

温度和微藻饵料对强额孔雀水蚤摄食的影响

程浩楠¹, 程方平^{2,3}, 王淑红¹

(1. 集美大学 水产学院 观赏水族福建省高校工程研究中心, 福建 厦门 361021; 2. 上海海洋大学 海洋生态与环境学院, 上海 201306; 3. 上海海洋大学 港航生态安全研究中心, 上海 201306)

摘要: 论文以强额孔雀水蚤(*Parvocalanus carssirostris*)为研究对象, 研究了不同培养温度(18℃、22℃、26℃、30℃)、不同种类微藻(球等鞭金藻(*Isochrysis galbana*)、牟氏角毛藻(*Chaetoceros muelleri*)、青岛大扁藻(*Platymonas helgolandica*))饵料以及不同饵料质量浓度(0.5、1.0、1.5、2.5、5 μgC/mL)对强额孔雀水蚤摄食的影响。结果表明: 强额孔雀水蚤的清滤率随温度上升而上升, 随饵料浓度上升而下降, 26℃~30℃以及饵料浓度为 0.5 μgC/mL 时清滤率较高; 滤食率和摄食率随温度上升而上升, 摄食球等鞭金藻和牟氏角毛藻时, 在 26℃时达到最高; 摄食青岛大扁藻时, 两者随温度升高持续上升。对 3 种藻的摄食率大小顺序为: 青岛大扁藻>球等鞭金藻>牟氏角毛藻; 强额孔雀水蚤摄食碳量占体碳比较高, 远高于中华哲水蚤(*Calanus sinicus*)、海洋伪镖水蚤(*Pseudodiaptomus annandalei*)等大中型桡足类; 强额孔雀水蚤的最适饵料等效球直径约为 11.5 μm, 青岛大扁藻为强额孔雀水蚤较适口的饵料。

关键词: 强额孔雀水蚤(*Parvocalanus carssirostris*); 清滤率; 滤食率; 摄食率; 饵料等效球直径
中图分类号: S917 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3096(2021)03-0024-09
DOI: 10.11759/hyxx20191015003

强额孔雀水蚤(*Parvocalanus crassirostris*)是一种营自由产卵、浮游生活的小型哲水蚤桡足类, 体长约 0.5 mm~0.6 mm, 是一种世界范围广泛分布的暖水近岸优势种^[1]。与传统生物活饵料轮虫和丰年虾(*Artemia* sp.)相比, 桡足类富含高不饱和脂肪酸, 可以满足海水鱼幼体的营养需求。此外, 荆眼刺尻鱼(*Centropyg acanthops*)等海水神仙鱼仔鱼口裂很小, 只能摄食 50 μm 左右的生物活饵料作为开口饵料。强额孔雀水蚤等小型桡足类的无节幼虫可满足这类海洋生物对开口饵料大小和营养方面的需求。因此, 有关强额孔雀水蚤人工培养方面的研究越来越受到关注, 已有的研究涉及产卵能力^[2-4]、发育周期^[3, 5]及培养密度^[4]等。

桡足类的人工培养与饵料供应密切相关。有关桡足类摄食方面的研究目前主要集中在中华哲水蚤(*Calanus sinicus*)^[6-12]和安氏伪镖水蚤(*Pseudodiaptomus annandalei*)^[13-18]等大中型种类(体长 ≥ 1.0 mm)。小型桡足类(体长 < 1.0 mm)由于个体小, 分离纯化也比较困难, 研究报道远远少于大型桡足类^[19]。然而, 现有的关于小型桡足类的研究发现, 小型桡足类世代周期较短, 摄食率也比大型桡足类高, 可能具有更高

的次级生产力^[20, 21]。摄食率指标是桡足类生理活动和代谢水平的重要指示, Alajmi^[2]等研究了强额孔雀水蚤野生种群摄食率与实验室驯化种群的差异, 而有关不同种类藻类饵料和不同饵料浓度对强额孔雀水蚤摄食率的研究尚未见报道。本实验研究了不同温度(18℃、22℃、26℃、30℃)、不同种类微藻(球等鞭金藻(*Isochrysis galbana*)、牟氏角毛藻(*Chaetoceros muelleri*)、青岛大扁藻(*Platymonas helgolandica*))以及不同饵料质量浓度(0.5、1.0、1.5、2.5、5 μgC/mL)对强额孔雀水蚤摄食的影响, 探讨了摄食率与桡足类体型大小的关系。研究结果可进一步丰富桡足类一般生物学基础研究, 为强额孔雀水蚤的人工培养筛选适宜的饵料和投喂浓度, 进一步优化强额孔雀水蚤的人工培养条件。

