

5 种滤食性贝类对牙鲆的粪便、残饵及网箱养殖区沉降物的摄食行为

张继红^{1*}, 吴桃^{1,2}, 高亚平¹, 唐望^{1,3}

(1. 中国水产科学研究院黄海水产研究所, 山东 青岛 266071;

(2. 上海海洋大学水产与生命学院, 上海 201306;

3. 华东理工大学生物工程学院, 上海 200237)

摘要: 采用室内静水法, 研究了虾夷扇贝、栉孔扇贝、长牡蛎、紫贻贝及菲律宾蛤仔对不同浓度、质量的牙鲆粪便、残饵、沉降物的摄食行为, 从摄食生理角度, 分析了基于滤食性贝类的鱼+贝 IMTA 养殖模式的可能性。研究结果显示, 这 5 种贝类对鱼粪、残饵及网箱周围沉降物都可摄食, 但是, 不同贝类对食物可获得性的反应不同。菲律宾蛤仔、长牡蛎、栉孔扇贝的摄食率显著高于其它 2 种贝类; 5 种贝类的吸收率、吸收效率无显著性差异。不同饵料对贝类的摄食行为影响显著。吸收效率(AE)都随有机物含量的增加而增大; 对有机物的吸收率(AR)与有机物浓度(POM)呈线性正相关关系。颗粒物 TPM 浓度达到 26.24, 21.64, 27.00 mg/L 时, 长牡蛎、栉孔扇贝、虾夷扇贝会产生假粪来调节摄入的能量。在牙鲆+滤食性贝类的 IMTA 养殖模式中, 菲律宾蛤仔、长牡蛎、栉孔扇贝是比较好的候选种。

关键词: 总悬浮颗粒物; 有机物含量; 摄食行为; 滤食性贝类; 多营养层次的综合养殖

中图分类号: Q 178.1; S 917.4

文献标志码: A

为降低网箱养殖的环境压力, 基于滤食性贝类的多营养层次的综合养殖技术(IMTA)成为目前的研究热点^[1]。研究方法主要包括滤食性贝类在网箱区和对照区的生长速率的对比研究^[2-8]、采用脂肪酸、稳定同位素示踪分析贝类的食物来源或网箱残饵、鱼粪对贝类的食物贡献^[9-10]等。在实验室内或现场, 直接测定滤食性贝类对网箱养鱼的残饵及粪便的吸收效率、吸收率, 是最为便捷、有效的方法。由于不同贝类内在(鳃的生理结构)、外在条件(生长环境不同, 对环境的长期适应而导致摄食行为不同)的差异, 使得不同种类的贝类对网箱周围颗粒物的滤除效果可能存在较大的差异。量化滤食性贝类对网箱养鱼的残饵及粪便的吸收效率、吸收率, 选择 IMTA 适宜的种类组合, 是确定 IMTA 系统效率的关键。

牙鲆(*Paralichthys olivaceus*)是我国北方海

域网箱养殖的主要品种之一, 虾夷扇贝(*Patinopecten yessoensis*)、栉孔扇贝(*Chlamys farreri*)、长牡蛎(*Crassostrea gigas*)、紫贻贝(*Mytilus edulis*)及菲律宾蛤仔(*Ruditapes philippinarum*)是北方常见的养殖种类, 不论是养殖产量、规模都位于前茅, 是建立基于滤食性贝类的鱼+贝 IMTA 的潜在候选种类。本实验的目的, 通过研究这 5 种贝类对牙鲆的残饵和粪便的摄食行为, 以增加对其摄食生理生态学特性的了解, 确定建立基于滤食性贝类的鱼+贝 IMTA 养殖模式的最佳种类, 为我国北方海域可持续发展的 IMTA 模式的构建提供理论基础。

1 材料与方 法

1.1 材料来源

实验在荣成楮岛进行, 虾夷扇贝取自山东寻

收稿日期:2012-10-29 修回日期:2013-01-09

资助项目: 国家科技支撑计划课题(2011BAD13B06); 国家自然科学基金项目(40876087, 41076111); 国家“九七三”项目(2011CB409805)

通信作者: 张继红, E-mail: zhangjh@ysfri.ac.cn

山集团有限公司,所取贝类带回实验室将其外壳的附着生物去除,暂养。实验鱼粪便、残饵(鳃鱼)、沉积物来自于楮岛海域牙鲆养殖网箱,以上饵料经低温烘干磨碎过筛(100 μm)后悬浮于过滤海水中。水温(20.3 \pm 2.0) $^{\circ}\text{C}$,盐度31.48 \pm 0.27,pH 8.13 \pm 0.28,DO(7.06 \pm 0.33) mg/L 。

