

营养强化时褶皱臂尾轮虫对饵料微藻的摄食*

李磊^{1,2} 朱小明^{3**} 吴洪喜^{1,2}

(¹浙江省海洋水产养殖研究所, 浙江温州 325005; ²浙江省近岸水域生物资源开发与保护重点实验室, 浙江温州 325005; ³厦门大学海洋与环境学院, 福建厦门 361005)

摘要 选取适宜浓度利用单种微藻和混合微藻对轮虫进行营养强化, 采用实验生态学方法研究了轮虫滤水率和摄食率的动态变化。结果表明: 微藻浓度、微藻种类和培养时间均对轮虫的滤水率和摄食率有显著影响; 轮虫对几种单种微藻的滤水率和摄食率均随培养时间的延长而下降, 在实验条件下 6 h 内轮虫对 3 种微藻的滤水率大小顺序为小球藻>球等鞭金藻>牟氏角毛藻, 12 h 内轮虫对 3 种微藻的滤水率大小顺序则为球等鞭金藻>小球藻>牟氏角毛藻; 轮虫在混合微藻中的选择顺序为球等鞭金藻>小球藻>牟氏角毛藻。

关键词 褶皱臂尾轮虫; 小球藻; 牟氏角毛藻; 球等鞭金藻; 滤水率; 摄食率

中图分类号 Q959.181 文献标识码 A 文章编号 1000-4890(2011)9-2019-07

Feeding of rotifer *Brachionus plicatilis* enriched with microalgae. LI Lei^{1,2}, ZHU Xiaoming^{3**}, WU Hong-xi^{1,2} (¹Zhejiang Mariculture Research Institute, Wenzhou 325005, Zhejiang, China; ²Zhejiang Key Laboratory of Exploitation and Preservation of Coastal Bio-resource, Wenzhou 325005, Zhejiang, China; ³College of Oceanography and Environmental Science, Xiamen University, Xiamen 361005, Fujian, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2011, **30**(9): 2019–2025.

Abstract: By the methods of experimental ecology, this paper studied the dynamic changes of the filtration and ingestion rates of *Brachionus plicatilis* enriched with single and mixed microalgal diets at optimum concentrations. The microalgal concentration, microalgal species, and culture duration all had significant effects on the filtration and ingestion rates of *B. plicatilis*. The filtration and ingestion rates of *B. plicatilis* to the diets decreased with increasing culture duration. Under the experimental conditions, the filtration rate of *B. plicatilis* to the microalgae within 6 hours was in the order of *Chlorella* sp. > *Isochrysis galbana* > *Chaetoceros muelleri*, while that within the whole experimental duration (12 hours) was *Isochrysis galbana* > *Chlorella* sp. > *Chaetoceros muelleri*. The predation of *B. plicatilis* fed by mixed microalgal diet was with a preferential order of *Isochrysis galbana* > *Chlorella* sp. > *Chaetoceros muelleri*.

Key words: *Brachionus plicatilis*; *Chlorella* sp.; *Chaetoceros muelleri*; *Isochrysis galbana*; filtration rate; ingestion rate.

褶皱臂尾轮虫 (*Brachionus plicatilis* O. F. Müller) 是一种微型浮游动物, 隶属轮虫动物门 (Rotifera)、单巢纲 (Monogononta)、游泳目 (Ploima)、臂尾轮虫科 (Brachionidae)、臂尾轮虫属 (*Brachionus*) (郑重等, 1984)。褶皱臂尾轮虫是一种重要的饵料生物, 因其大小适中, 运动缓慢, 繁殖迅速, 易于培养, 成为海水仔鱼和蟹类幼体的开口饵料, 在水产育苗中具有重要地位。但大规模培育得到的轮虫营养

价值一般较低, 经常不能满足鱼类和虾蟹幼体正常生长发育对 EPA、DHA 和 ARA 等高不饱和脂肪酸 (HUFAs) 的需要, 因此在将轮虫投喂给幼体前对其进行营养强化也就成为了一种常规做法 (Lubzens *et al.* 2001)。

现在一般在轮虫投喂给幼体前利用富含 HUFAs 的海洋微藻或利用鱼油等制成的专用强化剂对其进行强化 (周光正, 1996)。海洋微藻作为强化饵料具有对水质无污染、适口性好、强化后的轮虫活力较高、营养全面 (除脂肪酸外, 还含有大量幼体正常发

* 国家“863 计划”项目 (2007AA09Z419) 资助。

** 通讯作者 E-mail: zxm@xmu.edu.cn

收稿日期: 2011-02-25 接受日期: 2011-06-15

育所需的氨基酸、维生素等)等优点(谭树华和周杰良 2002),但其 HUFAs 含量一般差别很大,而且很不均衡,往往不能同时含有较多的 ARA、EPA 和 DHA,因此研究挑选 HUFAs 含量较高的海洋微藻,并将不同的海洋微藻合理搭配用于强化轮虫具有很大的现实意义。轮虫摄食方面的研究已有报道,例如,葛雅丽等(2005)对 2 品系萼花臂尾轮虫摄食强度的进行了比较研究,冯蕾(2010)对褶皱臂尾轮虫在不同温度、盐度、饵料种类、pH 值和光照条件下的滤水率和摄食率的变化情况进行了研究报道。本文选用易于大量培养的 3 种优质藻种,小球藻(*Chlorella* sp.)、牟氏角毛藻(*Chaetoceros muelleri*)和球等鞭金藻(*Isochrysis galbana*),研究在利用单种微藻和混合微藻对轮虫进行营养强化时轮虫的摄食情况及其动态变化,以期利用海洋微藻对轮虫进行营养强化时选择合适的微藻种类和微藻密度提供参考。