收稿日期: 2019-10-15; 修回日期: 2020-07-04
 基金项目: 福建省自然科学基金项目(2018J01453); “十三五”厦门市海洋经济创新发展示范项目(16PZY002SF18)
 [Foundation: Natural Science Foundation of Fujian Province, China, No. 2018J01453; Regional Demonstration of Marine Economy Innovative Development Project, No. 16PZY002SF18]
 作者简介: 程浩楠(1995—), 男, 湖北襄阳人, 硕士研究生, 主要从事桡足类相关研究, E-mail: orangehnan@foxmail.com; 王淑红, 通信作者, E-mail: shwang@jmu.edu.cn

1 材料与方 法

1.1 实验藻种

实验选择球等鞭金藻、牟氏角毛藻和青岛大扁藻 3 种微藻作为桡足类饵料藻, f/2 培养基, 培养温度为 24℃~26℃, 培养盐度为 26~27, 光周期为 16 L: 8 D, 光照强度设置为 1 500 Lx。摄食研究所用藻类均为处于指数增长长期末期的藻类细胞。

1.2 桡足类采集

满潮前 1 h 采用浅水 II 形浮游生物网(网目 200 μm) 在福建省厦门市集美龙舟池附近海域(24°33'N; 118°05'W) 水平拖网采集桡足类, 样品采集后用 1 800 μm 筛绢过滤以去除大型浮游生物, 过滤海水充分稀释后 30 min 内将样品移送实验室进行下一步分离。

1.3 桡足类分离与培养

从野外采集的样品中挑选 90 只~110 只活泼健壮的强额孔雀水蚤成体, 置于水体积为 800 mL 的 1 L 玻璃烧杯中暂养。暂养期间以球等鞭金藻作为桡足类饵料, 暂养 1 周后转入玻璃缸中继续扩大培养, 培养体积为 20 L。培养温度为 23℃~25℃, 培养盐度为 26~27、光照条件为自然光照。海水经 5、1、0.1、0.01 μm 滤膜 4 级过滤后用于藻类培养。每 2 d 加入牟氏角毛藻和球等鞭金藻混合液, 2 种藻类等比例混合, 饵料投喂密度为 1.5×10⁵ 个/mL 左右。桡足类种群密度高于 4 只/mL 时, 接种新的养殖容器继续培养。

1.4 实验方法

1.4.1 藻类含碳量计算

根据 Strathmann^[22]公式计算 3 种藻类的含碳量。随机挑选 30 个藻细胞测量细胞粒径并计算藻细胞体积。参照王燕^[23]的方法估算藻类含碳量, 牟氏角毛藻(1), 球等鞭金藻和青岛大扁藻(2)含碳量计算公式分别为:

$$\text{Log}C=0.758(\text{Log}Q)-0.422 \quad (1)$$

$$\text{Log}C=0.712(\text{Log}V)-0.314 \quad (2)$$

其中, C 为含碳量, Q 为藻细胞体积。

1.4.2 滤食率、清滤率和摄食率的计算

滤食率(G)、清滤率(F)、和摄食率(I)^[24]的计算公式分别为:

$$G=V(\ln C_1-\ln C_2)(C_0-C_2)/(N \times t)(\ln C_0-\ln C_2)$$

$$F=V(\ln C_1-\ln C_2)/(N \times t)$$

$$I=G \times C$$

其中: 滤食率 G (cell/(只/h))为每只桡足类每小时滤过的藻细胞数量(cell); 清滤率 F (mL/(只/h))为每只桡足类每小时滤过的海水体积; 摄食率 I (μgC/(只/h))为每小时每只桡足类摄食藻类的含碳量; V 为培养桡足类的水体积(mL); C_0 为开始实验时的藻细胞浓度(个/mL); C_1 为对照组摄食实验终止时的藻类细胞浓度(个/mL); C_2 为实验组摄食实验终止时的藻类细胞浓度(个/mL); N 为桡足类个体的数量(只); t 为实验持续的时间(h), C 为每个藻细胞的碳含量(pg/个)。

