

蓝文陆,付家想,杨斌,等. 香港巨牡蛎对3种微藻的选择性摄食研究[J]. 海洋学报, 2018, 40(8): 79—88, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2018.08.008

Lan Wenlu, Fu Jiayang, Yang Bin, et al. Study on feeding selectivity of *Crassostrea hongkongensis* feeding on three different phytoplankton[J]. Haiyang Xuebao, 2018, 40(8): 79—88, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2018.08.008

香港巨牡蛎对3种微藻的选择性摄食研究

蓝文陆^{1,2,3}, 付家想³, 杨斌², 李天深³, 范航清¹, 李琼珍⁵, 黄凌风^{4*}

(1. 广西科学院 广西红树林研究中心 广西红树林保护与利用重点实验室, 广西 北海 536007; 2. 钦州学院 广西北部湾海洋灾害研究重点实验室, 广西 钦州 535099; 3. 广西壮族自治区海洋环境监测中心站, 广西 北海 536000; 4. 厦门大学环境与生态学院, 福建 厦门 361102; 5. 广西水产研究院 贝类科学实验站, 广西 南宁 530004)

摘要: 从微藻粒径大小、饵料密度以及营养价值角度, 选取牟氏角毛藻(*Chaetoceros muelleri*)、亚心形扁藻(*Platymonas subcordiformis*)、球等鞭金藻(*Isochrysis galbana*)分别作为硅藻、绿藻和金藻的代表, 开展了不同规格的香港巨牡蛎对3种微藻在同等密度、同等生物量混合条件下的摄食选择性研究。结果显示, 香港巨牡蛎在两种不同混合藻条件下对3种不同微藻摄食选择性有显著性差异($P < 0.01$)。3种藻相同密度混合条件下, 大、中、小3种规格香港巨牡蛎更倾向摄食粒径较大的亚心形扁藻, 且贝类规格越大选择倾向性越低, 摄食选择效率分别为0.32、0.35、0.48, 对球等鞭金藻无明显选择性。3种藻等生物量混合条件下, 香港巨牡蛎对亚心形扁藻和球等鞭金藻的摄食有选择性, 且规格大小对选择效率影响显著($P < 0.01$), 个体越小选择性越强, 小规格香港巨牡蛎倾向滤食亚心形扁藻($P < 0.01$), 大、中规格更倾向摄食粒径较小的球等鞭金藻。两种混合条件下, 香港巨牡蛎都对牟氏角毛藻都有负的选择效率, 而且牟氏角毛藻密度越高负值绝对值越大。微藻的细胞大小、形状、营养价值以及香港巨牡蛎的个体大小都对摄食选择性有着明显的影响, 香港巨牡蛎的摄食选择性在现场海区中还明显受到生境及食物条件的限制。

关键词: 香港巨牡蛎; 微藻; 选择性摄食; 摄食选择效率

中图分类号: S917.4

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2018)08-0079-10

1 引言

关于滤食性双壳贝类对不同食物颗粒的选择性摄食, 国内外已有学者做过一些研究, 但贝类对食物颗粒是否真正具有选择性仍具争议。Riisgard^[1]通过研究发现贝类对浮游微藻的摄食只存在粒级大小的选择性, 而对种类没有选择性, 如微藻颗粒大小相近

时, 合浦珠母贝(*Pinctada fucata*)摄食无选择性, 但对大粒级的食物选择性明显高于小颗粒^[2]。也有研究发现, 贝类选择性摄食与否与贝类的种类有一定的关系, 如沙海螂(*Mya arenaria*)对含有麻痹性贝毒的甲藻(*Dinoflagellate*)在消化前表现出很强的选择能力, 而紫贻贝(*Mytilus edulis*)、扇贝(*Plaopecten magellanicus*)等则不明显^[3-4]。背角无齿蚌对浮游微藻

收稿日期: 2018-01-05; 修订日期: 2018-03-13。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41466001); 广西科技计划项目(桂科 A A17129001, 桂科 A D17129041); 广西自然科学基金项目(2015GXNSFB A139194, 2015GXNSFA A139244); 广西红树林保护与利用重点实验室开放基金项目(GKLMC-200504)。

作者简介: 蓝文陆(1980—), 男, 广西省河池市人, 高级工程师, 主要从事海洋生态学研究。E-mail: dr.lan@139.com

* 通信作者: 黄凌风, 教授, 博士生导师。E-mail: huanglf@xmu.edu.cn

的摄食也不具有选择性^[5]；另外张莉红^[6]认为食物价值营养价值越高，贝类对其选择性越显著。对香港巨牡蛎(*Crassostrea hongkongensis*)的研究，主要集中在遗传、育种以及部分有关摄食、生理代谢方面^[7-12]，有关香港巨牡蛎对不同食物颗粒的摄食是否具有选择性及其机制的研究尚未见报道。

香港巨牡蛎属于暖水性贝类，原称近江牡蛎，俗称“白蚝”，是我国粤西、广西沿海特有的优质食用贝，是广东和广西的一个重要养殖品种。自2003年香港学者 Lam 和 Morton^[13]将珠江三角洲的近江牡蛎定为一个新种并命名为香港巨牡蛎以来，各界学者对其便多有研究。本文选取几种常见且具有代表性的牟氏角毛藻(*Chaetoceros muelleri*)、球等鞭金藻(*Isochrysis galbana*)、亚心形扁藻(*Platymonas subcordiformis*)作为其饵料，研究香港巨牡蛎对不同微藻的选择性摄食，对了解香港巨牡蛎的摄食机制，指导香港巨牡蛎的饵料培养、育苗和海水养殖有重要意义，同时为发掘香港巨牡蛎滤食、控藻能力及其对养殖环境的生态影响提供科学依据。

2 实验材料与方法

2.1 实验材料

香港巨牡蛎取自广西钦州市茅尾海龙门海域牡

蛎筏式养殖区，分别在养殖1龄、2龄、3龄的养殖筏中选取壳高6 cm、10 cm、14 cm左右代表小(S)、中(M)、大(L)3种不同规格的牡蛎个体。香港巨牡蛎运回国家贝类产业体系广西贝类综合实验站(北海)开展实验。清洗干净并去除贝壳上的附着物，放入装有80 L砂滤海水的塑料水箱中暂养1周。暂养期间持续充气，每两天换一次海水，保证牡蛎的活性；早晚定时投喂10 L浓度约 3×10^5 cells/L的小球藻(*Chlorella* sp.)各一次。暂养期间观察牡蛎个体的活性，实验前一天停止投饵，随机挑选活性较好的个体进行实验。暂养香港巨牡蛎以及培养微藻的海水为北海市铁山港竹林海域砂滤海水，盐度22~24，海水温度26~28℃。