1 材料与方法

1.1 实验材料

1.1.1 轮虫 褶皱臂尾轮虫种采集自福建诏安东瀚实业有限公司,在小型水泥池中培养。轮虫饵料为广东梅山-马力酵母有限公司生产的“梅山牌”干酵母。培养过程中维持轮虫密度为 100 ~ 200 ind · ml⁻¹,每百万轮虫每天投喂面包酵母 0.6 ~ 1.2 g,分 3 ~ 4 次投喂(张雅芝等 2005)。

1.1.2 微藻 小球藻、牟氏角毛藻和球等鞭金藻均在光照培养箱中用 5000 ml 的三角烧瓶培养。培养液根据 f/2 配方配制(陆忠康 2001),培养条件为温度 24 °C ~ 26 °C、盐度 29 ~ 31。均采用处于指数生长期的藻类进行正式实验。

1.2 研究方法

1.2.1 轮虫对不同密度梯度小球藻的摄食实验 在预实验基础上,设置小球藻密度分别为 6 × 10⁶、8 × 10⁶、10 × 10⁶、12 × 10⁶ 和 14 × 10⁶ cells · ml⁻¹。每个密度梯度设 3 个平行样和 1 个不加轮虫的对照样,采用指数生长期的的小球藻进行实验,实验前将轮虫置于过滤海水中饥饿 12 h。实验均在 100 ml 烧杯中进行,实验水体 80 ml(轮虫液+微藻液+过滤海水),实验初始轮虫密度为 100 ind · ml⁻¹。实验在光照培养箱中连续进行 12 h,维持温度 24 °C ~ 26 °C,盐度 29 ~ 31。12 h 实验结束时取样固定后用血球计数板计数并计算各组小球藻的密度。

1.2.2 几种藻类细胞的生物量的测定 实验中选

用的几种藻类细胞的生物量以收集指数生长期的藻体细胞干重计算。吸取适量藻液固定后用血球计数板计数并计算密度,然后利用灭菌海水将其浓度稀释至 1 × 10⁶ cells · ml⁻¹,取 100 ml 稀释后的藻液,利用 0.45 μm 微孔滤膜抽滤,浓缩后的藻类细胞用蒸馏水冲洗 3 次,之后将带有藻类细胞的微孔滤膜 60 °C 烘干称重,除去微孔滤膜的重量得到 100 ml 藻液中的藻类细胞总生物量,然后根据藻类细胞密度求得单个细胞的生物量。每种藻类重复 3 次取平均值。

1.2.3 营养强化时轮虫对几种藻类的摄食实验

设置 3 个单种微藻组和 3 个混合微藻组中的藻类密度分别为小球藻(8 × 10⁶ cells · ml⁻¹)、牟氏角毛藻(2 × 10⁶ cells · ml⁻¹)、球等鞭金藻(2 × 10⁶ cells · ml⁻¹)、小球藻(4 × 10⁶ cells · ml⁻¹) + 牟氏角毛藻(1 × 10⁶ cells · ml⁻¹)、小球藻(4 × 10⁶ cells · ml⁻¹) + 球等鞭金藻(1 × 10⁶ cells · ml⁻¹)、牟氏角毛藻(1 × 10⁶ cells · ml⁻¹) + 球等鞭金藻(1 × 10⁶ cells · ml⁻¹)。实验开始时轮虫密度 100 ind · ml⁻¹,每组设 3 个平行样和 1 个不加轮虫的对照样。按照 1.2.1 中的方法配置实验液。实验在光照培养箱中连续进行 12 h,维持温度 24 °C ~ 26 °C,盐度 29 ~ 31。分别在 2、4、6、8、10 和 12 h 时用 1.2.1 的方法计数并计算相应藻类的密度。

1.2.4 摄食率和滤水率的计算 轮虫对于藻类的滤水率(ml · ind⁻¹ · h⁻¹)和摄食率(cells · ind⁻¹ · h⁻¹)按照以下公式计算(Schlosser & Anger 1982):

$$F = \frac{v}{n} \left(\frac{\ln C'_t - \ln C_t}{t} \right)$$

$$I = F \cdot \sqrt{C_o \cdot C_t}$$

式中: F 为滤水率(ml · ind⁻¹ · h⁻¹)指每个浮游动物在单位时间内滤过的含有一定数量浮游植物的水样量; I 为摄食率(cells · ind⁻¹ · h⁻¹),为每只浮游动物单位时间内过滤摄取的饵料细胞数; v 为实验水样体积(ml) n 为每个实验瓶中的浮游动物个体数(ind), t 为实验时间(h), C_o 为起始饵料密度(cells · ml⁻¹), C_t 为实验瓶中最终饵料密度(cells · ml⁻¹), C'_t 为对照瓶中的最终饵料密度(cells · ml⁻¹)。