1.4.3 桡足类含碳量的计算

根据 Satapoomin^[25]的公式计算强额孔雀水蚤含碳量:

$$\ln W=2.26 \ln L_p-13.85 \quad (3)$$

W 为桡足类个体含碳量(μg/只), L_p 代表桡足类前体部的长度。测量 30 只成熟雌性桡足类个体的前体部长度, 取平均值代入上述公式计算碳含量。

1.4.4 温度和饵料浓度对桡足类摄食影响实验

温度试验中 3 种藻类饵料的碳浓度均为 2.5 μg/mL, 设置 18℃、22℃、26℃、30℃ 4 个温度梯度, 每个温度 3 个平行。

饵料质量浓度试验培养温度为 26℃, 设置 0.5、1、1.5、2.5、5 μg/mL 5 种碳浓度梯度, 每个饵料梯度 3 个平行。

桡足类置于避光处理的 15 mL 离心管中, 培养水体为 15 mL, 离心管固定于摄食轮上, 整个试验过程中摄食轮以 10 r/min 的速度不停旋转, 直至试验结束。

1.5 数据处理

通过均值比较和 Tukey HSD 统计学方法, 采用 SPSS 软件分析不同饵料种类、饵料浓度和不同培养温度对强额孔雀水蚤滤食率、清滤率和摄食率的影响, 结果以平均值 ± 标准差表示。

2 结果

2.1 培养温度对强额孔雀水蚤清滤率、滤食率和摄食率的影响

强额孔雀水蚤对球等鞭金藻和牟氏角毛藻的清滤率和滤食率在 22℃ 和 18℃ 显著低于 26℃ ($P<0.05$), 摄食率也在培养温度为 26℃ 时达到最高 ($P<0.05$); 培养温度为 26℃ 时, 强额孔雀水蚤对牟氏角毛藻的滤食率和清滤率显著高于培养温度为 30℃ 的 ($P<0.05$);

对于球等鞭金藻而言, 滤食率和清滤率 30℃与 26℃相比均无统计学差异($P>0.05$)。26℃时, 强额孔雀水蚤对青岛大扁藻的滤食率、清滤率、摄食率与其他温度

相比无显著差异($P>0.05$)。强额孔雀水蚤对牟氏角毛藻和球等鞭金藻的摄食率在 26℃达到最大, 且显著高于 22℃和 18℃的摄食率($P<0.05$) (图 1)。

