.3 悬浮物的滤除效果比较

牡蛎和贻贝两种双壳贝类对半滑舌鲷养殖池排出水中悬浮物的滤除效果由表 2 可以看出, 就滤除速

率而言, 阶段 I 中牡蛎、贻贝系统分别是对照系统的 4.62 和 2.72 倍; 阶段 II 分别为 3.28 和 2.37 倍。这说明贝类系统组中颗粒物的沉积速率明显高于对照组自然沉积的速率。可见, 两种贝类对半滑舌鲷养殖池排出水悬浮物都有较高的生物滤除潜力。

两种双壳贝类对悬浮物的生物沉积速率: 阶段 I, 以个体而言, 牡蛎是贻贝的 5.7 倍, 平均分别为 $(43.40 \pm 2.16) \text{ mg} \cdot \text{ind}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 、 $(7.66 \pm 0.99) \text{ mg} \cdot \text{ind}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$; 阶段 II, 牡蛎是贻贝的 3.2 倍, 平均分别为 $(17.35 \pm 4.59) \text{ mg} \cdot \text{ind}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 、 $(5.55 \pm 0.15) \text{ mg} \cdot \text{ind}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

表 2 实验贝类对养殖排出水中悬浮物的生物滤除速率

Table 2 Biologically filter-removing rates of suspended particles in aquaculture wastewater by experimental bivalves

	系统	单个系统沉积 速率/ $\text{mg} \cdot \text{d}^{-1}$	沉积速率比值 (贝类/对照)	生物沉积速率/ $\text{mg} \cdot \text{ind}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$
阶段 I	牡蛎	815.9 ± 26.4	4.62	43.40 ± 2.16
	贻贝	480.6 ± 42.0	2.72	7.66 ± 0.99
	对照	176.5 ± 21.9	—	—
阶段 II	牡蛎	597.2 ± 83.6	3.28	17.35 ± 4.59
	贻贝	431.9 ± 22.3	2.37	5.55 ± 0.15
	对照	182.2 ± 36.2	—	—

2.4 沉积物中 POM 及 C、N、P 含量及显著性分析

表 3 中列出了贝类系统生物沉积物与对照系统自然沉积物中 POM 及 C、N、P 含量。

阶段 I: 牡蛎系统沉积物中 POM、C、N、P 含量分别为 $(28.47 \pm 2.88)\%$ 、 $(9.45 \pm 0.21)\%$ 、 $(1.50 \pm 0.10)\%$ 、 $(7.24 \pm 0.45)\%$, 而对照系统分别为 $(29.73 \pm 1.27)\%$ 、 $(11.31 \pm 1.48)\%$ 、 $(1.83 \pm 0.15)\%$ 、 $(7.86 \pm 0.36)\%$, 前者较后者为低。

阶段 II: 牡蛎系统沉积物 POM 以及 C、N、P 分别为 $(28.76 \pm 1.37)\%$ 、 $(1.71 \pm 0.16)\%$ 、 $(11.53 \pm 0.92)\%$ 、