1.2.5 轮虫对混合藻液中饵料的选食率和选择性指数的计算 轮虫对混合藻液中某种微藻的选食率按照如下公式计算(Frost 1972):

$$S_r = \frac{C'_t - C_t}{C'_t} \times 100\%$$

式中: S_i 为选食率; C_i 为在进行轮虫对混合微藻的摄食实验时, 实验瓶中某种微藻的最终饵料密度 (cells · ml⁻¹); C_i' 为对照瓶中该种微藻的最终饵料密度 (cells · ml⁻¹)。

轮虫对混合藻液中某种微藻摄食的选择性指数按照以下公式计算 (Ivlev, 1961):

$$S_i = \frac{r_i - p_i}{r_i + p_i}$$

式中: S_i 选择性指数; r_i 为某种微藻在被轮虫所摄食的全部微藻中所占的比例 (W% 按照生物量计算), 本实验结束时实验瓶中微藻的减少量即为轮虫的摄食量; p_i 为实验开始时实验瓶中某种微藻与全部微藻的比例 (W% 按照生物量计算)。

1.2.6 数据分析 所有数据以 3 个重复组数据的平均值 ± 标准差 (mean ± SD) 表示, 采用 SPSS 软件对数据作单因素方差分析 (ANOVA), 并利用 SNK (Student-Newman-Keuls) 检验法分析平均数的差异显著性 ($\alpha=0.05$)。

2 结果与分析

2.1 轮虫对不同密度梯度小球藻的摄食

从图 1 可知, 藻细胞密度为 $6 \times 10^6 \sim 14 \times 10^6$ cells · ml⁻¹ 时, 轮虫对小球藻的摄食率随着藻细胞密度的增加而升高, 滤水率随着藻细胞密度的增加而降低。小球藻细胞初始密度分别为 6×10^6 、 8×10^6 、 10×10^6 、 12×10^6 和 14×10^6 cells · ml⁻¹ 时, 100 ind · ml⁻¹ 轮虫摄食 12 h 后各梯度组小球藻最终密度分别为 0.93×10^6 、 1.95×10^6 、 3.67×10^6 、 5.73×10^6 和 7.52×10^6 cells · ml⁻¹。

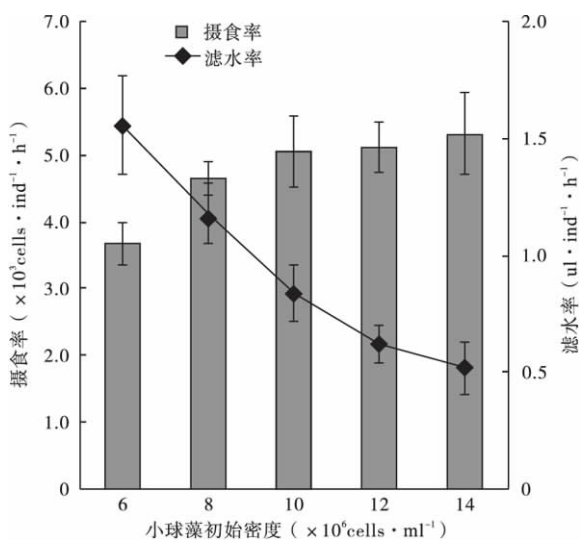


图 1 不同细胞密度下褶皱臂尾轮虫对小球藻的摄食率和滤水率

Fig. 1 Filtration and ingestion rates of *Brachionus plicatilis* fed on *Chlorella* sp. at various cell densities

2.2 几种藻类细胞的生物量

后续实验设置小球藻、牟氏角毛藻和球等鞭金藻 3 个单种微藻组和 3 个两两混合微藻组, 按照每组微藻 (包括单种微藻和混合微藻) 的藻类细胞生物量密度接近设置各组的藻类细胞比例, 混合微藻组中的所含有的 2 种微藻的生物量密度也基本相等。从表 1 可以求得单个藻类细胞的生物量之比为 M (小球藻) : M (牟氏角毛藻) : M (球等鞭金藻) = 1 : 3.8 : 4.6, 为了简化实验, 按照生物量之比 1 : 4 : 4 设定藻类细胞密度比例。设定小球藻组、牟氏角毛藻组和球等鞭金藻组 3 个单种微藻组间的藻类细胞密度之比为 N (小球藻) : N (牟氏角毛藻) : N (球等鞭金藻) = 4 : 1 : 1。3 个两两混合微藻组中, 每组合有的两种微藻的细胞密度分别为单种微藻组中同种微藻细胞密度的一半。