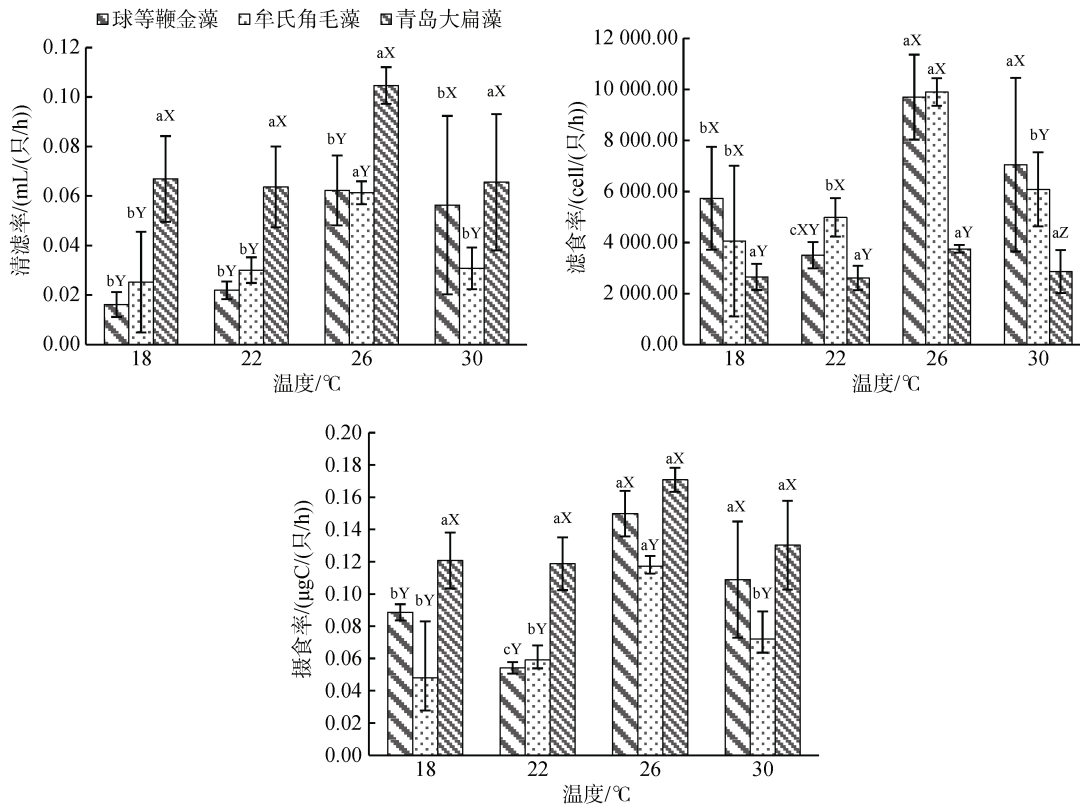


图 1 温度对强额孔雀水蚤清滤率、滤食率和摄食率的影响(饵料质量浓度 2.5 $\mu\text{gC}/\text{mL}$)

Fig. 1 Effects of temperature on clearance, gazing, and ingestion rates of *P. crassirostris* (food concentration: 2.5 $\mu\text{gC}/\text{mL}$).

注: a, b, c 为同种藻类不同温度的 3 个水平($P<0.05$); X, Y, Z 为同样温度不同种类 3 个水平($P<0.05$)

2.2 饵料浓度对强额孔雀水蚤清滤率、滤食率和摄食率的影响

图 2 为强额孔雀水蚤清滤率、滤食率和摄食率在投喂不同浓度饵料微藻细胞条件下的变化情况。随着饵料浓度的增加, 强额孔雀水蚤对球等鞭金藻、牟氏角毛藻和青岛大扁藻的清滤率都呈现下降的趋势。在饵料藻细胞浓度为 0.5 $\mu\text{gC}/\text{mL}$ 时清滤率最高, 2.5 $\mu\text{gC}/\text{mL}$ 时清滤率最低, 两者具有显著差异($P<0.05$)。滤食率和摄食率在 0.5 $\mu\text{gC}/\text{mL}$ ~2.5 $\mu\text{gC}/\text{mL}$ 之间随藻类饵料浓度升高而升高, 2.5 $\mu\text{gC}/\text{mL}$ 时的滤食率和摄食率与 5.0 $\mu\text{gC}/\text{mL}$ 组无统计学差异($P>0.05$)。

2.3 微藻种类对强额孔雀水蚤清滤率、滤食率和摄食率的影响

强额孔雀水蚤对青岛大扁藻清滤率和摄食率在

所有实验温度下都显著高于球等鞭金藻和牟氏角毛藻($P<0.05$), 滤食率则显著低于牟氏角毛藻和球等鞭金藻($P<0.05$)。对 3 种微藻饵料的摄食率顺序为: 牟氏角毛藻<球等鞭金藻<青岛大扁藻。强额孔雀水蚤对牟氏角毛藻的摄食在 26℃和 30℃时显著低于青岛大扁藻($P<0.05$), 与球等鞭金藻无显著差异($P<0.05$); 强额孔雀水蚤对球等鞭金藻和牟氏角毛藻的摄食在 18℃和 22℃均显著低于对青岛大扁藻的($P<0.05$)。

2.4 强额孔雀水蚤摄食碳量占体碳比例

测量所得强额孔雀水蚤前体部体长均值为 421.3 μm , 根据 Satapoomin^[25]公式计算强额孔雀水蚤的含碳量为 0.83 $\mu\text{g}/\text{只}$ 。图 3 为强额孔雀水蚤每日摄食藻类的含碳量与体含碳量的比值。投喂青岛大扁藻的强额孔雀水蚤在培养温度为 18℃和 22℃、饵料碳质量浓度为 5 $\mu\text{gC}/\text{mL}$ 时, 摄食碳量占体碳比例显著低于 26℃和