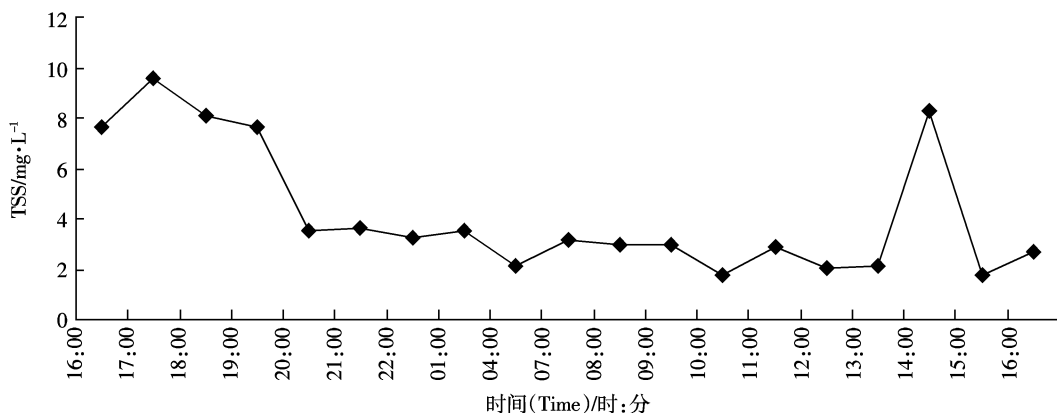


图 2 系统进水悬浮物浓度 24 h 变化情况

Figure 2 Changes in total suspended solid(TSS/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) in inflow seawater

表 3 贝类系统与对照系统沉积物中有机物及 C、N、P 含量
Table 3 POM and C、N、P contents in sediments of bivalve and control systems

	系统	POM/%	POC/%	PON/%	TP/%	IP/%	OP/%	C/N
阶段 I	牡蛎	28.47±2.88	9.45±0.21	1.50±0.10	7.24±0.45	6.70±0.47	0.54±0.32	6.30±0.40
	贻贝	32.31±0.72	12.4±0.54	2.01±0.11	5.66±0.42	5.27±0.26	0.39±0.26	6.19±0.06
	对照	29.73±1.28	11.31±1.48	1.83±0.15	7.86±0.36	6.98±0.68	0.88±0.31	6.17±0.31
阶段 II	牡蛎	28.76±0.01	11.53±0.92	1.71±0.16	3.45±0.40	2.79±0.13	0.66±0.29	6.73±0.12
	贻贝	35.28±0.00	14.17±0.59	2.19±0.13	4.54±0.05	3.89±0.04	0.64±0.02	6.47±0.12
	对照	37.90±0.02	13.90±0.63	2.17±0.04	6.28±0.12	5.50±0.09	0.78±0.21	6.41±0.37

(3.45±0.40)%, 而对照系统分别为 (37.90±1.48)%、(13.90±0.63)%、(2.17±0.04)%、(6.28±0.12)%, 前者显著低于后者($P<0.05$)。

另外,贻贝系统沉积物中总磷及有机磷含量也都显著低于对照系统 ($P<0.05$)。贝类系统沉积物中 POM 及 C、N、P 含量与对照系统的差异显著性分析见表 4。

表 4 贝类系统沉积物中 POM 及 C、N、P 含量与对照系统的差异显著性分析
Table 4 The discrepancy-prominence analysis of POM、C、N、P in sediments between bivalve and control systems

	系统	POM/%	POC/%	PON/%	TP/%	IP/%	OP/%
阶段 I	牡蛎	-	*	**	-	-	-
	贻贝	-*	-*	-	**	**	*
阶段 II	牡蛎	**	*	**	**	**	-
	贻贝	*	-	-	**	**	-

注:*表示贝类系统中 POM、C、N、P 含量显著低于对照系统 ($P<0.05$);**表示非常显著低于($P<0.01$);-*表示显著高于($P<0.05$);-为不显著。

3 讨论

近些年来,利用滤食性双壳贝类去除水体中悬浮颗粒物在浅海鱼虾养殖系统中已有广泛报道^[12]。在这些系统中,贝类的食物来源包括浮游植物以及残饵粪便等。对比之下,在室内工厂化养殖系统,国内外尚未见利用滤食性贝类去除悬浮颗粒物的报道。针对海水鱼类半滑舌鲷养殖池排出水中大量絮状悬浮物难以用常规的机械过滤法去除的特点,本研究选择滤食性双壳贝类(牡蛎、贻贝)现场实验测定了它们对养殖排出水中悬浮物的去除能力。

国内外的研究表明,滤食性双壳贝类具有很强的滤水能力,贝类通过生物过滤作用对水体中浮游生物及颗粒有机物质有着巨大的影响。Hatcher 等^[14]在加拿大 Upper South Cove 贻贝养殖区对沉积速率进行