在进行轮虫的营养强化时, 为了保证较好的强化效果, 应该维持较高的藻类细胞密度, 但并不是越高越好, 过高的藻类密度甚至可能影响轮虫的正常摄食进而降低强化效果。同时藻类培养需要投入较大的人力物力, 所以强化时应该选取适当的藻类密度, 尽量减少不必要的浪费 (张雅芝等, 2005)。在设置的一系列小球藻密度梯度中, 小球藻的初始密度 8×10^6 cells · ml⁻¹ 时, 经过轮虫 12 h 的摄食实验, 小球藻最终密度为 1.95×10^6 cells · ml⁻¹, 该初始密度基本能够满足实验条件下轮虫 12 h 营养强化需要, 选取该初始密度作为后续实验时小球藻组的密度。然后按照前面确定的藻类分组时的细胞密度比例确定后续实验时 3 个单种微藻组的细胞密度分别为小球藻组 8×10^6 cells · ml⁻¹, 牟氏角毛藻组 2×10^6 cells · ml⁻¹ 和球等鞭金藻组 2×10^6 cells · ml⁻¹; 3 个混合微藻组的细胞密度分别为: 小球藻 4×10^6

表 1 实验选用的几种藻类细胞的生物量

Table 1 Biomass of the experimental microalgal cell

种类	100 ml 中的藻类 细胞总重 (mg)	单个细胞重量 (pg)
小球藻	0.44 ± 0.03	4.4 ± 0.3
牟氏角毛藻	1.68 ± 0.18	16.8 ± 1.8
球等鞭金藻	2.04 ± 0.15	20.4 ± 1.5

cells · ml⁻¹和牟氏角毛藻 1×10⁶ cells · ml⁻¹混合; 小球藻 4×10⁶ cells · ml⁻¹和球等鞭金藻 1×10⁶ cells · ml⁻¹混合; 牟氏角毛藻 1×10⁶ cells · ml⁻¹和球等鞭金藻 1×10⁶ cells · ml⁻¹混合。

2.3 轮虫对单种微藻的摄食

轮虫在 12 h 内对小球藻、牟氏角毛藻和球等鞭金藻的单种藻液的滤水率和摄食率动态变化见图 2 随时间均呈下降的趋势。褶皱臂尾轮虫对小球藻的滤水率和摄食率在实验开始 8 h 内随着实验进行显著下降 ($P < 0.05$), 而在 8 h 后变化不大 ($P > 0.05$); 而对牟氏角毛藻和球等鞭金藻的滤水率和摄食率在 6 h 内显著下降 ($P < 0.05$), 而在 6 h 后基本不变 ($P > 0.05$)。轮虫对小球藻、牟氏角毛藻和球等鞭金藻在 2 h 内的滤水率均达到最大值。褶皱臂尾轮虫在 6 h 内对 3 种微藻的滤水率的大小依次为小球藻 > 球等鞭金藻 > 牟氏角毛藻, 在 2 h 内, 轮虫对 3 种微藻滤水率差异均极显著 ($P < 0.01$); 而在 8 h 后对 3 种微藻的滤水率依次为球等鞭金藻 > 小球藻 > 牟氏角毛藻, 在 12 h 内, 轮虫对小球藻和球等鞭金藻滤水率差异显著 ($P < 0.05$), 对牟氏角毛藻滤水率与另外两种相比差异极显著 ($P < 0.01$)。

在 12 h 的实验过程中, 轮虫对 3 种微藻的摄食率的大小依次为小球藻 > 球等鞭金藻 > 牟氏角毛藻, 轮虫对牟氏角毛藻与球等鞭金藻的摄食率差异显著 ($P < 0.05$), 对小球藻的摄食率与另外两种相比差异

极显著 ($P < 0.01$)。

2.4 轮虫对混合微藻的摄食

在 3 个两两混合微藻组中, 轮虫 12 h 内对不同微藻滤过率和摄食率的动态变化情况见图 3。在小球藻+牟氏角毛藻组中, 轮虫对牟氏角毛藻的滤水率在 4 h 内保持在较高水平, 变化不大 ($P > 0.05$) 4 h 后显著下降 ($P < 0.05$); 对小球藻的滤水率在 10 h 内逐渐显著上升 ($P < 0.05$), 而在 10 h 后达到较高水平, 变化不大 ($P > 0.05$); 对两种微藻总的滤水率 8 h 内逐渐显著下降 ($P < 0.05$) 8 h 后变化不大 ($P > 0.05$)。而轮虫在 12 h 内对 2 种微藻摄食率均呈逐渐显著下降的趋势 ($P < 0.05$), 对 2 种微藻总的摄食率也呈现同样的变化规律 ($P < 0.05$)。

在小球藻+球等鞭金藻组中, 轮虫在 4 h 内对球等鞭金藻的滤水率呈显著下降趋势 ($P < 0.05$) 4 h 后下降趋势减缓 ($P > 0.05$); 在 4 h 内, 轮虫对小球藻的滤水率呈显著上升趋势 ($P < 0.05$) 4 h 后变化不大 ($P > 0.05$); 轮虫对 2 种微藻总的滤水率在 12 h 内呈下降趋势 ($P < 0.05$)。轮虫对 2 种微藻的摄食率也呈现出与滤水率类似的变化趋势, 对球等鞭金藻的摄食率呈下降趋势 4 h 内下降幅度较大 ($P < 0.05$) 4 h 后下降幅度减缓 ($P > 0.05$); 对小球藻的摄食率 4 h 内呈上升趋势 ($P < 0.05$) 4 h 后呈下降趋势 ($P < 0.05$); 轮虫对 2 种微藻总的摄食率 2 h 内到 4 h 内稍有上升 ($P > 0.05$) 4 h 后显著下降 ($P < 0.05$)。