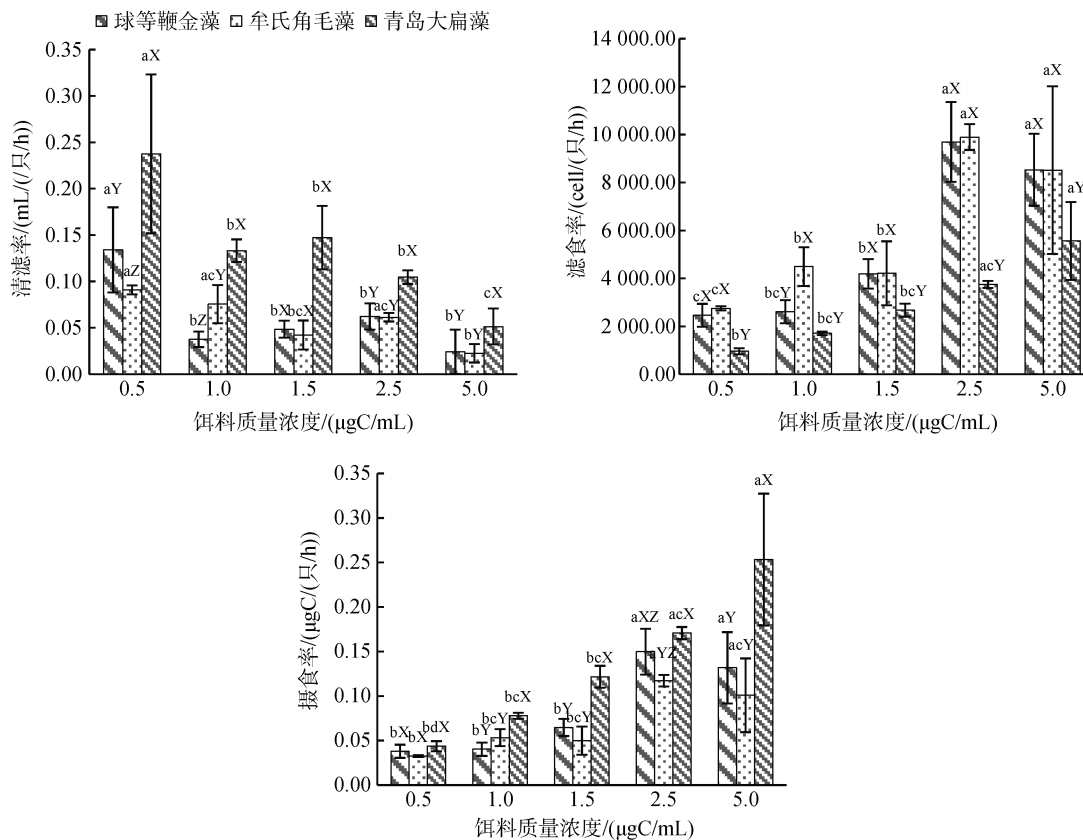


图2 饵料浓度对强额孔雀水蚤清滤率、滤食率和摄食率的影响(温度: 26℃)

Fig. 2 Effects of food concentration on clearance, gazing, and ingestion rates of *P. crassirostris* (temperature: 26℃)

注: a, b, c 为同种藻类不同饵料浓度的 3 个水平($P < 0.05$); X, Y, Z 为相同饵料浓度不同藻种类的异 3 个水平($P < 0.05$)

30℃ ($P < 0.05$), 而投喂球等鞭金藻和牟氏角毛藻的强额孔雀水蚤, 不同温度组之间的差异不显著 ($P > 0.05$)。

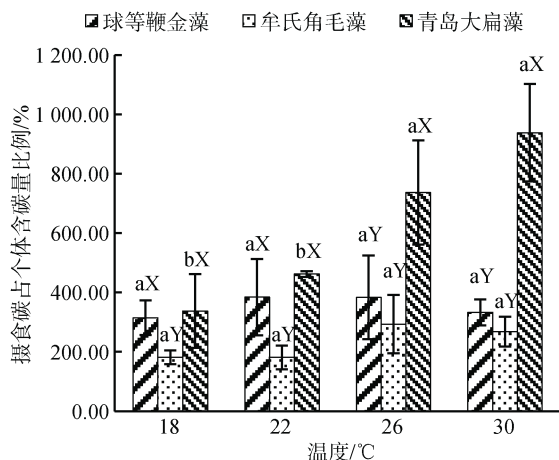


图3 培养温度对强额孔雀水蚤 24 h 摄食碳占个体含碳量比例的影响(饵料质量浓度: 5 µgC/mL)