实验用藻为北部湾近岸海域常见的牟氏角毛藻、球等鞭金藻、亚心形扁藻，分别代表硅藻、金藻和绿藻，均取自国家贝类产业体系广西贝类综合实验站(北海)藻类二级扩种培养室。实验前3种藻经过400目筛绢去除杂质，并在40倍显微镜下测定其细胞大小；每种藻选择3个视野，每个视野随机选定10个细胞测量；每种藻的大小规格及其近似球体时的直径参数如表1。

表1 实验所用3种藻的生物参数

Tab.1 Biological parameters of the experimental algae

藻种	大小/mm	直径/mm
牟氏角毛藻 <i>Chaetoceros muelleri</i>	长 4.5 ± 0.11 ; 宽 3.5 ± 0.08	4.1 ± 0.22
球等鞭金藻 <i>Isochrysis galbana</i>	长 6.1 ± 0.25 ; 宽 4.5 ± 0.15	5.5 ± 0.26
亚心形扁藻 <i>Platymonas subcordiformis</i>	长 11.0 ± 0.47 ; 宽 9.0 ± 0.84	9.9 ± 0.94

注：直径为近似球体时的参数，牟氏角毛藻参数未包括角毛。

2.2 实验设计

等密度微藻混合藻液(表2)：室内采用稀释法将3种藻等密度混合，制备牟氏角毛藻、球等鞭金藻、亚心形扁藻的最终浓度均为 3.5×10^4 cells/L的等密度混合藻液。

等生物量微藻混合藻液(表2)：3种实验微藻单个细胞的体积、生物量按照孙军细胞体积表面积模型及转换生物量^[14]的方法计算，其中牟氏角毛藻和亚心形扁藻采用圆柱体模型、等鞭金藻采用圆锥加半球复合体模型计算，并根据3种微藻的个体生物量取

相应的密度，制备3种微藻生物量均为0.6 mg/mL(以碳计)的等生物量混合藻液。等生物量摄食实验中牟氏角毛藻、球等鞭金藻、亚心形扁藻3种微藻对应的密度分别为 1.8×10^5 cells/L、 6×10^4 cells/L和 1.5×10^4 cells/L。

香港巨牡蛎对3种混合藻的摄食率和清滤率以及选择性摄食采用贝类和3种微藻混合培养，在清洗干净容积为5 L的塑料桶中加入4 L 3种微藻的混合藻液，轻移准备好经24 h饥饿处理的香港巨牡蛎放入塑料桶中，每个塑料桶放入1只香港巨牡蛎，观察

记录每个塑料桶中香港巨牡蛎开口摄食时间,开口时计时并在 1 h 后取出牡蛎同时取经搅拌均匀的 10 mL 试验水体用鲁戈试剂固定。香港巨牡蛎按个体分为大(L)、中(M)、小(S) 3 种不同规格,每种规格选择 3 个大小相近的个体作为 3 个重复,另设一个无贝壳空白作为对照以消除饵料繁殖和自然沉降的影响。

实验中用气石充气使饵料混合均匀并保证有充足的溶氧,气量以不搅动桶底排泄物为准。

将实验后固定好的藻类样品,摇匀后用移液枪取 100 mL 放入浮游生物计数框在显微镜下计数。测定香港巨牡蛎的壳高,随即开壳取出软体部,在烘箱(60℃)中烘干 48 h,称量其干质量(精确到 0.001 g)。

表 2 香港巨牡蛎对 3 种混合藻选择性摄食实验设计

Tab.2 Design of experiment of feeding selectivity on three-mixed algae by different size of *C. hongkongensis*

组别	等密度					等生物量				
	藻密度/ 10^4 cells · mL ⁻¹			香港巨牡蛎		藻密度/ 10^4 cells · mL ⁻¹			香港巨牡蛎	
	牟氏角毛藻	球等鞭金藻	亚心形扁藻	壳高/mm	软体干质量/g	牟氏角毛藻	球等鞭金藻	亚心形扁藻	壳高/mm	软体干质量/g
大(L)	3.5	3.5	3.5	134±31	1.77±0.2	18	6	1.5	141.3±25	1.78±0.3
中(M)	3.5	3.5	3.5	96.7±20	1.64±0.3	18	6	1.5	105.4±24	1.38±0.2
小(S)	3.5	3.5	3.5	68.2±16	0.68±0.1	18	6	1.5	72.7±18	0.87±0.1

2.3 香港巨牡蛎对微藻摄食的计算方法

单位个体清滤率(CR_{ind})、摄食率(FR_{ind})以及单位质量的清滤率(CR_{mass})、摄食率(FR_{mass});清滤率、摄食率按以下公式进行计算:

清滤率:

$$CR_{mass} = \frac{Q_0 - Q_1}{Q_0} \times \frac{(1/W)^b}{T} \times V_s, \quad (1)$$

$$CR_{ind} = \frac{\ln Q_0 - \ln Q_1}{N \times T} \times V, \quad (2)$$

摄食率:

$$FR_{mass} = (Q_0 - Q_1) \times \frac{(1/W)^b}{T} \times V_s, \quad (3)$$

$$FR_{ind} = \frac{(Q_0 - Q_1) \times V}{N \times T}, \quad (4)$$

式中, Q_0 、 Q_1 分别为香港巨牡蛎摄食前后海水中微藻细胞密(cells/L); V_s 为实验用海水体积(L); W 为香港巨牡蛎软体部干质量(g); N 为实验牡蛎个数; T 为摄食时间(h); b 取 0.62^[1](b 值为体质量指数)。

对微藻的摄食选择效率 SE (selection efficiency)按以下公式计算^[15]:

$$SE = \frac{(FR_{vx}/FR_{vz} - V_{zx}/V_{zz})}{1 - (V_{zx}/V_{zz})}, \quad (5)$$

式中, FR_{vx} 为香港巨牡蛎摄食某种藻的 FR_v (FR_v 为单位时间单位干质量香港巨牡蛎所滤食某种藻的体积)值; FR_{vz} 为香港巨牡蛎对所有混合藻类的 FR_v 值; V_{zx} 为某种藻的总体积; V_{zz} 为混合藻的总体积。

通过 SE 指标的计算方法可知,只有当香港巨牡蛎对于某种藻的体积滤食率相对混和藻的总体积摄食率的比例高于某藻滤食体积相对混和藻滤食总体积的比例时,摄食选择效率(SE)才为正值,且当香港巨牡蛎对某种藻的 SE 大于 0 时, SE 值越大香港巨牡蛎对其选择性倾向越强。