1.2 实验设计与方法

实验一:根据网箱周围悬浮颗粒物浓度(TPM:36.00 \pm 4.58 mg/L ,待发表数据),设置鱼粪、残饵、沉降物三个实验组。实验采用静水的方法,容器分别盛4 L过滤海水,每个实验组设置4个平行和1个空白对照。为了防止饵料沉底,轻微充气。实验持续2 h后,收集粪便和假粪,取水样500 mL,抽滤到预先经450 $^{\circ}\text{C}$ 灼烧后的玻璃纤维滤膜上,用于测定实验前、后悬浮颗粒物TPM、有机物POM及无机物PIM的浓度。实验结束后,将贝类分别置于过滤海水中排空2 h,再次收集粪便。实验结束后,测定实验用贝的壳高、湿重等生物学指标。

实验二:为了了解饵料浓度和质量对长牡蛎、栉孔扇贝、虾夷扇贝、菲律宾蛤仔、紫贻贝摄食行为的影响,在实验一的基础上,每个实验组的饵料浓度按照20%增加,设置2个浓度梯度。称取的饵料过筛后,悬浮于过滤海水中,微充气混匀后,分装到实验用容器中。实验方法同上。

1.3 摄食生理指标的计算方法

按照周毅等^[11]方法,主要计算公式如下:

(1) 对颗粒无机物质的过滤速率

$$\text{IFR} = \text{IRR} + \text{IER}$$

式中,IRR为假粪中无机物质的生成速率(mg/h);IER为粪便中无机物质的生成速率(mg/h);

(2) 滤水率

$$\text{CR} = \text{IFR}/\text{PIM}$$

式中,PIM为海水中颗粒无机物质的含量(mg/L);

(3) 对颗粒有机物质的滤食率

$$\text{OFR} = \text{CR} \times \text{POM}$$

式中,POM为海水中颗粒有机物质的含量(mg/L);

(4) 对颗粒有机物质的摄食率

$$\text{OIR} = \text{OFR} - \text{ORR}$$

式中,ORR为假粪中颗粒有机物质的生成率(mg/h);

(5) 对颗粒有机物质的吸收率

$$\text{AR} = \text{OIR} - \text{OER}$$

其中:OER为粪便中颗粒有机物质的生成率(mg/h);

(6) 吸收效率

$$\text{AE} = \text{AR}/\text{OIR} \times 100\%$$

根据以下的公式对摄食行为指标进行标准化处理,便于不同实验组进行比较^[12]:

$$Y_s = Y_e \times (1/W_e)^b$$

式中, Y_s 为贝类的标准生理指标, Y_e 为实验测得的生理指标, W_e 为实验所用虾夷扇贝的组织干重。 b 值通常位于0.44~0.94范围内^[13],本文实验中间值0.67。

1.4 数据的统计与分析

应用SPSS 10.0软件,将不同饵料组和不同种贝类的滤水率、摄食率等进行双因子方差(two-way ANOVA)及Tukey HSD Multiple Comparisons两两比较;比较5种贝类对某一种饵料的摄食情况或饲料组的成分情况,采用单因子方差分析法。 $P < 0.01$ 视为差异极其显著, $P < 0.05$ 视为差异显著。

2 结果

2.1 实验一的结果

各实验组水体中悬浮颗粒物的特性 3个实验组(残饵、沉降物、鱼粪)的总颗粒物浓度(TPM)、有机物浓度(POM)及有机物比率($f, \%$)等见表1。饲料组、沉降物组、鱼粪组总悬浮颗粒物的平均浓度间无显著性差异(ANOVA, $P > 0.05$),但是,各组间的有机物浓度(POM)及有机物比率差异显著(ANOVA, $P = 0.046 < 0.05$; $P = 0.0086 < 0.05$),其中,饲料组显著高于沉降物组及鱼粪组(Tukey HSD Comparisons, $P < 0.05$);从高到低的顺序为饲料组 > 鱼粪组 > 沉降物组。

实验所用贝类的基本生物学特性 壳高的范围为(64.25 \pm 2.26) ~ (74.97 \pm 3.25) mm ,组织干重介于(1.31 \pm 0.44) ~ (2.89 \pm 0.89) g 之间。单因子方差分析结果显示,各组间软体部干重没有显著性差异,但是,Tukey HSD分析结果显示,沉降物组虾夷扇贝的软体部干重显著高于鱼粪组及微藻组的。

表 1 各实验组悬浮颗粒物的特性
Tab.1 Characteristics of suspended particles in experimental groups

实验组 group	总悬浮颗粒物/(mg/L) TPM	颗粒有机物/(mg/L) POM	颗粒无机物/(mg/L) PIM	有机物比率/% <i>f</i>
残饵 uneaten feed	32.32 ± 3.01	9.87 ± 1.92 ^{ab}	22.45 ± 2.87	30.60 ± 5.16 ^a
沉降物 sediments	32.64 ± 3.42	6.26 ± 0.91 ^{ad}	26.38 ± 2.69	19.15 ± 1.60 ^a
鱼粪 fish feces	32.81 ± 3.48	7.62 ± 1.02 ^b	25.19 ± 2.77	23.24 ± 3.48 ^a

注:同一列中,相同字母表示差异性显著($P < 0.05$)。

Notes: Means values within a column by the same letters are significantly different ($P < 0.05$).