Fig. 3 Effects of temperature on 24-h Weight-specific ingestion rates of *P. crassirostris* (food concentration: 5 µgC/mL)

2.5 实验过程中各组微藻浓度的变化

表 1 列举了实验中初始、对照、实验组微藻细胞浓度的变化, 并进行了 Tukey HSD 事后检验, 组内差异显著小于组间差异, 实验前后差异显著, 因此实验条件控制稳定, 实验结果可信。

3 讨论

3.1 温度对桡足类摄食的影响

桡足类的摄食率在一定范围内随着温度的升高而升高, 超过适宜温度范围的高温则有可能抑制桡足类的摄食, 桡足类摄食的最适温度一般与自身生物学特性和自然分布海域相关。太平洋纺锤水蚤 (*Acartia pacifica*) 作为亚热带海域的优势种, 最适培养温度范围为 20℃~25℃^[26]。作为中国近海尤其是东黄海优势种的中华哲水蚤^[11]在 15℃ 的清滤率、摄食率和排粪率都高于 20℃ 和 25℃^[7], 这与其自然分布海域温度较低密切相关。强额孔雀水蚤为近岸

表 1 初始、对照、实验组微藻细胞浓度对比

Tab. 1 Concentrations of algae cells from initial, control, and test groups

藻类	温度(°C)/碳含量(μgC/mL)	初始细胞浓度(个/mL)	对照组细胞浓度(个/mL)	实验组细胞浓度(个/mL)
球等鞭金藻	18°C	2.10×10 ⁵ a	2.29×10 ⁵ a	1.71±0.02×10 ⁵ b
	22°C	2.10×10 ⁵ a	1.46×10 ⁵ b	1.18±0.03×10 ⁵ c
	26°C	2.10×10 ⁵ a	2.07×10 ⁵ a	1.14±0.13×10 ⁵ b
	30°C	2.10×10 ⁵ a	1.30×10 ⁵ a	7.84±1.29×10 ⁴ b
	0.5	4.22×10 ⁴ a	2.25×10 ⁴ b	1.18±0.23×10 ⁴ c
	1.0	8.44×10 ⁴ a	8.20×10 ⁴ a	3.62±0.37×10 ⁴ b
	1.5	1.27×10 ⁵ a	8.91×10 ⁴ b	5.67±0.39×10 ⁴ c
	2.5	2.10×10 ⁵ a	2.07×10 ⁵ a	7.84±1.29×10 ⁴ b
	5.0	4.20×10 ⁵ a	4.31×10 ⁵ a	1.74±0.64×10 ⁵ a
牟氏角毛藻	18°C	2.23×10 ⁵ a	1.69×10 ⁵ bd	1.34±0.02×10 ⁵ cd
	22°C	2.23×10 ⁵ a	1.60×10 ⁵ b	1.20±0.05×10 ⁵ c
	26°C	2.23×10 ⁵ a	2.18×10 ⁵ a	1.21±0.04×10 ⁵ b
	30°C	2.23×10 ⁵ a	2.53×10 ⁵ a	1.53±0.39×10 ⁵ b
	0.5	4.46×10 ⁴ a	4.99×10 ⁴ b	3.16±0.08×10 ⁴ c
	1.0	8.93×10 ⁴ a	8.49×10 ⁴ a	6.25±0.63×10 ⁴ b
	1.5	1.34×10 ⁵ a	1.18×10 ⁵ a	7.56±1.01×10 ⁴ b
	2.5	2.23×10 ⁵ a	2.18×10 ⁵ a	1.53±0.43×10 ⁵ b
	5.0	4.46×10 ⁵ a	4.35×10 ⁵ a	3.89±0.28×10 ⁵ b
青岛大扁藻	18°C	5.49×10 ⁴ a	5.34×10 ⁴ a	2.84±0.07×10 ⁴ b
	22°C	5.49×10 ⁴ a	5.57×10 ⁴ a	3.05±0.38×10 ⁴ b
	26°C	5.49×10 ⁴ a	5.96×10 ⁴ b	2.19±0.13×10 ⁴ c
	30°C	5.49×10 ⁴ a	6.77×10 ⁴ a	3.69±0.75×10 ⁴ b
	0.5	1.10×10 ⁴ a	9.78×10 ³ a	2.04±0.86×10 ³ b
	1.0	2.20×10 ⁴ a	2.40×10 ⁴ a	7.64±0.62×10 ³ b
	1.5	3.29×10 ⁴ a	3.66×10 ⁴ a	1.76±0.23×10 ⁴ b
	2.5	5.49×10 ⁴ a	5.96×10 ⁴ b	3.69±0.13×10 ⁴ c
	5.0	1.10×10 ⁵ a	1.82×10 ⁵ b	9.11±1.70×10 ⁴ a