3 实验结果

3.1 相同微藻密度下香港巨牡蛎的清滤率与摄食率

相同藻密度(3.5×10^4 cells/L)条件下(图 1),香港巨牡蛎对牟氏角毛藻、球等鞭金藻和亚心形扁藻的单位个体清滤率变化范围分别为 0.49 ~ 2.79 L/(ind · h)、2.2 ~ 3.33 L/(ind · h)和 2.76 ~ 8.81 L/(ind · h)。香港巨牡蛎对牟氏角毛藻和球等边金藻的清滤率差异不明显($P > 0.05$),但显著低于对亚心形扁藻的清滤率。香港巨牡蛎对 3 种微藻的单位个体清滤率均随壳高增大而增大。同密度条件下,以单位体重清滤率计,香港巨牡蛎对亚心形扁藻[2.48 ~ 3.03 L/(ind · h)]的清滤率略高于球等边金藻[1.52 ~ 2.3 L/(ind · h)],但小规格牡蛎差异不显著($P > 0.05$)(图 1);香港巨牡蛎对对牟氏角毛藻的清滤率[0.66 ~ 1.4 L/(ind · h)]显著低于其对亚心形扁藻和球等鞭金藻的单位体质量清滤率($P < 0.05$)。不同规格的香港巨牡蛎对同种微藻的单位体质量清滤率差异性不显著($P > 0.05$)。

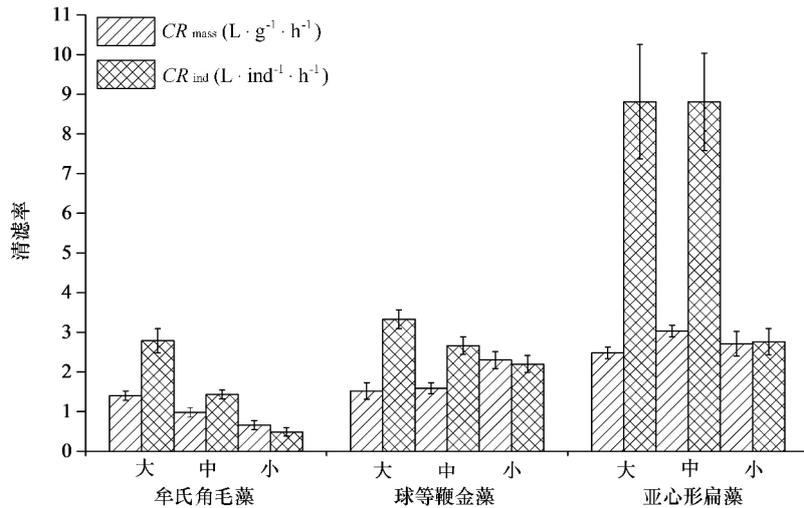


图 1 不同规格香港巨牡蛎在相同藻密度条件下对 3 种微藻的清滤率

Fig.1 Clearance rate of three different phytoplankton by different size of *C. hongkongensis* in same algae density

香港巨牡蛎对同密度 3 种微藻的单位体质量摄食率变化趋势与单位个体清滤率的变化趋势相同,即贝类规格越大摄食率越大(图 2),其中中规格和大规格香港巨牡蛎对亚心形扁藻的单位体质量摄食率最高,达到 1.24×10^8 cells/(ind · h),最低为小规格香港巨牡蛎对伞氏角毛藻的摄食率 [1.6×10^7 cells/(ind ·

h)].但香港巨牡蛎对等密度 3 种微藻的单位体质量摄食率在不同规格个体之间的变化趋势不明显。在相同微藻密度混合条件下,香港巨牡蛎对 3 种微藻的单位个体摄食率和单位体质量摄食率的差异与清滤率相似(图 2)单位体质量摄食率变化趋势与清滤率变化基本相同(图 2)。

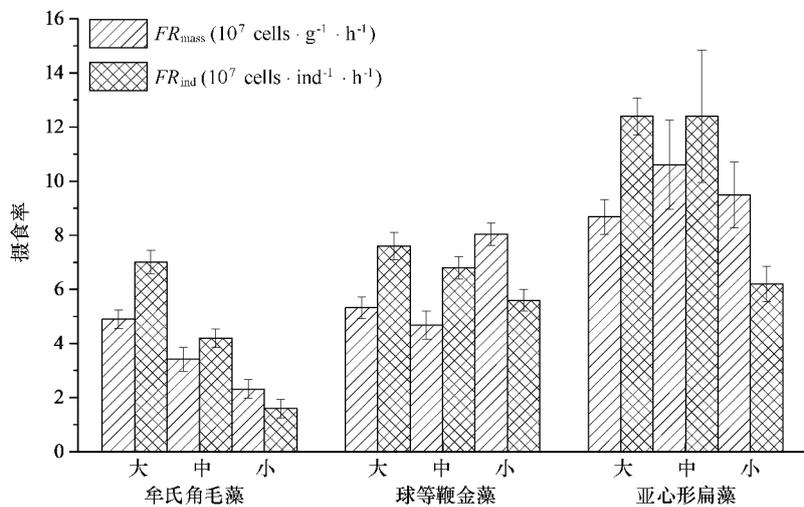


图 2 不同规格香港巨牡蛎在相同藻密度条件下对 3 种微藻的摄食率

Fig.2 Filtration rate of three different phytoplankton by different size of *C. hongkongensis* in same algae density

3.2 相同微藻生物量下香港巨牡蛎的清滤率与摄食率

图 3 和图 4 分别展示了大、中、小 3 种不同规格的香港巨牡蛎在相同微藻生物量(0.6 mg/mL,以碳计)条件下对 3 种微藻的清滤率和摄食率。香港巨牡

蛎对伞氏角毛藻、球等鞭金藻、和亚心形扁藻的个体清滤率变化范围分别为 0.46~3.97 L/(ind · h)、4.53~7.53 L/(ind · h)和 2.44~4.48 L/(ind · h)。香港巨牡蛎对 3 种微藻的单位个体清滤率差异明显($P < 0.05$),表现为 $CR_{球} > CR_{亚} > CR_{伞}$;不同规格的香港巨