在牟氏角毛藻+球等鞭金藻组中, 轮虫对球等鞭金藻在 12 h 内滤水率和摄食率均呈显著下降趋势 ($P < 0.05$), 而轮虫对牟氏角毛藻在 4 h 内滤水率和摄食率均下降趋势较为明显 ($P < 0.05$), 但 4 h 后滤水率和摄食率变化不大 ($P > 0.05$)。轮虫对 2 种微藻的总的滤水率和摄食率的变化趋势与对球等鞭金藻的变化趋势类似, 呈显著下降的趋势 ($P < 0.05$)。

12 h 内褶皱臂尾轮虫对混合藻液的选择性差异见表 2。在几个两两混合的微藻组中, 轮虫对混合的两种微藻的滤水率、摄食率、选食率和选择性指数均差异极显著 ($P < 0.01$)。通过比较轮虫对 3 组混合藻液中不同微藻的选择性指数, 可以得出轮虫的摄食偏好顺序为小球藻 > 牟氏角毛藻; 小球藻 < 球等鞭金藻; 牟氏角毛藻 < 球等鞭金藻。综上, 轮虫对实验选用的 3 种微藻的摄食偏好顺序为球等鞭金藻 > 小球藻 > 牟氏角毛藻。

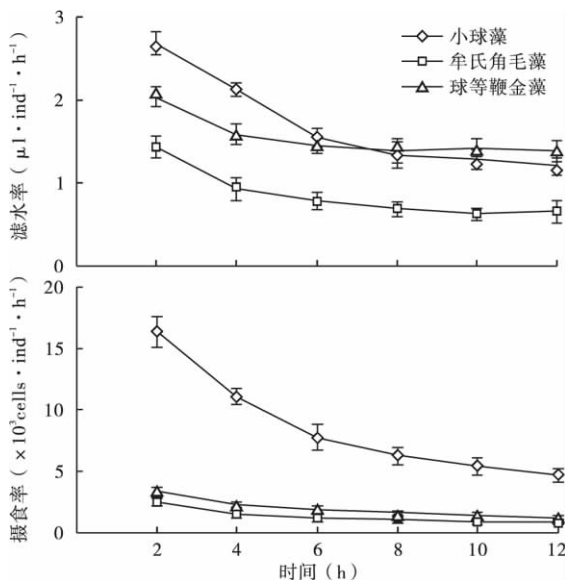


图 2 轮虫在小球藻、牟氏角毛藻和球等鞭金藻的单种藻液中摄食 12 h 滤水率和摄食率的动态变化

Fig. 2 Dynamic change of filtration and ingestion rates of *Brachionus plicatilis* fed on single microalgal species