注: 表中不同字母 a、b、c 表示在水平方向有显著性($P < 0.05$), 实验组藻类密度为平均值±SE, 其余组为平均值

暖水种, 每年 8 月在厦门海域的种群丰度达到峰值^[1], 期间海水温度通常高于 24°C。实验中强额孔雀水蚤对饵料的摄食率在培养温度低于 24°C 时降低, 26°C、30°C 强额孔雀水蚤对牟氏角毛藻和球等鞭金藻的清除率和摄食率均显著高于 18°C、22°C ($P < 0.05$)。以上结果表明强额孔雀水蚤的最适摄食温度在 26°C~30°C, 与近岸暖水优势种的分布特性一致。

3.2 饵料藻类种类、浓度和细胞大小对桡足类摄食的影响

在一定范围内, 强额孔雀水蚤的摄食率随饵料藻类浓度增加而升高, 但饵料浓度过高反而抑制其摄食。培养温度 26°C 条件下, 强额孔雀水蚤对牟氏角毛藻和球等鞭金藻的滤食率在饵料质量浓

度为 2.5 μgC/mL 时达到峰值, 显著高于低浓度组, 与 5.0 μgC/mL 组无显著差异。饵料藻细胞达到一定浓度之后, 中华哲水蚤的摄食率也出现上述类似的不升反降的现象^[8]。

不同饵料藻类种类对强额孔雀水蚤的摄食率影响也不一样。26°C 和 30°C 培养条件下时, 强额孔雀水蚤对青岛大扁藻的摄食率显著高于球等鞭金藻和牟氏角毛藻, 对球等鞭金藻的摄食率高于基本同等粒径的牟氏角毛藻。有研究发现硅藻对桡足类具有毒性, 可能会抑制桡足类的发育与生殖^[27-30]。这种现象在当前实验中也有体现: 在相同的培养温度下, 强额孔雀水蚤对隶属硅藻的牟氏角毛藻摄食率较低。牟氏角毛藻中可能存在的抑制桡足类摄食的化学物质、特殊的藻细胞形态以及比较小的藻细胞粒

径都可能是导致低摄食率的原因。

口部附肢运动是桡足类滤食的主要活动方式,口部附肢上刚毛间缝隙大小会限制可滤食颗粒的粒径^[31, 32],因此,饵料藻类的粒径大小对大颚的过滤效率有显著影响^[32, 33]。如果饵料粒径小于刚毛之间的缝隙则有可能影响桡足类对该种饵料的滤食率,甚至不能摄食粒径过小或过大的饵料。通常认为桡足类最适饵料的等效球直径(Equivalent sphere diameter, ESD)约等于桡足类 ESD 的 1/18^[34]。可根据扁长球体体积公式($V_{\text{球}} = \pi ab^2/6$)估算强额孔雀水蚤的 ESD($ESD = (ab^2)^{1/3}$)。其中 $V_{\text{球}}$ 为强额孔雀水蚤的体积, a 为强额孔雀水蚤前体部体长,本实验中桡足类成体该值为 421.28 μm ; b 为强额孔雀水蚤胸部宽度,本实验所用桡足类胸部宽度为 144.71 μm ,由此计算强额孔雀水蚤 ESD 为 206.6 μm ,则成体最适饵料的 ESD 为 11.5 μm 左右。实验所用青岛大扁藻的 ESD 为 10.2 μm ,与强额孔雀水蚤的饵料最适 ESD 接近,牟氏角毛藻和球等鞭金藻的 ESD 则偏小。这也可能是强额孔雀水蚤对青岛大扁藻的摄食率显著高于另外两种粒径较小藻类的原因。