牡蛎对球等边金藻和亚心形扁藻的个体清滤率差异不显著($P>0.05$),但不同规格牡蛎对牟氏角毛藻组

的清滤率差异性显著,规格越小个体清滤率越小。

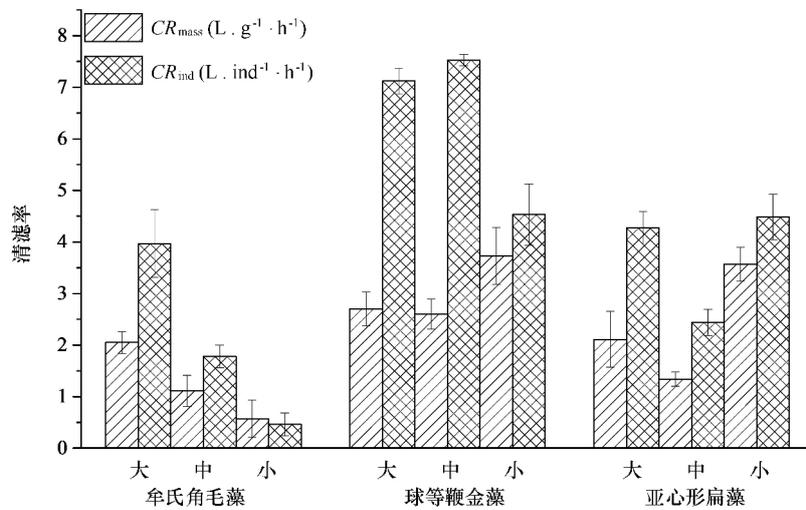


图 3 不同规格香港巨牡蛎在相同藻生物量条件下对 3 种微藻的清滤率

Fig.3 Clearance rate of three different phytoplankton by different size of *C. hongkongensis* in same algae biomass

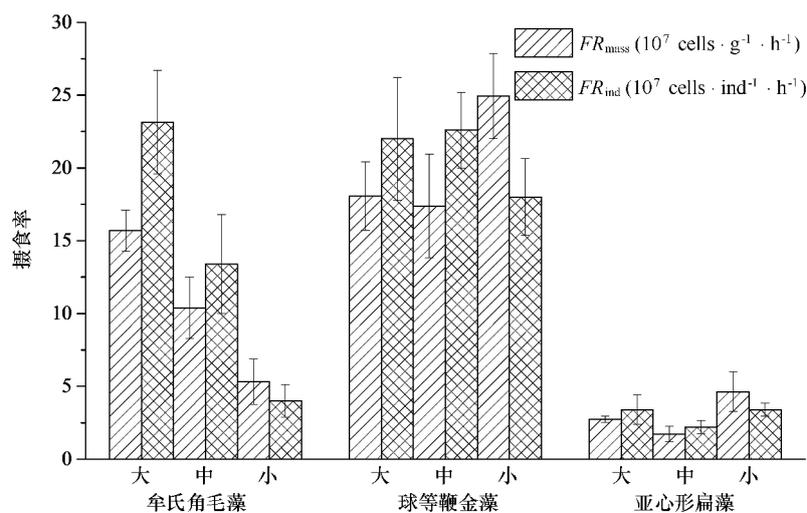


图 4 不同规格香港巨牡蛎在相同藻生物量条件下对 3 种微藻的摄食率

Fig.4 Filtration rate of three different phytoplankton by different size of *C. hongkongensis* in same algae biomass

香港巨牡蛎单位体质量摄食率变化趋势与单位个体清滤率的变化趋势相同,对牟氏角毛藻组摄食率变化范围为 $4 \times 10^7 \text{ cells}/(\text{ind} \cdot \text{h}) \sim 2.31 \times 10^8 \text{ cells}/(\text{ind} \cdot \text{h})$,并且规格越大,摄食率越大;对球等边金藻组的摄食率差异不显著($P>0.05$),摄食率为 $1.8 \times 10^8 \sim 2.26 \times 10^8 \text{ cells}/(\text{ind} \cdot \text{h})$;对亚心形扁藻的摄食率最低,为 $2.2 \times 10^7 \sim 3.4 \times 10^7 \text{ cells}/(\text{ind} \cdot \text{h})$ 。单位体质量摄食率变化趋势与清滤率变化基本相同(图 1.4),大小不同规格香港巨牡蛎对牟氏角毛藻的单位

体质量摄食率呈现出随着个体的增大而增大的特征,但香港巨牡蛎对球等边金藻和亚心形扁藻的摄食均表现小规格牡蛎单位体质量摄食率最大(图 4)。在等生物量 3 种微藻混合条件下,香港巨牡蛎对球等鞭金藻的单位体质量摄食率最高,其次是对牟氏角毛藻的单位体质量摄食率居次,对亚心形扁藻的单位体重摄食率最低。

3.3 相同微藻密度下的香港巨牡蛎的摄食选择性

等密度微藻条件下 3 种规格香港巨牡蛎对亚心形

扁藻的摄食选择效率均为正值(图 5),大、中、小 3 种规格的香港巨牡蛎对混合藻中亚心形扁藻的选择效率分别为 0.32、0.35、0.48,大、中规格对亚心形扁藻的选择效率差异不显著($P>0.05$),小规格的选择效率明显高于

大规格和中规格($P<0.05$)。香港巨牡蛎对牟氏角毛藻的选择效率为负值,而且牡蛎规格越小选择效率负值越大。香港巨牡蛎对球等鞭金藻的摄食效率也为负值,但不同规格牡蛎之间的差异不显著。

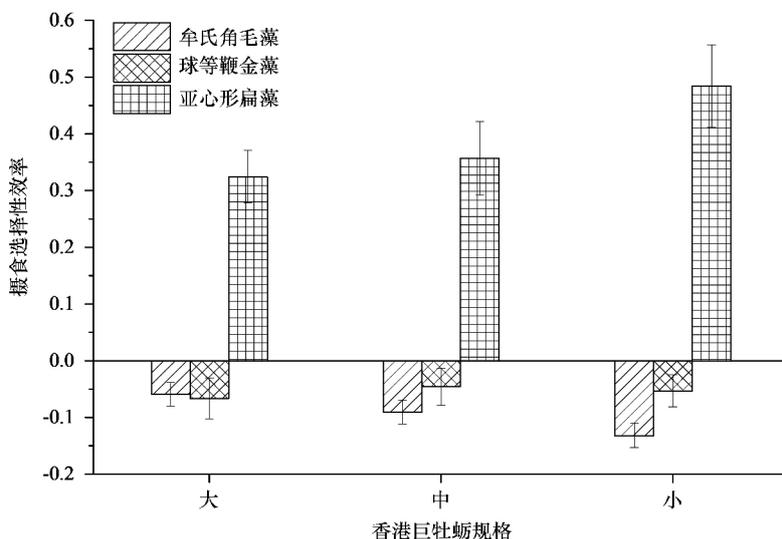


图 5 香港巨牡蛎在相同藻密度条件下对 3 种微藻的摄食选择效率

Fig.5 Selection efficiency of three different phytoplankton by different size of *C. hongkongensis* in same algae density