表 2 实验所用贝类及其生物学指标
Tab.2 Shell length/height and weight of the bivalves used in experiment

种类 species	总干重/g dry weight	组织干重/g dry tissue weight	壳长/mm shell length	壳高/mm shell height
虾夷扇贝 <i>P. yessoensis</i>	20.13 ± 6.92	2.43 ± 0.77	69.49 ± 5.20	67.97 ± 6.00
长牡蛎 <i>C. gigas</i>	29.79 ± 0.95	0.74 ± 0.043	59.09 ± 0.67	78.12 ± 0.88
栉孔扇贝 <i>C. farreri</i>	4.81 ± 0.87	0.75 ± 0.10	42.66 ± 2.25	46.38 ± 2.32
菲律宾蛤仔 <i>R. philippinarum</i>	5.69 ± 0.95	1.00 ± 0.12	35.17 ± 0.67	17.34 ± 0.88
紫贻贝 <i>M. eduli</i>	29.06 ± 0.86	3.42 ± 0.61	47.76 ± 3.85	86.98 ± 7.14

5 种贝类对不同质量的食物(颗粒有机物浓度及有机物比率)的摄食能力。实验结果显示,5 种贝类对鱼粪、残饵及网箱周围沉降物都可摄食。但是不同种类摄食行为不同(图 1)。

滤水率 双因子方差分析结果显示,5 种贝类的滤水率差异极其显著($df = 4, F = 19.787, P < 0.01$)。其中,长牡蛎的滤水率最高,平均为(0.34 ± 0.021) L/(h · g),但与栉孔扇贝、虾夷扇贝之间差异不显著(Tukey HSD, $P < 0.01$);紫贻贝的滤水率最低,平均为(0.12 ± 0.021) L/(h · g),显著低于其它 4 种贝类。3 种饵料对贝类的滤水率影响极其显著($df = 2, F = 6.253, P < 0.01$)。5 种贝类对鱼粪的滤水率最大,显著高于残饵和沉积物。

摄食率 5 种贝类的摄食率差异显著(双因子方差分析, $df = 4, F = 4.49, P < 0.01$)。紫贻贝的摄食率最低,其次是虾夷扇贝,2 者之间的摄食率无显著性差异(Tukey HSD, $P > 0.05$)。菲律宾蛤仔、长牡蛎、栉孔扇贝之间的摄食率差异不显著($P > 0.05$),显著高于紫贻贝和虾夷扇贝。5 种贝类对饲料的摄食率最高,显著高于对沉降物、鱼粪的摄食率。单因子方差分析显示,5 种贝类对于饲料的摄食率无显著性差异($P > 0.05$);对沉降物的摄食率差异极其显著($P < 0.01$),菲律

宾蛤仔、长牡蛎、栉孔扇贝显著高于紫贻贝和虾夷扇贝;对鱼粪的摄食率差异极其显著($P < 0.01$),其中栉孔扇贝和菲律宾蛤仔显著高于其它 3 种贝类。

吸收率 双因子方差分析结果显示,5 种贝类的吸收率无显著性差异($P > 0.05$),但对不同饵料的吸收率差异显著($P < 0.05$)。贝类对鱼粪、残饵的吸收率差异不显著(Tukey HSD, $P > 0.05$),都显著高于对沉降物的吸收率($P < 0.05$)。单因子方差分析显示,对于沉降物,5 种贝类吸收率之间差异显著($P < 0.05$);其中,栉孔扇贝、长牡蛎、菲律宾蛤仔的吸收率之间无显著性差异,都显著高于紫贻贝和虾夷扇贝。

吸收效率 5 种贝类的吸收效率之间无显著性差异($P > 0.05$),但不同饵料对贝类的吸收效率有显著性影响($P < 0.05$)。贝类对鱼粪的吸收效率最高(平均为 23.1% ± 2.7%),对沉降物的吸收效率最低(平均为 7.4% ± 2.2%)。

2.2 实验二的结果

悬浮颗粒物及实验贝类的特性 在实验一基础上,每个实验组增加 2 个浓度梯度。悬浮颗粒物的浓度见表 3。总体的趋势是饲料组的有机物含量最高,其次是鱼粪组,沉降物组的有机物含量最低。