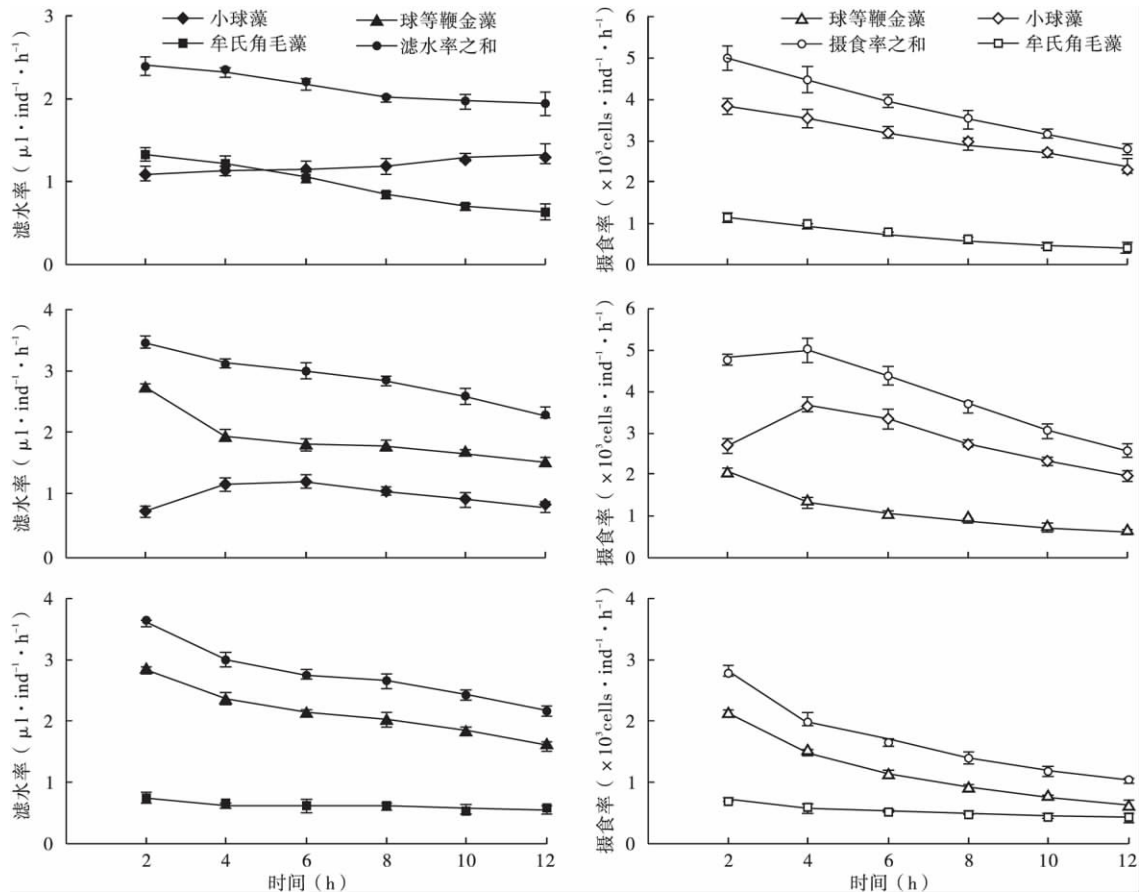


图3 轮虫在混合藻液中摄食 12 h 对不同微藻滤水率和摄食率的动态变化

Fig.3 Dynamic change of filtration and ingestion rates of *Brachionus plicatilis* fed on mixed microalgal species

表2 在 12 h 内褶皱臂尾轮虫对混合饵料的选择性差异

Table 2 Selectivity of *Brachionus plicatilis* fed on mixed microalgal diets

组别	微藻种类	滤水率 ($\mu\text{l} \cdot \text{ind}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)	摄食率 ($\times 10^3 \text{ cells} \cdot \text{ind}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)	选食率 (%)	选择性指数
小球藻+牟氏角毛藻组	小球藻	1.311±0.117 a	2.388±0.163 a	81.1±8.62 a	0.092±0.014 a
	牟氏角毛藻	0.612±0.094 b	0.424±0.128 b	56.0±2.56 b	-(0.118±0.009) b
小球藻+球等鞭金藻组	小球藻	0.790±0.083 a	1.967±0.125 a	64.4±4.23 a	-(0.091±0.008) a
	球等鞭金藻	1.527±0.066 b	0.611±0.065 b	85.8±4.37 b	0.067±0.009 b
牟氏角毛藻+	牟氏角毛藻	0.562±0.063 a	0.426±0.082 a	64.1±3.20 a	-(0.119±0.018) a
球等鞭金藻组	球等鞭金藻	1.581±0.074 b	0.635±0.034 b	89.6±4.88 b	0.080±0.007 b

3 讨论

3.1 轮虫对不同密度梯度小球藻的摄食

Navarro(1999) 将轮虫的摄食和饵料密度之间的关系总结为 3 种模式,都是在较低的饵料密度范围内,摄食率随着饵料密度的提高而增加,当饵料密度增加到一定程度(饱和密度)后,轮虫已经达到了最大摄食潜能,这时饵料密度再增加,摄食率则保持在一定的水平不再升高。葛雅丽等(2005)研究发

现在培养的 20 h 时间内,萼花臂尾轮虫广州品系的滤水率随饵料密度的增大逐渐减小,芜湖品系则随饵料密度的增大逐渐增大;2 个品系的摄食率均随饵料密度的升高逐渐增大,并符合直线模型。Awais 等(1992)研究表明,在实验周期中,萼花臂尾轮虫对微藻(*Dictyosphaerium chlorelloides*)的滤水率明显受到细胞密度的影响,随细胞密度的增大呈逐渐减小的趋势。Starkweather(1980)研究发现,轮虫的滤水率随着饵料密度的上升而下降,而摄食率

在密度较低时随饵料密度的上升而上升,在密度较高时维持在一个恒定水平。由此可以看出,饵料浓度对轮虫滤水率和摄食率的影响与轮虫类型、饵料类型和所设置的饵料浓度范围等因素有关。在本实验设置的适宜营养强化实际需要的较窄浓度范围内,轮虫对小球藻的摄食率随密度的增加逐渐升高,滤水率则随密度的增加逐渐降低,这与 Starkweather (1980) 饵料密度较低时的情况类似。

3.2 轮虫对单种微藻的摄食

研究轮虫摄食的动态变化对研究利用单种微藻和混合微藻对轮虫进行营养强化具有重要意义。有关轮虫摄食强度与培养时间之间的关系研究相对较少,研究结果大都表明轮虫的滤水率和摄食率均随培养时间的延长而降低。Awaïss 等(1992)和 Schlüter 等(1987)研究表明,萼花臂尾轮虫和红臂尾轮虫的滤水率均随培养时间的延长而降低;Schlosser 等(1982)研究发现,在第240分钟时褶皱臂尾轮虫的摄食强度低于第15分钟时的90%;葛雅丽等(2005)在对2品系萼花臂尾轮虫摄食强度进行比较研究时发现,萼花臂尾轮虫的滤水率和摄食率均随培养时间的延长而降低。本研究显示,在3个单种微藻组中,开始轮虫的滤水率和摄食率均较高,随着时间进行均呈显著下降趋势,下降到一定水平后变得趋于稳定,这与上述结果类似。