3.4 相同微藻生物量下香港巨牡蛎的摄食选择性

等生物量条件下,3 种规格香港巨牡蛎对球等鞭金藻和亚心形扁藻的选择效率均大于 0,对牟氏角毛藻的选择效率小于 0(图 6)。小规格香港巨牡蛎对亚心形扁藻的选择效率显著高于中等规格和大规格,小规格和中规格香港巨牡蛎对球等鞭金藻的选择效率也高于大规格个体。香港巨牡蛎对牟氏角毛藻的选择效率同样呈现出规格越小选择效率的负值绝对值越大 ($P<0.01$)。

4 讨论

4.1 香港巨牡蛎对不同微藻的选择性摄食

关于滤食性双壳贝类对不同食物颗粒的选择性摄食,贝类对微藻是否真正具有选择性仍具争议^[1-5,16-17]。本研究的实验结果显示不管是在相同藻类密度的混合条件下,还是在相同生物量藻类的混合条件下,香港巨牡蛎对亚心形扁藻、球等鞭金藻和牟氏角毛藻的清滤率、摄食率均有着一定的差异,甚至在大部分相同规格香港巨牡蛎条件下对不同微藻的清滤率和摄食率有着显著的差异,香港巨牡蛎对 3 种实验微藻的摄食选择效率也有明显不同,表明了在本研究的 3 种微藻两种混合方式条件下,香港巨牡蛎对 3 种实验微藻表现出了对混合藻具有摄食选择性。

在微藻相同密度的条件下,香港巨牡蛎对亚心形扁藻的清滤率显著高于其他两种粒径较小的微藻,在相同微藻生物量的条件下香港巨牡蛎对亚心形扁藻也呈现出较高的清滤率,摄食选择效率的结果也显示了香港巨牡蛎对亚心形扁藻具有明显的正向选择性且选择效率最高,表明了香港巨牡蛎对亚心形扁藻具有明显的选择性。本实验用到的 3 种微藻细胞,除去牟氏角毛藻的角毛后亚心形扁藻是实验微藻中细胞最大的微藻(表 1),实验结果表明在所选用 4~11 μm 大小的 3 种微藻中香港巨牡蛎更倾向于选择摄食粒径较大的微藻颗粒,颗粒越大选择性越强,这与单种微藻培养摄食结果相符^[17],也和合浦珠母贝对大颗粒亚心形扁藻有明显摄食选择性^[2]的结果一致。滤食性贝类的摄食机制主要有两种,分别为黏液纤毛作用和水动力作用^[18]。根据黏液纤毛的作用机制,如果香港巨牡蛎在摄食过程中仅依靠腮丝、纤毛的机械过滤以及随后黏液包裹作用,那么粒径大的微藻颗粒被漏食的几率要小,而当密度相同且均匀分布的食物颗粒流经腮时腮丝和纤毛对表面积较大的颗粒接触到的概率更大,相比小粒径颗粒不需要消耗更多的能量去捕获,这可能是香港巨牡蛎对大颗粒微藻具有较高摄食选择性的重要原因。在滤食性双壳贝类的食谱

中,食物颗粒的粒径、形状等因素能够决定其在贝类摄入后的最终去向; Rosa 等^[19]通过电势测量出巨牡蛎属 *Virginica* 和贻贝食物颗粒表面存在“黏性”结构,并且通过实验证明两种牡蛎均可区别食物颗粒的表面特性; Espinosa 等^[20]也认为贝类对食物颗粒的选择性摄食不仅依靠食物颗粒对消费者的定向刺激,更

重要的是悬浮颗粒与外套膜表面均存在特定的化学识别位点,贝类分泌的黏液中存在一种能够识别微藻表面糖类碳水化合物并与糖类能可逆性结合的外源凝集素,这可能是相对于其他两种微藻有机物含量高、营养价值高的大粒径亚心形扁藻在混藻中被优先摄食的重要原因。

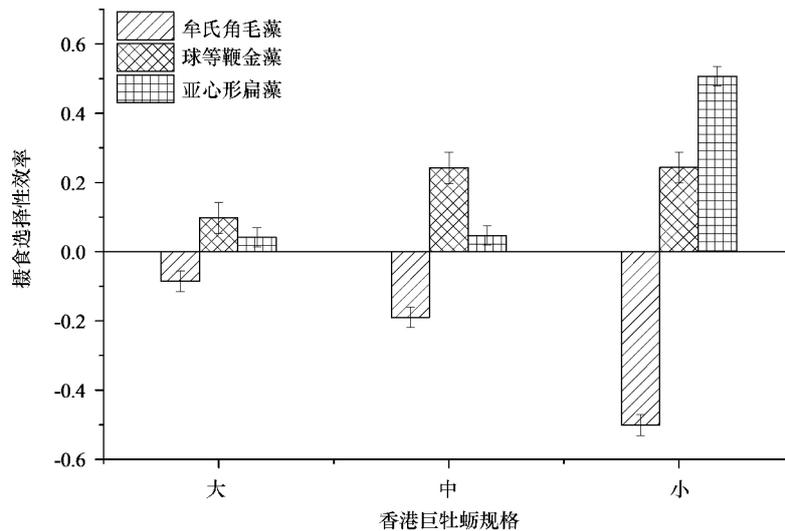


图6 香港巨牡蛎在相同藻生物量条件下对3种微藻的摄食选择效率

Fig.6 Selection efficiency of three different phytoplankton by different size of *C. hongkongensis* in same algae biomass

在相同微藻密度和生物量条件下香港巨牡蛎对牟氏角毛藻均呈现出较低的清滤率,摄食选择效率也均为负值,表明了香港巨牡蛎对牟氏角毛藻采取了一定的避食措施,而且在牟氏角毛藻密度高的等生物量条件下其摄食选择效率负值更明显(图5和图6),表明密度越高避食性越强。这和在单种微藻培养条件下香港巨牡蛎对牟氏角毛藻比亚心形扁藻及球等鞭金藻的清滤率低的结果相符^[17],高如承等^[21]报道的西施舌稚贝对牟氏角毛藻的摄食也具有类似的现象。作为贝类饵料的重要类群,绿藻、金藻、硅藻3个纲的藻类在双壳贝类育种、育苗中被广泛使用,不同饵料对贝类的食物效果不同,饵料的营养价值取决很多因素^[22-24],如甾醇、脂肪含量、脂肪酸组成以及摄食的难易程度。本研究中香港巨牡蛎对3种微藻不同的清滤率及摄食选择性结果差异可能与3种微藻的细胞形态及其表面的物质组成、营养价值差异有关^[25-26]。从细胞大小形状来看,牟氏角毛藻具较长的角毛(一般为藻体的5~6倍),贝类在摄取时角毛上的倒刺可能会损害其腮丝和纤毛,导致其对贝类适口性较低,而且牟氏角毛藻细胞壁高度硅质化,壳体