了测定并与邻近的非养殖区进行比较,发现前者的沉降量往往是后者的 2 倍以上。在许多贝类养殖区,生物沉积量非常可观^[5],如在日本广岛湾牡蛎养殖区,420 000 个牡蛎在 9 个月的养殖期间内能产生 16 t 的粪便和假粪;在瑞典的某一贻贝养殖区,每个养殖季节结束后底质增厚 10 cm 左右。根据我们在山东省桑沟湾养殖区的测定结果来看^[15],仅栉孔扇贝单位面积的排粪量便可达 65.9 kg·hm⁻¹·d⁻¹(干重),合计每年产生 18 520 t(干重),加上其他养殖贝类的排粪,整个海湾年产生沉积物近 40 000 t。

本研究针对工厂化鱼类养殖所开展实验的结果显示,在流水条件下,长牡蛎和紫贻贝对半滑舌鲷养殖池出水中悬浮物有较高的生物滤除速率。牡蛎系统的平均生物滤除速率(个体)在阶段 I 为(43.40±2.16)mg·ind⁻¹·d⁻¹,在阶段 II 为(17.35±4.59)mg·ind⁻¹·d⁻¹;贻贝系统的平均生物滤除速率(个体)在阶段 I 为(7.66±0.99)mg·ind⁻¹·d⁻¹,在阶段 II 为(5.55±0.15)mg·ind⁻¹·d⁻¹。可见牡蛎的个体对悬浮物的生物滤除效果比贻贝要好。在自然养殖状态下,漩门港口长牡蛎(壳长 95~110 mm)的生物沉积速率为(37.5~83.7)mg·ind⁻¹·d⁻¹^[16]。已有研究表明,影响双壳贝类生物沉积速率的主要因素包括个体大小、水温、水流、饵料浓度及组成等^[5,10]。本实验所用海水为流动状态下的半滑舌鲷养殖池排出水,其悬浮物主要成分是残饵与鱼类粪便,对比之下自然条件下贝类的饵料中还含有大量的浮游植物。

本实验对贝类及对照系统的沉积物有机组成分析结果显示,前者沉积物中 POM 以及 C、N、P 含量都小于对照(见表 3),如阶段 II 牡蛎系统沉积物 POM 以及 POC、PON、TP 分别为(28.76±0.01)%、(11.53±0.92)%、(1.71±0.16)%、(3.45±0.40)%,而对照系统分别为(37.90±0.02)%、(13.90±0.63)%、(2.17±0.04)%、(6.28±0.12)%。可见贝类可以吸收和利用养殖废水悬浮物中的部分有机质。

综上所述,针对海水鱼类半滑舌鲷养殖池排出水中大量絮状悬浮物难以机械过滤的特点,本文利用滤食性双壳贝类(长牡蛎、贻贝)对其进行生物滤除,实验结果显示这两种双壳贝类对半滑舌鲷养殖池出水中悬浮物具备很强的生物滤除潜力,且能吸收和转化悬浮物中的有机质实现养殖废物的生物资源化利用。利用滤食性双壳贝类对工厂化海水养殖废水中的悬浮物进行生物滤除,可以实现悬浮物的去除和实现养殖废物资源化利用的双赢。

参考文献:

- [1] 倪琦, 张宇雷. 循环水养殖系统中的固体悬浮物去除技术[J]. 渔业现代化, 2007, 34(6): 7-10.
- Ni Qi, Zhang Yu-lei. Suspended solids removal technology in recirculating aquaculture systems[J]. *Fishery Modernization*, 2007, 34(6): 7-10.
- [2] 辛乃宏, 于学全, 吕志敏, 等. 石斑鱼和半滑舌鲷封闭循环水养殖系统的构建与应用[A]/封闭循环水养殖[C]. 北京: 中国科学文化出版社, 2009: 253-263.
- Xin Nai-hong, Yu Xue-quan, Lv Zhi-min, et al. Setup and operation of recirculation aquaculture system for grouper and bohai sole[A]/Recirculating aquaculture systems[C]. Chinese Science and Culture Press, 2009: 253-263.
- [3] Chen S L, Timmons M B, Aneshansley D J, et al. Suspended solids characteristics from recirculating aquaculture systems and design implications[J]. *Aquaculture*, 1993, 112: 143-155.
- [4] Haven D S, Morales-Alamo R. Aspects of biodeposition by oysters and other invertebrate filter feeders[J]. *Limnology & Oceanography*, 1966, 11: 487-498.
- [5] 周毅, 杨红生, 张福绥. 海水双壳贝类的生物沉积及其生态效应[J]. 海洋科学, 2003, 27(2): 23-26.
- ZHOU Yi, YANG Hong-sheng, ZHANG Fu-sui. Biodeposition by seawater bivalve mollusk[J]. *Marine Sciences*, 2003, 27(2): 23-26.
- [6] Zhou Yi, Yang Hongsheng, Zhang Tao, et al. Influence of filtering and biodeposition by the cultured scallops *Chlamys farreri* on benthic-pelagic coupling in a eutrophic bay in China[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2006, 317: 127-141.
- [7] Dame R F. Ecology of marine bivalves: An ecosystem approach[M]. CRC Press, Boca Raton, FL, 1996.
- [8] Prins T C, Smaal A C, Dame R F. A review of the feedbacks between bivalve grazing and ecosystem processes[J]. *Aquatic Ecology*, 1998, 31: 349-359.
- [9] Newell R I E. Ecosystem influences of natural and cultivated populations of suspension-feeding bivalve molluscs: A review [J]. *Journal of Shellfish Research*, 2004, 23: 51-61.
- [10] Zhou Yi, Yang Hongsheng, Zhang Tao, et al. Density-dependent effects on seston dynamics and rates of filtering and biodeposition of the suspension-cultured scallop *Chlamys farreri* in a eutrophic bay (Northern China): An experimental study in semi-in situ flow-through systems [J]. *Journal of Marine Systems*, 2006, 59: 143-158.
- [11] 周兴, 周毅, 杨红生, 等. 胶州湾菲律宾蛤仔在水层-底栖耦合作用的现场初步研究[J]. 海洋与湖沼(增刊), 2006, 37: 263-269.
- ZHOU Xing, ZHOU Yi, YANG Hong-sheng, et al. An in situ study on benthic-pelagic coupling by bottom-cultured clam *Ruditapes philippinarum* in Jiaozhou Bay[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*(Supp.), 2006, 37: 263-270.
- [12] 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: 361-391.
- [13] Zhou Yi, Zhang Fu-sui, Yang Hong-sheng, et al. Comparison of effectiveness of different ashing auxiliaries for determination of phosphorus in natural waters, aquatic organism and sediments by ignition method[J]. *Water Research*, 2003, 37: 3875-3882.
- [14] Hatcher A, Grant J, Schofield B. Effects of suspended mussel culture (*Mytilus* spp.) on sedimentation, benthic respiration and sediment nutrient dynamics in a coastal bay[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1994, 115: 219-235.
- [15] 周毅, 杨红生, 毛玉泽, 等. 桑沟湾栉孔扇贝生物沉积的现场测定[J]. 动物学杂志, 2003, 38(4): 40-44.
- ZHOU Yi, YANG Hong-sheng, MAO Yu-ze, et al. Biodeposition by the Zhikong Scallop *Chlamys farreri* in Sanggou Bay[J]. *Chinese Journal of Zoology*, 2003, 38(4): 40-44.
- [16] 王俊, 姜祖辉, 陈瑞盛. 厚壳贻贝的同化率及其生物沉积作用[J]. 中国水产科学, 2005, 12(2): 150-155.
- WANG Jun, JIANG Zu-hui, CHEN Rui-sheng. Assimilation efficiency and biodeposition of mussel *Mytilus crassitesta*[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2005, 12(2): 150-155.