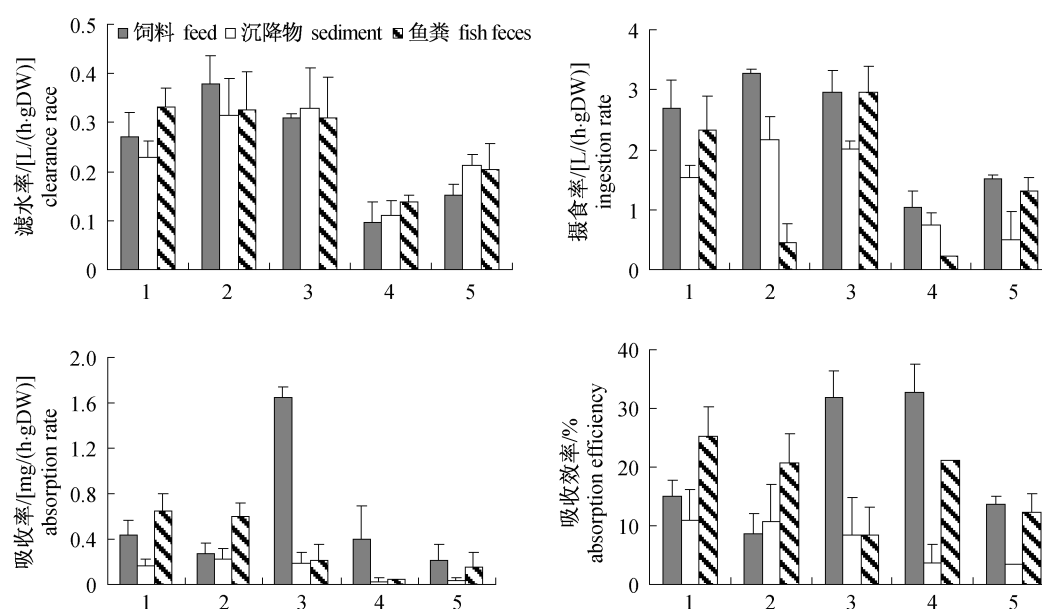


图1 5种贝类对3种饵料的滤水率、摄食率、吸收率及吸收效率

1. 菲律宾蛤仔, 2. 长牡蛎, 3. 栉孔扇贝, 4. 紫贻贝, 5. 虾夷扇贝。

Fig. 1 Clearance rate, ingestion rate, absorption rate and absorption efficiency of 5 species of bivalves to the 3 type of diets

1. *R. philippinarum*, 2. *C. gigas*, 3. *C. farreri*, 4. *M. edulis*, 5. *P. yessoensis*.

表3 各实验组悬浮颗粒物的特性

Tab. 3 Characteristics of suspended particles in each experimental group

实验组 group	总悬浮颗粒物 TPM/ (mg/L)	颗粒有机物 POM/ (mg/L)	颗粒无机物 PIM/ (mg/L)	有机物比率/% <i>f</i>
残饵 uneaten feed	44.90 ± 7.50	10.51 ± 1.19	34.39 ± 6.52	23.65 ± 2.31
沉降物 sediments	45.83 ± 5.31	7.28 ± 1.23	38.55 ± 4.18	15.82 ± 1.17
鱼粪 fish feces	44.77 ± 2.74	10.55 ± 0.60	34.23 ± 2.24	23.57 ± 0.72
	32.08 ± 5.55	9.14 ± 1.61	22.94 ± 3.98	28.50 ± 0.97

不同贝类摄食行为与食物可获得性的关系对有机物的吸收效率(OAE)与有机物含量(POM)呈正相关关系(图2),关系式分别如下:

菲律宾蛤仔 $OAE(\%) = -0.089POM^2 + 4.036POM - 12.29$ ($R^2 = 0.427, P < 0.01$);

长牡蛎 $OAE(\%) = 0.223POM^2 + 0.576POM + 0.856$ ($R^2 = 0.805, P < 0.01$)

栉孔扇贝 $OAE(\%) = 0.04POM^2 + 2.952POM - 6.946$ ($R^2 = 0.579, P < 0.01$);

虾夷扇贝 $OAE(\%) = 0.312POM^{1.762}$ ($R^2 = 0.350, P = 0.018 < 0.05$);

紫贻贝 $OAE(\%) = -0.216POM^2 + 8.517POM - 32.96$ ($R^2 = 0.600, P < 0.01$)。

除虾夷扇贝的吸收效率与有机物含量(POM)呈显著的幂函数关系外,其它4种贝类的吸收效率与POM呈极其显著的多项式的关系。在实验的POM范围内,菲律宾蛤仔、紫贻贝的吸收效率随POM增大增加趋势趋缓,有出现平台的趋势;长牡蛎、栉孔扇贝、虾夷扇贝的吸收效率随POM的变化幅度较大(图2)。

5种贝类对有机物的吸收率(OAR)与有机物浓度(POM)呈显著的线性正相关关系(图3),关系式如下:

菲律宾蛤仔: $OAR = 0.059 \times POM - 0.082$ ($R^2 = 0.457, F = 11.795, P < 0.01$);