坚硬以及角毛使得营养价值相对其他两种微藻低而降低香港巨牡蛎对其摄食强度。张莉红等^[27]研究也发现在粒径相似的硅藻和甲藻面前,栉孔扇贝(*Chlamys farreri*)更倾向摄食无硅质细胞壁的甲藻,认为栉孔扇贝可能将具有硅质细胞壁的硅藻识别为无机颗粒而倾向选择有机物含量高的甲藻。因此不同微藻种类的细胞大小、形态、营养价值等特征差异,导致了香港巨牡蛎在摄食过程中产生了选择性的差异。

4.2 不同规格大小对香港巨牡蛎摄食选择性的影响

本研究的实验结果显示香港巨牡蛎对不同微藻的摄食选择性在不同规格情况下有着明显的差异,小规格的个体对亚心形扁藻更具选择性而对牟氏角毛藻更具避食性,大规格个体的选择性和避食性更弱(图5和图6)。通常情况下,个体大小生物的口径有着较大差异,个体越大口径越大,更适合于摄食较大的食物颗粒。但本研究小个体香港巨牡蛎对细胞粒径更小的球等鞭金藻的选择性反而低于细胞粒径大的亚心形扁藻,这可能与本实验所选用的牡蛎规格及微藻规格有关。本实验所选用的3种藻类大小均在香港巨牡蛎的适宜饵料范围(2~60 μm),而且所选用

小规格的牡蛎已属 1 龄幼贝,因此对 3 种微藻的摄食不存在受口径影响的问题。相对于大规格的牡蛎个体,小规格贝类的滤食器官尚未发育完善,纤毛等器官较稀疏导致细胞体积较小的微藻难以被有效摄食,这与本实验中香港巨牡蛎的单位个体摄食率随着规格增大而增大的结论一致。大规格香港巨牡蛎的滤食器官的发育较完善,可以有效的摄食球等鞭金藻等细胞体积较小的微藻,表明香港巨牡蛎对牟氏角毛藻和球等鞭金藻的摄食可能是依靠腮丝和纤毛的摆动被动、机械性摄食,这与范德朋等^[16]对缢蛏的选择性摄食选择性研究发现相似。

本研究的实验结果也显示香港巨牡蛎对不同微藻的摄食选择性强度随着个体增大而变弱,个体越小选择性强度越强(图 5 和图 6)。香港巨牡蛎表现出的这种选择性可能与贝类本身的生物活性及状态有关,在生活史中的稚贝阶段,香港巨牡蛎用来直接维持生命特征的肝脏、肾脏等组织的比例较大,为了维持新陈代谢需要摄食更多的能源物质,相比大规格小规格贝类摄食竞争力较弱,在单位体积饵料生物量(有机碳)含量相同时,其对食物的营养价值必然会大于对食物量的追求,而牡蛎在发育、成熟的过程中会逐渐转变摄食策略,为了保证摄食量而对饵料质量的选择强度降低,因此香港巨牡蛎的规格越大其选择性强度越不明显。这与魏永杰^[28]报道的方斑东风螺幼体优先摄食混合藻体积比占绝对优势的青岛大扁藻、湛江叉边金藻研究结果相类似。

4.3 香港巨牡蛎摄食选择的被动性与主动性

双壳贝类多以微藻为食,贝类对食物颗粒是否具有选择性具有较大争议^[1-6]。本实验结果中香港巨牡蛎对微藻的摄食显示微藻的粒径越大选择性越强,大个体牡蛎小粒径微藻清滤率更高,从一定程度表明了香港巨牡蛎是通过黏液纤毛作用和水动力作用^[18]依靠腮丝、纤毛的摆动被动进行机械性摄食,属被动性的选择摄食。但对于含有较长角毛的牟氏角毛藻,因其角毛刺激及硅质细胞壁营养较低等原因,香港巨牡蛎对其表现较明显的避食性,这又从一定程度上表明香港巨牡蛎也同时具有对食物的主动选择能力,对

参考文献:

- [1] Riisgard H U. Filtration rate and growth in the blue mussel, *Mytilus edulis*, Linnaeus 1758: dependence on algal concentration[J]. Journal of Shellfish Research, 1991, 10(1): 29-35.
- [2] 邓正华, 姜松, 张博, 等. 合浦珠母贝对不同种类及浓度的单胞藻摄食与消化效果研究[J]. 南方水产科学, 2016, 12(3): 112-118. Deng Zhenghua, Jiang Song, Zhang Bo, et al. Ingestion and digestion of pearl oyster (*Pinctada fucata*) on microalgae of different types and concentrations[J]. South China Fisheries Science, 2016, 12(3): 112-118.

混合微藻的选择性摄食结果正是香港巨牡对食物的选择同时具有被动性和主动性的综合体现。

本研究中香港巨牡蛎摄食所用的 3 种藻分别代表了硅藻、绿藻和金藻,在北部湾海域具有一定的代表性;结果表明香港巨牡蛎对绿藻有较强正选择性而对硅藻有较强的负选择性。但在香港巨牡蛎的高密度养殖区——钦州湾,现场调查的浮游植物群落结构的却显示龙门海域牡蛎养殖区的附近海区硅藻比例明显低于其他海区,绿藻和蓝藻比例显著高于其他海区^[29-31],表明在一定程度上养殖区牡蛎较喜欢摄食硅藻,对绿藻和蓝藻则反之,与本实验结果不符。经过现场调查我们发现钦州湾龙门附近的牡蛎养殖区的养殖对象以成体香港巨牡蛎为主,属于本研究中的中、大规格个体,且养殖密度高。在本实验研究结果中,大、中规格牡蛎对微藻的摄食选择性强度较低,较于小规格牡蛎个体,其生长策略已从对食物质量的选择转变为对食物数量的选择,个体越大摄食率越大;另外海区中粒径较大的绿藻等非硅藻类数量很小,在无法摄食诸如本实验中大粒径且高营养的绿藻等食物时,牡蛎进而可能会转变其摄食策略被动的摄食硅藻以确保其快速生长。同时我们的研究结果也表明香港巨牡蛎更倾向摄食较大颗粒的微藻,贝类对 5~11 μm 的微藻具有较高的选择性^[21]导致了钦州湾牡蛎养殖区牡蛎快速生长繁殖期的浮游植物群落结构从 Nano 优势转变为 Pico 优势(65.0%±11.5%)^[32],个体较大的硅藻首当其冲,被牡蛎被动性摄食。高密度牡蛎养殖区的浮游植物被养殖生物高强度摄食后演变成以超微型的青绿藻和聚球藻优势为主^[29-31]的群落结构,这些藻类细胞粒径多小于 3 μm 因而不能或很难被香港巨牡蛎滤食,就导致了本实验中香港巨牡蛎对 3 种微藻的选择性摄食结果与养殖区浮游植物群落结构的现场调查结果不符,此结果也表明了牡蛎养殖区受生境及食物条件的影响,香港巨牡蛎以被动性摄食为主,主动性的选择性摄食受限;因此在牡蛎养殖区应积极采取相关措施防范高强度养殖活动对浮游植物群落结构造成重大改变进而对近岸海域生态系统造成不良影响。