冯蕾(2010)选用褶皱臂尾轮虫最适种群生长的饵料密度作为初始密度,分别测得了24 h内轮虫对几种微藻饵料的摄食率和滤水率,结果显示褶皱臂尾轮虫对5种不同微藻饵料滤水率的顺序为牟氏角毛藻>小新月菱形藻>金藻8701>小球藻>扁藻;摄食率的顺序为小球藻>金藻8701>牟氏角毛藻>小新月菱形藻>扁藻。而本文测得的结果与之差别较大,究其原因,应该主要是由实验条件不同造成的,在营养强化的特定条件下,本文设定的轮虫和饵料微藻初始密度相对较高,实验时间较短,由此造成实验结果的差异。Pilarska(1977)研究发现,在25~27 min内,轮虫(*Brachionus rubens*)对粒径3~8 μm的饵料摄食强度(feeding intensity,用滤水率表示)最高,而对粒径20~30 μm的饵料的摄食强度则要降低一半。在本实验开始的2 h内,轮虫对小球藻的滤水率和摄食率均显著大于球等鞭金藻和牟氏角毛藻($P<0.05$),与上述结果类似。而轮虫对球等鞭金藻的滤水率和摄食率在实验开始2 h内也明显高于牟氏角毛藻($P<0.05$),这与前述结果不同,导致

这种情况的原因可能是在个体大小接近的情况下,球等鞭金藻具有鞭毛,能够运动,增加了与轮虫碰触的机率。

3.3 轮虫对混合微藻的摄食

许多研究发现,浮游动物对饵料微藻具有选择性,它们能够在混合饵料中主动选择个体较大、营养丰富、易于消化的种类,此类研究多集中于桡足类(高亚辉和李松,1988,1990;赵文等,2002;Feng et al.,2007)。Rothhaupt(1990)认为,轮虫依靠纤毛的摆动滤取食物,细胞大小和密度直接影响其滤食效率;Chotiyaputta 等(1978)在褶皱臂尾轮虫对 *Olithodiscus* sp. 和 *Chlamydomonas* sp. 的选择摄食实验中发现,轮虫偏好后者,并由此认为细胞大小对轮虫的摄食选择不如细胞种类重要;Hotos(2003)设置一系列的密度比例研究褶皱臂尾轮虫对 *Asteromonas gracilis* 和 *Chlorella* sp. 混合饵料的选择摄食,认为细胞大小和细胞种类都会影响褶皱臂尾轮虫对藻类的摄食选择。本文发现,在轮虫的摄食选择过程中,在小球藻+牟氏角毛藻组和小球藻+球等鞭金藻组,轮虫分别偏好摄食个体较大的牟氏角毛藻和球等鞭金藻,表明细胞大小会影响轮虫对不同饵料的选择。Hotos(2003)推测相比 *Chlorella* sp.,轮虫明显偏好 *Asteromonas* sp. 的可能原因是鞭毛摆动增加了褶皱臂尾轮虫摄食 *Asteromonas* sp. 的机率,最终增加了轮虫的摄食强度。轮虫对牟氏角毛藻+球等鞭金藻组的摄食实验中,轮虫对球等鞭金藻的滤水率、摄食率、选食率和选择性指数均明显大于牟氏角毛藻,表明轮虫明显偏好摄食球等鞭金藻,这可能是由球等鞭金藻具有的良好运动性造成的。

在轮虫对小球藻和牟氏角毛藻混合饵料的摄食实验中,实验开始2 h内轮虫对牟氏角毛藻的滤水率大于小球藻,表明在生物量基本相等的两种藻类混合对轮虫进行营养强化时,轮虫对个体较大的牟氏角毛藻摄食强度更大;但在12 h的实验时间内,轮虫对小球藻的滤水率、摄食率和选择性指数均大于牟氏角毛藻,这表明随着实验的进行,小球藻和牟氏角毛藻的比例(2 h内小球藻密度下降的幅度小于牟氏角毛藻)发生了变化,进而引起了轮虫对两种微藻滤水率等参数的变化,这也表明轮虫对混合微藻的选择性随着饵料密度变化存在差异,可以通过调节自己的摄食行为来适应不同的饵料环境(Gilbert & Bogdan,1981)。轮虫对小球藻和球等鞭金藻混合饵料的摄食实验在开始阶段也出现了类似

的情况,而且由于轮虫对球等鞭金藻的明显偏好,轮虫在开始4 h内主要摄食球等鞭金藻,致使球等鞭金藻密度大幅下降,此时小球藻依然保持着较高的密度,所以在4 h内轮虫对小球藻的滤水率和摄食率反而显著上升,摄食强度明显增强;4 h后随着轮虫摄食导致小球藻密度显著下降,对小球藻的摄食强度才明显减弱。

从表2可以看出,在不同的混合饵料组,滤水率、选食率和选择性指数具有的相同的相对大小关系,而摄食率的相对大小关系则与上述指标存在不一致的地方,例如在小球藻+球等鞭金藻组,滤水率、选食率和选择性指数均为小球藻<球等鞭金藻,而摄食率则为小球藻>球等鞭金藻。这与赵文等(2002)在研究2种桡足类对混合饵料的摄食生态时出现的情况类似,这是因为实验中计算选食率和选择性指数按照生物量的变化计算,而计算摄食率按照细胞密度的变化计算,而我们设置的不同实验组间初始的生物量接近相同,实验开始时不同微藻的细胞密度存在较大差异,导致出现摄食率与其它指标的相对大小关系不一致的情况。