长牡蛎: $OAR = 0.541 \times POM - 3.423$ ($R^2 =$

0.853, $F = 104.775$, $P < 0.01$);

栉孔扇贝: $OAR = 0.207 \times POM - 0.999$
($R^2 = 0.582$, $F = 32.082$, $P < 0.01$);

虾夷扇贝: $OAR = 0.118 \times POM - 0.555$
($R^2 = 0.329$, $F = 5.591$, $P < 0.05$);

紫贻贝: $OAR = 0.104 \times POM - 0.552$ ($R^2 =$

0.615, $F = 20.766$, $P < 0.01$)。

其中,长牡蛎的吸收率与 POM 的相关性最好。从关系式的系数来看,长牡蛎的吸收率随 POM 的变化幅度最大,其次是栉孔扇贝,菲律宾蛤仔变化幅度最小。

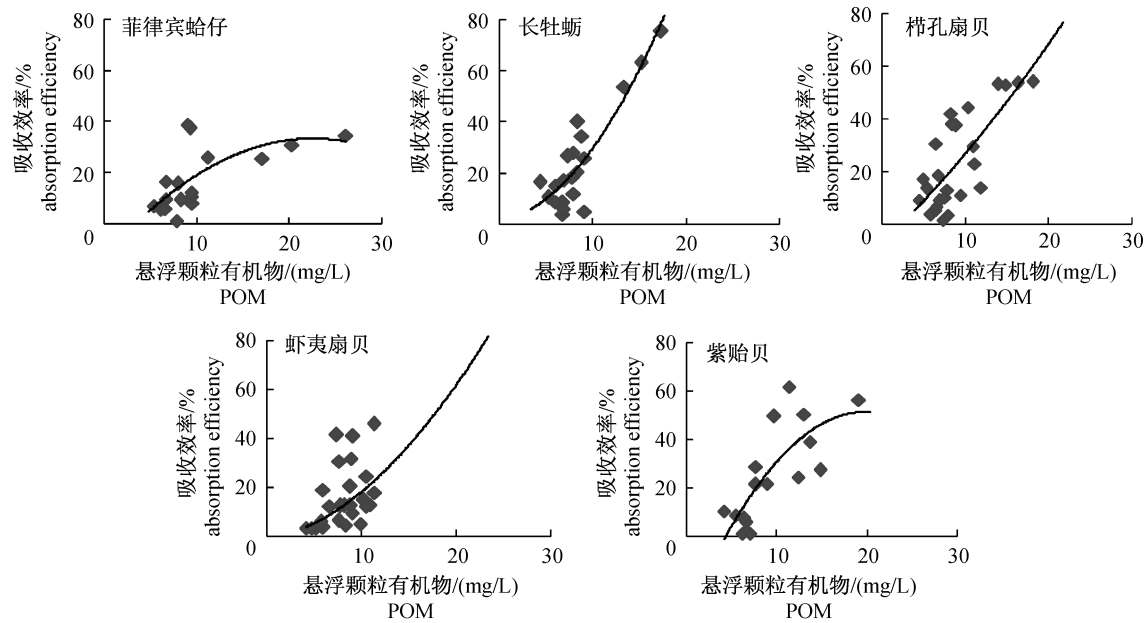


图 2 5 种贝类的吸收效率与有机物比率的关系

Fig. 2 Relationship of absorption efficiency and organic content (f) of the 5 bivalves species