- [3] Shumway S E, Cucci T L. The effects of the toxic dinoflagellate *Protogonyaulax tamarensis* on the feeding and behaviour of bivalve molluscs[J]. *Aquatic Toxicology*, 1987, 10(1): 9–27.
- [4] 傅萌, 彦天, 周名江. 麻痹性贝毒对海洋贝类的影响及加速贝毒净化的研究进展[J]. *水产学报*, 2000, 24(4): 382–387.
Fu Meng, Yan Tian, Zhou Mingjiang. Advances in the study of the effect of PSP on marine shellfish and its accelerating detoxification[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2000, 24(4): 382–387.
- [5] 吴庆龙, 陈宇炜, 刘正文. 背角无齿蚌对浮游藻类的滤食选择性与滤水率研究[J]. *应用生态学报*, 2005, 16(12): 2423–2427.
Wu Qinglong, Chen Yuwei, Liu Zhengwen. Filtering capacity of *Anodonta woodiana* and its feeding selectivity on phytoplankton[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(12): 2423–2427.
- [6] 张莉红. 扇贝养殖对浮游植物群落影响的初步研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2005.
Zhang Lihong. A preliminary study of the impacts of scallop culture on phytoplankton community[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2005.
- [7] 潘英, 夏朝林, 谢卫著. 人工诱导香港巨牡蛎雌核发育单倍体的研究[J]. *热带海洋学报*, 2008, 27(3): 55–60.
Pan Ying, Xia Chaolin, Xie Weizhu. Studies on artificial induction of haploid gynogenesis in oyster *Crassostrea hongkongensis*[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2008, 27(3): 55–60.
- [8] 李咏梅, 陈秀荔, 彭敏, 等. 基于线粒体 COI 基因序列探讨广西钦州湾牡蛎的遗传分化[J]. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2009, 37(3): 60–65.
Li Yongmei, Chen Xiuli, Peng Min, et al. Genetic differentiation of oyster from Qinzhou Bay based on mitochondrial cytochrome oxidase subunit I gene[J]. *Journal of Northwest A & F University: Natural Science Edition*, 2009, 37(3): 60–65.
- [9] 孙泽伟, 郝怀平, 杨彦鸿, 等. 近江牡蛎养殖群体数量性状间的相关及途径分析[J]. *中国农学通报*, 2010, 26(6): 332–336.
Sun Zewei, Zheng Huaiping, Yang Yanhong, et al. Correlation and path analysis to quantitative traits for a cultured population of Jinjiang Oyster *Crassostrea hongkongensis*[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(6): 332–336.
- [10] 霍志明, 王昭洋, 梁健, 等. 香港巨牡蛎与近江牡蛎杂交及回交子代早期生长发育比较[J]. *水产学报*, 2013, 37(8): 1155–1161.
Huo Zhongming, Wang Zhaoping, Liang Jian, et al. Comparisons of growth and development of hybrid and backcrossing progenies between *Crassostrea hongkongensis* and *Crassostrea ariakensis*[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2013, 37(8): 1155–1161.
- [11] 林丽华, 廖文崇, 谢健文, 等. 盐度对香港巨牡蛎摄食和代谢的影响[J]. *广东农业科学*, 2012, 39(11): 10–14.
Lin Lihua, Liao Wenchong, Xie Jianwen, et al. Effect of salinity on the feeding and metabolic physiology of *Crassostrea hongkongensis*[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2012, 39(11): 10–14.
- [12] 廖文崇, 朱长波, 张汉华. 体规格对香港巨牡蛎摄食和代谢的影响[J]. *中国渔业质量和标准*, 2011, 1(3): 41–46.
Liao Wenchong, Zhu Changbo, Zhang Hanhua. Effect of sizes on the feeding and metabolic physiology of *Crassostrea hongkongensis*[J]. *Chinese Fishery Quality and Standards*, 2011, 1(3): 41–46.
- [13] Lam K, Morton B. Mitochondrial DNA and morphological identification of a new species of *Crassostrea* (Bivalvia; Ostreidae) cultured for centuries in the Pearl River Delta, Hong Kong, China[J]. *Aquaculture*, 2003, 228(1/4): 1–13.
- [14] 孙军. 海洋浮游植物细胞体积和表面积模型及其转换生物量[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2004.
Sun Jun. Geometric models for calculating cell biovolume and surface area for marine phytoplankton and its relative conversion biomass[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2004.
- [15] Zemlys P, Daunys D, Razinkovas A. Revision pre-ingestive selection efficiency definition for suspension feeding bivalves: facilitating the material fluxes modelling[J]. *Ecological Modelling*, 2003, 166(1/2): 67–74.
- [16] 范德朋, 潘鲁青, 马姓, 等. 缢蛭滤除率与颗粒选择性的实验研究[J]. *海洋科学*, 2002, 26(6): 1–4.
Fan Depeng, Pan Luqing, Ma Shen, et al. Experimental studies on selective feeding and the filtration rate of (*Sinonovacula constricta*) [J]. *Marine Sciences*, 2002, 26(6): 1–4.
- [17] 付家想, 蓝文陆, 李天深, 等. 香港巨牡蛎对 3 种浮游植物摄食率和滤清率的研究[J]. *海洋学报*, 2017, 39(8): 62–69.
Fu Jiexiang, Lan Wenlu, Li Tianshen, et al. Research of clearance rate and filtration Rate of *Crassostrea hongkongensis* feeding on three different phytoplankton[J]. *Haiyang Xuebao*, 2017, 39(8): 62–69.
- [18] Gosling E M. Bivalve Molluscs: Biology, Ecology and Culture[M]. Malden, Oxford: Fishing News Books, 2003.
- [19] Rosa M, Ward J, Shumway S, et al. Effects of particle surface properties on feeding selectivity in the Eastern oyster *Crassostrea virginica* and the blue mussel *Mytilus edulis*[J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2013, 446: 320–327.
- [20] Espinosa E P, Perrigault M, Ward J E, et al. Lectins associated with the feeding organs of the oyster *Crassostrea virginica* can mediate particle selection[J]. *The Biological Bulletin*, 2009, 217(2): 130–141.
- [21] 高如承, 庄慧如, 汪彦, 等. 西施舌稚贝对 3 种微藻选择性及摄食率研究[J]. *福建师范大学学报: 自然科学版*, 2007, 23(1): 70–73.
Gao Rucheng, Zhuang Huiru, Wang Yan, et al. Study on three species of microalgae selection and ingestion rate in juvenile of *Coelomacra antiquata*[J]. *Journal of Fujian Normal University: Natural Science Edition*, 2007, 23(1): 70–73.
- [22] Whyte J N C. Biochemical composition and energy content of six species of phytoplankton used in mariculture of bivalves[J]. *Aquaculture*, 1987, 60(3/4): 231–241.
- [23] Brown M R, Jeffrey S W, Volkman J K, et al. Nutritional properties of microalgae for mariculture [J]. *Aquaculture*, 1997, 151(1/4): 315–331.
- [24] Rown M R, Jeffrey S W, Garland C D. Nutritional aspects of microalgae used in mariculture; a literature review[J]. *CSIRO Mar Lab Rep*, 1989,