为了使强化后的轮虫具有更加全面合理的营养成分,提高轮虫的利用价值,采用不同的饵料微藻对轮虫进行营养强化受到广泛重视。本实验研究了营养强化时轮虫对单种微藻和混合微藻摄食的动态变化,对选取利用合理的微藻种类和微藻密度对轮虫进行营养强化具有重要参考价值。

参考文献

- 冯 蕾. 2010. 褶皱臂尾轮虫摄食生态的实验研究. 海洋环境科学, **29**(1): 22-26.
- 高亚辉, 李 松. 1988. 几种因素对真刺唇角水蚤摄食率的影响. 厦门大学学报(自然科学版), **27**(6): 684-688.
- 高亚辉, 李 松. 1990. 瘦尾胸刺水蚤摄食率的观察实验. 热带海洋, **9**(3): 59-65.
- 葛雅丽, 席贻龙, 陈 芳. 2005. 两品系萼花臂尾轮虫摄食强度的比较研究. 应用生态学报, **16**(10): 1956-1961.
- 陆忠康. 2001. 简明中国水产养殖百科全书. 北京: 中国农业出版社.
- 谭树华, 周杰良. 2002. 轮虫强化培养的研究进展. 水产科技情报, **29**(5): 200-203.
- 张雅芝, 谢仰杰, 胡家财, 等. 2005. 不同饵料和接种密度对褶皱臂尾轮虫种群增长的影响. 集美大学学报(自然科学版), **10**(1): 1-7.
- 赵 文, 宋青青, 高 放. 2002. 大连近海两种桡足类摄食生态的初步研究. 大连水产学院学报, **17**(1): 8-14.
- 郑 重, 许振祖, 李少菁. 1984. 海洋浮游生物学. 北京: 海洋出版社.

- 周光正. 1996. 饵料对培养轮虫(*Brachionus plicatilis*)脂肪酸组成的影响. 海洋科学, (5): 27-28.
- Awaïss A, Kestemont P, Michal JC. 1992. An investigation into the mass production of the freshwater rotifer *Brachionus calyciflorus* Pallas. I. An ecophysiological approach to nutrition. *Aquaculture*, **105**: 325-336.
- Chotiyaputta C, Hirayama K. 1978. Food selectivity of the rotifer *Brachionus plicatilis* feeding on phytoplankton. *Marine Biology*, **45**: 105-111.
- Feng L, Li X, Wang J. 2007. Effect of UV-B radiation on the feeding behavior of the rotifer *Brachionus plicatilis*. *Acta Oceanologica Sinica*, **26**(4): 82-92.
- Frost BW. 1972. Effects of size and concentration of food particles on the feeding behavior of the marine planktonic copepod *Calanus pacificus*. *Limnology and Oceanography*, **17**: 805-815.
- Gilbert JJ, Bogdan KG. 1981. Selectivity of *Polyarthra* and *Keratella* for flagellate and aflagellated cells. *Verhandlungen der Internationalen Vereinigung Fur Limnologie*, **21**: 1515-1521.
- Hotos GN. 2002. Selectivity of the rotifer *Brachionus plicatilis* fed mixtures of algal species with various cell volumes and cell densities. *Aquaculture Research*, **33**: 949-957.
- Hotos GN. 2003. Growth, filtration and ingestion rate of the rotifer *Brachionus plicatilis* fed with large celled (*Asteromonas gracilis*) and small celled (*Chlorella* sp.) algal species. *Aquaculture Research*, **34**: 793-802.
- Ivlev VS. 1961. Experimental ecology of the feeding of fishes. New Haven: Yale University Press.
- Lubzens E, Zmora O, Barr Y. 2001. Biotechnology and aquaculture of rotifers. *Hydrobiologia*, **446/447**: 337-353.
- Navarro N. 1999. Feeding behaviour of the rotifers *Brachionus plicatilis* and *Brachionus rotundiformis* with two types of food: Live and freeze-dried microalgae. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, **237**: 75-87.
- Pilarska J. 1977. Eco-physiological studies on *Brachionus rubens* Ehrbg (Rotatoria). I. Food selectivity and feeding rate. *Polskie Archiwum Hydrobiologii*, **24**: 319-328.
- Rothhaupt KO. 1990. Differences in particle size-dependent feeding efficiencies of closely related rotifer species. *Limnology and Oceanography*, **35**: 16-23.
- Schlösser HJ, Anger K. 1982. The significance of some methodological effects on filtration and ingestion rates of the rotifer *Brachionus plicatilis*. *Helgolander Meeresunters*, **35**: 215-225.
- Schlüter M, Groeneweg J, Soeder CJ. 1987. Growth and Food Conversion of *Brachionus rubens* in Continuous Culture. Oxford: IRL Press Limited.
- Starkweather PL. 1980. Aspects of the feeding behavior and trophic ecology of suspension feeding rotifers. *Hydrobiologia*, **73**: 62-72.

作者简介 李 磊,男,1983年生,硕士,研究实习员。从事水产增养殖、海洋生物资源与环境方面的研究。E-mail: leil-izmri@163.com
责任编辑 李凤芹