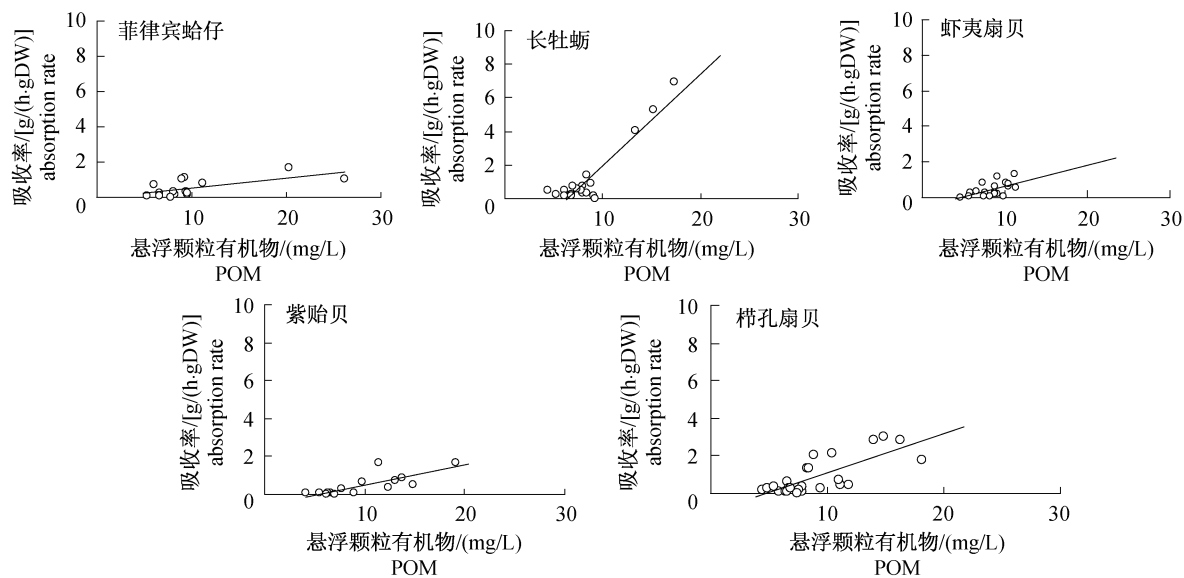


图 3 5 种贝类吸收率与颗粒有机物 POM 的关系

Fig. 3 Relationship of absorption rate and POM of the 5 bivalves species

虽然菲律宾蛤仔的滤水率有随着 TPM 的增加而降低的趋势,但是,相关性不显著 ($P >$

0.05);其它 4 种贝类的滤水率也都与 TPM 无显著的相关性。菲律宾蛤仔、紫贻贝的 ORR 与

TPM 相关性不显著 ($P > 0.05$)。长牡蛎、栉孔扇贝、虾夷扇贝假粪的产生率 (ORR) 随 TPM 的增加而增加,符合 $ORR = a \times TPM + b$ 方程式,5 种

贝类的方程式系数见表 4。由方程计算,长牡蛎、栉孔扇贝、虾夷扇贝假粪产生的 TPM 阈值 (mg/L) 分别为 26.24, 21.64, 27.00。

表 4 假粪产生率与悬浮颗粒物 TPM 的关系式
Tab. 4 Relationship of pseudo-faeces production rate with TPM of the 5 bivalves species

种类 species	a	b	n	r	P	TPM/(mg/L)
菲律宾蛤仔 <i>R. philippinarum</i>	0.013	0.114	25	0.089	0.666 > 0.05	-
长牡蛎 <i>C. gigas</i>	0.136	-3.738	27	0.743	0.000 < 0.01	26.24
栉孔扇贝 <i>C. farreri</i>	0.107	-2.315	29	0.614	0.000 < 0.01	21.64
紫贻贝 <i>M. edulis</i>	0.042	-1.134	27	0.353	0.065 > 0.05	-
虾夷扇贝 <i>P. yessoensis</i>	0.092	-2.216	19	0.840	0.000 < 0.01	27.00

3 讨论

滤食性贝类能否有效的摄食、吸收、利用鱼粪和残饵,是成功建立基于滤食性贝类的 IMTA 模式的关键。本实验的研究结果显示,这 5 种贝类对残饵、鱼粪及沉降物都可以摄食。但是,滤水率、摄食率等低于贝类对自然海水或单胞藻的摄食^[14-16]。不同种类之间的摄食行为也存在差异。

在网箱养殖区,悬浮颗粒物的浓度和质量受投饵频率、数量以及水文、天气等多重因素的影响而存在季节性和昼夜的波动。贝类对悬浮颗粒物数量和质量变化的适应能力,是反应其生存、生长的关键指标。滤食性贝类有一定的调节摄食行为的能力,以便能够在食物条件变化较大的生境中生存和生长。通常,在悬浮颗粒物浓度较高或有机物含量较低条件下,滤食性贝类调节吸收效率 (OAE) 或/和滤水率 (CR),来适应及补偿外界食物条件的变化^[17-18]。这种调节能力又因种类不同而异,例如,欧洲鸟尾蛤 (*Cerastoderma edule*) 通过降低滤水率以防止过高浓度的颗粒物阻塞鳃丝^[19];美国牡蛎 (*Crassostrea virginica*) 通过形成假粪来适应水体中悬浮颗粒物质量和数量的变化^[20]。本文发现,菲律宾蛤仔的滤水率有随着 TPM 的增加而降低的趋势,另外,有假粪产生,但假粪产生率与 TPM 相关性不显著。其它 4 种贝类的滤水率与 TPM 无显著的负相关关系;当 TPM 浓度较高而 f 较低时,主要以产生假粪的形式调节摄食率和能量的获取。假粪产生的阈值及数量与悬浮颗粒物 TPM 有关^[21]。本实验的 5 种贝类中,长牡蛎、栉孔扇贝、虾夷扇贝假粪产生率与 TPM 显著正相关。其中,栉孔扇贝 TPM 阈值为 21.64 mg/L,与 Kuang 等^[21]的研究结果(当