- 205: 1—43.
- [25] 孙成渤. 水生生物学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2007: 359—360.
Sun Chengbo. Hydrobiology[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2007: 359—360.
- [26] 王蒙, 李纯厚, 戴蒙, 等. C/N 对牟氏角毛藻生长速率和总脂含量的影响[J]. 水产学报, 2010, 34(10): 1518—1524.
Wang Meng, Li Chunhou, Dai Meng, et al. The effect of C/N on the growth and total lipid content of *Chaetoceros muelleri*[J]. Journal of Fisheries of China, 2010, 34(10): 1518—1524.
- [27] 张莉红, 张学雷, 朱明远. 栉孔扇贝对硅藻和甲藻细胞的选择性摄食初探[J]. 海洋科学进展, 2008, 26(3): 372—377.
Zhang Lihong, Zhang Xuelei, Zhu Mingyuan. Preliminary study on selective feeding of the scallop (*Chlamys farreri*) on diatom and dinoflagellate cells[J]. Advances in Marine Science, 2008, 26(3): 372—377.
- [28] 魏永杰. 方斑东风螺幼体摄食的生理生态研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2007.
Wei Yongjie. Studies on Larval Feeding ecophysiology of Ivory Shell, *Babylonia Areolata Link*[D]. Xiamen: Xiamen University, 2007.
- [29] 蓝文陆, 王晓辉, 黎明民. 应用光合色素研究广西钦州湾丰水期浮游植物群落结构[J]. 生态学报, 2011, 31(13): 3601—3608.
Lan Wenlu, Wang Xiaohui, Li Mingmin. Phytoplankton community structure in Qinzhou Bay during flood season by analysis of HPLC photosynthetic pigment signatures[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(13): 3601—3608.
- [30] 蓝文陆, 黎明民, 李天深. 基于光合色素的钦州湾平水期浮游植物群落结构研究[J]. 生态学报, 2013, 33(20): 6595—6603.
Lan Wenlu, Li Mingmin, Li Tianshen. Phytoplankton community structure based on pigment composition in Qinzhou bay during average water period[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(20): 6595—6603.
- [31] 蓝文陆, 李天深, 郑新庆, 等. 枯水期钦州湾浮游植物群落结构组成与分布特征[J]. 海洋学报, 2014, 36(8): 122—129.
Lan Wenlu, Li Tianshen, Zheng Xinqing, et al. The structure and distribution of phytoplankton community in the Qinzhou Bay during dry season [J]. Haiyang Xuebao, 2014, 36(8): 122—129.
- [32] 莫钰, 龙寒, 蓝文陆, 等. 钦州湾枯水期和丰水期分粒级 Chl *a* 的分布及影响因素[J]. 海洋环境科学, 2017, 36(3): 434—440.
Mo Yu, Long Han, Lan Wenlu, et al. Distribution of size-fractional chlorophyll *a* and its controlling factors during dry and wet seasons in Qinzhou bay[J]. Marine Environmental Science, 2017, 36(3): 434—440.

Study on feeding selectivity of *Crassostrea hongkongensis* feeding on there different phytoplankton

Lan Wenlu^{1,2,3}, Fu Jiaxiang³, Yang Bin², Li Tianshen³, Fan Hangqing¹, Li Qiongzhen⁵, Huang Lingfeng⁴

(1. Guangxi Key Laboratory of Mangrove Protection, Guangxi Mangrove Research Center, Guangxi Academy of Sciences, Beihai 536007, China; 2. Guangxi Key Laboratory of Beibu Gulf Marine Disasters Research, Qinzhou University, Qinzhou 535099, China; 3. Marine Environmental Monitoring Center of Guangxi, Beihai 536000, China; 4. College of the Environment and Ecological Science, Xiamen University, Xiamen 361102, China; 5. Guangxi Academy of Fishery Science, Nanning 530004, China)

Abstract: *Chaetoceros muelleri*, *Platymonas subcordiformis* and *Isochrysis galbana* were chosen as a representative of diatom, chlorophyta and chrysophyta for the food of *Crassostrea hongkongensis*, and the clearance rate, filtration rate and selection efficiency of different size *Crassostrea hongkongensis* feeding on these three algae were examined on the same density and biomass, to study the feeding selectivity of *Crassostrea hongkongensis*. The results showed that there were significant differences among the feeding selection efficiency of *C. hongkongensis* on the three algae in the condition of same density as well as same biomass. Selection efficiency of large-size, medium-size and small-size of the *C. hongkongensis* on *Platymonas subcordiformis* were 0.32, 0.35, 0.48 under the circumstance of same density, respectively. *C. hongkongensis* had higher feeding selectivity on the large size algae than small size algae. *C. hongkongensis* showed feeding selectivity on *Isochrysis galbana* and *Platymonas subcordiformis* under the same biomass of algae. However, *C. hongkongensis* feeding on *Chaetoceros muelleri* showed negative selection efficiency both under the same density and biomass mixed conditions. The smaller size of the *C. hongkongensis* showed the higher feeding selectivity on the studied algae. And the size, shape and nutritive value of microalgae and the size of *C. hongkongensis* had obvious effects on the feeding selectivity of the *C. hongkongensis*.

Key words: *Crassostrea hongkongensis*; phytoplankton; feeding selectivity; selection efficiency