TPM 达 17.7 mg/L,栉孔扇贝有少量假粪产生)相近。假粪产生的阈值受多种因素的影响,即使是同一种类,假粪产生的 TPM 阈值的结果也相差很大,例如,Navarro 等^[20]的实验中发现,TPM 为 3 mg/L 时,巨扇贝 (*Placopecten magellanius*) 就会有假粪产生,假粪产量为总沉积量的 15%。而 MacDonald 等^[22]研究显示,巨扇贝在自然海区 TPM 高达 10 mg/L 时也不产生假粪。可见,假粪产生是非常复杂的生理生态过程,有待进一步的研究。本实验的 5 种贝类的吸收效率都随着有机物含量的增加而增加。随着有机物含量的增加,菲律宾蛤仔和紫贻贝 OAE 增加速度趋缓。

吸收率反应贝类对颗粒物的利用情况,是鱼 + 滤食性贝类综合养殖系统中,体现贝类个体潜在生长情况的一个重要指标。对于饲料,栉孔扇贝的吸收率最高;对于鱼粪,菲律宾蛤仔和长牡蛎的吸收率较好;对于沉降物,长牡蛎、栉孔扇贝、菲律宾蛤仔三者比较接近。

摄食率能够反应贝类对水体中悬浮颗粒物的去除能力。通过贝类的摄食,将较小的颗粒重新包装,以较大的颗粒形式排出(粪便),可以加快水体中颗粒物的沉降,降低水体中悬浮颗粒物的浓度,达到净化水质的作用。总体上看,长牡蛎、栉孔扇贝、菲律宾蛤仔对悬浮颗粒物的去除效果好于紫贻贝和虾夷扇贝。在网箱养殖区,悬浮颗粒物除残饵和鱼粪外,还有其它的颗粒物,如底质中颗粒物受风浪扰动而再悬浮等,有机物含量远低于单纯的残饵或鱼粪。由于饲料、鱼粪等颗粒的理化性质不同,在水中的扩散速度和距离存在差异,因此,在网箱周围不同位置,存在的比例会不同。针对不同区域不同的悬浮颗粒物,可以选择不同的滤食性贝类,以提高对悬浮颗粒物的去

除效果。例如,残饵较多时,菲律宾蛤仔、长牡蛎、栉孔扇贝的去除效果可能会比较好。因此,在鱼+滤食性贝类综合养殖系统中,不论是考虑对水体中颗粒物的去除能力,还是考虑贝类自身的生长,长牡蛎、栉孔扇贝、菲律宾蛤仔都是比较好的候选种。

参考文献:

- [1] Chopin T, Buschmann A H, Halling C, *et al.* Integrating seaweeds into marine aquaculture systems; a key towards sustainability [J]. *Journal of Phycology*, 2001, 37(6) : 975 - 986.
- [2] Parsons G J, Shumway S E, Kuenstner S, *et al.* Polyculture of sea scallops (*Placopecten magellanicus*) suspended from salmon cages [J]. *Aquaculture International*, 2002, 10(1) : 65 - 77.
- [3] Cheshuk B W, Purser G J, Quintana R. Integrated open-water mussel (*Mytilus planulatus*) and Atlantic salmon (*Salmo salar*) culture in Tasmania, Australia [J]. *Aquaculture*, 2003, 218(1 - 4) : 357 - 378.
- [4] Lander T, Barrington K, Robinson S, *et al.* Dynamics of the blue mussel as an extractive organism in an integrated aquaculture system [J]. *Bulletin of the Aquaculture Association of Canada*, 2004, 104(3) : 19 - 28.
- [5] Peharda M, Župan I, Bavčević L, *et al.* Growth and condition index of mussel *Mytilus galloprovincialis* in experimental integrated aquaculture [J]. *Aquaculture Research*, 2007, 38(16) : 1714 - 1720.
- [6] Sara G, Zenone A, Tomasello A. Growth of *Mytilus galloprovincialis* (mollusca, bivalvia) close to fish farms; a case of integrated multi-trophic aquaculture within the Tyrrhenian Sea [J]. *Hydrobiologia*, 2009, 636(1) : 129 - 136.
- [7] Navarrete-Mier F, Sanz-Lazaro C, Marin A. Does bivalve mollusc polyculture reduce marine fin fish farming environmental impact? [J]. *Aquaculture*, 2010, 306(1 - 4) : 101 - 107.
- [8] Macdonald B A, Robinson S M C, Barrington K A. Feeding activity of mussels (*Mytilus edulis*) held in the field at an integrated multi-trophic aquaculture (IMTA) site (*Salmo salar*) and exposed to fish food in the laboratory [J]. *Aquaculture*, 2011, 314(1 - 4) : 244 - 251.
- [9] Gao Q F, Shin P K S, Lin G H, *et al.* Stable isotope and fatty acid evidence for uptake of organic waste by green-lipped mussels *Perna viridis* in a polyculture fish farm system [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2006, 317 : 273 - 283.
- [10] Redmond K J, Magnesen T, Hansen P K, *et al.* Stable isotopes and fatty acids as tracers of the assimilation of salmon fish feed in blue mussels (*Mytilus edulis*) [J]. *Aquaculture*, 2010, 298(1 - 4) : 202 - 210.
- [11] 周毅, 杨红生. 应用于贝类生理生态研究的生物沉积法 [J]. *生态学杂志*, 2002, 21(6) : 74 - 76, F004.
- [12] Galimany E, Ramón M, Ibarrola I. Feeding behavior of mussel *Mytilus galloprovincialis* (L.) in a Mediterranean estuary: A field study [J]. *Aquaculture*, 2011, 314(1 - 4) : 236 - 243.
- [13] Jämeğren J, Altin D. Filtration and respiration of the deep living bivalve *Acesta excavate* (J. C. Faricius, 1779) (Bivalvia; Limidae) [J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2006, 334(1) : 122 - 129.
- [14] 王吉桥, 于晓明, 郝玉冰, 等. 4种滤食性贝类滤水率的测定 [J]. *水产科学*, 2006, 25(5) : 217 - 221.
- [15] 周毅, 毛玉泽, 杨红生, 等. 四十里湾栉孔扇贝清滤率、摄食率和吸收效率的现场研究 [J]. *生态学报*, 2002, 22(9) : 1455 - 1462.
- [16] 徐东, 张继红, 王文琪, 等. 虾夷扇贝的摄食生理研究 [J]. *渔业科学进展*, 2010, 31(4) : 85 - 91.
- [17] Bayne B L, Hawkins A J S, Navarro E. Feeding and digestion by the mussel *Mytilus edulis* L. (Bivalvia; Mollusca) in mixtures of silt and algal cells at low concentrations [J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 1987, 111(1) : 1 - 22.
- [18] Hawkins A J S, Smith R F M, Bayne B L, *et al.* Novel observations underlying the fast growth of suspension feeding shellfish in turbid environments: *Mytilus edulis* [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1996, 131 : 179 - 190.
- [19] Navarro E, Iglesias J I P, Ortega M M. Natural sediment as a food source for the cockle *Cerastoderma edule* (L.) : effect of variable particle concentration on feeding, digestion and scope for growth [J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 1992, 156(1) : 69 - 87.
- [20] Newell R I E, Jordan S E. Preferential ingestion of organic material by the American oyster *Crassostrea virginica* [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1983, 13(1) : 47 - 53.
- [21] Navarro J M, Thompson R J. Comparison and evaluation of different techniques for measuring

- absorption efficiency in suspension feeders [J]. *Limnology and Oceanography*, 1994, 39 (1) : 159 - 164.
- [22] Kuang S, Fang J, Sun H, *et al.* Seasonal studies of filtration rate and absorption efficiency in the scallop *Chlamys farreri* [J]. *Journal of Shellfish Research*, 1997, 16(1) : 39 - 45.
- [23] MacDonald B A, Thompson R J. Influence of temperature and food availability on the ecological energetics of the giant scallop *Placopecten magellanicus*-III. Physiological ecology, the gametogenic cycle and scope for growth [J]. *Marine Biology*, 1986, 93(1) : 37 - 48.

Feeding behavior of 5 species filter-feeding bivalves on *Paralichthys olivaceus* feed, fecal and sediment particulates in cage farming area

ZHANG Jihong¹, WU Tao^{1,2}, GAO Yaping¹, TANG Wang^{1,3}

(1. Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071, China;

2. College of Fisheries and Life Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

3. College of Biology Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract: 5 species bivalves' feeding behavior on different food, including flounder (*Paralichthys olivaceus*) faeces, residul feed and deposition was studied so as to discuss the potential IMTA based on filter-feeding bivalves. Results showed the 5 species bivalves could feed on fish faeces, residul feed and deposition. However, different species showed different feeding behaviors. Ingestion rates of oyster, clam and scallop were significantly higher than the other 2 species (two-way ANOVA, $P < 0.01$), and absorption efficiency (AE) and absorption rate (AR) of the 5 species bivalves were not significantly different. Diet had significant influence on the feeding behavior. With particle organic matter (POM) increasing, AE increased. There were significantly linear relationship between AR and POM. TPM threshold for pseudo-feces production of oyster and scallop and was 26.24, 21.64, 27.00 mg/L, respectively, and the 5 species bivalves could regulate food intake by pseudo-feces production. The shellfish + fish IMTA mode, clam *Ruditapes philippinarum*, oyster *Crassostrea gigas* and scallop *Chlamys farreri* are relatively good candidate species.

Key words: total suspended particulate matter; organic content; feeding behavior; filter-feeding bivalves; integrated multi-trophic aquaculture (IMTA)

Corresponding author: ZHANG Jihong. E-mail: zhangjh@ysfri.ac.cn