高亚辉^[35]等对瘦尾胸刺水蚤(*Centropages tenuiremis*)的研究表明,饵料粒径在 10.2 μm ~35.8 μm 范围内,藻细胞粒径越大,清滤率值越高;而饵料粒径在 2.7 μm ~5.4 μm 时,清滤率的变化并不规律,表明饵料粒径可影响瘦尾胸刺水蚤的滤食率。类似的研究发现,中华哲水蚤对 ESD 为 5.5 μm 的小球藻(*Chlorella sp.*)和 ESD 为 3.1 μm 的三角褐指藻(*Phaeodactylum tricornerutum*)等小型藻类饵料的摄食率很低,仅为 7.10%和 2.16%^[7, 8],以上结果表明对于大型桡足类中华哲水蚤,过低的饵料藻 ESD 会影响其摄食率而导致营养不足。实验中各温度组不同藻类饵料浓度,强额孔雀水蚤对青岛大扁藻的清滤率都高于粒径较小的牟氏角毛藻和球等鞭金藻。因此,实际生产过程中,添加粒径较大的藻类饵料有利于提高桡足类的碳源摄入量。从最适饵料 ESD 角度考虑,有着近似青岛大扁藻 ESD(10.2 μm)的藻类更适合用于培养强额孔雀水蚤成体。

3.3 小型桡足类摄食碳量占体碳比例

Lawson^[5]等的研究发现,强额孔雀水蚤从无节幼体 1 期发育到桡足幼体 1 期的时间在 18 $^{\circ}\text{C}$ 约需要 6 d,在 25 $^{\circ}\text{C}$ ~27 $^{\circ}\text{C}$ 时则仅需 3 d^[3]。当前实验结果表明,青岛大扁藻质量浓度在 5.0 $\mu\text{gC/mL}$ 时,强额孔

雀水蚤日摄食碳比例(Ingestion rates of body carbon ingestion day⁻¹, BC)在 18 $^{\circ}\text{C}$ 、22 $^{\circ}\text{C}$ 、26 $^{\circ}\text{C}$ 、30 $^{\circ}\text{C}$ 分别为: 337.5%±124.0%、462.4%±9.7%、736.9%±175.9%、938.6%±164.3%,摄食率随温度升高而提高。且 4 种培养温度条件下,强额孔雀水蚤 24 h BC 值均高于 2,这与 Huntley^[36]等提出的温度在一定范围内与桡足类的生长发育呈正相关性的理论一致。强额孔雀水蚤是近岸暖水优势种,体型小、世代周期也比较短、繁殖力相对较强。日摄食碳比例数据表明其对饵料碳源的日摄入量是自身体含碳量的数百甚至上千倍,这可能是小型桡足类适应上述生态策略的物质基础。

Garrido^[37]等对胸刺水蚤(*Centropages chierchiae*)的研究发现,即使在最适培养温度(19 $^{\circ}\text{C}$),其日摄食碳比例也仅有 73.2%±48.83%。体长范围在 2.7 mm~3.5 mm 的中华哲水蚤对不同微藻的日摄食碳比例在 2.16%~43.40%;体长范围在 2.0 mm~2.20 mm 火腿伪镖水蚤^[6]的 BC 值也仅为 37%。而体长范围为 1.2 mm~2.0 mm 的中型桡足类如太平洋纺锤水蚤^[26](*Acartia pacifica*)、细巧华哲水蚤^[38](*Sinocalanus tenellus*)、海洋伪镖水蚤^[38](*Pseudodiaptomus marinus*)和瘦尾胸刺水蚤^[39]的 BC 值在 48%至 345%之间。小型桡足类如安氏伪镖水蚤和强额孔雀水蚤在摄食亚心形扁藻和青岛大扁藻时 BC 值最高,分别为 938.57%和 1433.61%。因此可以看出,体型较大的桡足类,具有较低的 BC 值;体型较小的桡足类,BC 值却比较高。这与小型桡足类世代周期短、繁殖力强的生物学特性相吻合。

综上所述,培养温度 26 $^{\circ}\text{C}$ ~30 $^{\circ}\text{C}$ 、饵料藻类质量浓度维持在 2.5 $\mu\text{gC/mL}$ ~5.0 $\mu\text{gC/mL}$,强额孔雀水蚤有最旺盛的摄食率,也表明 2.5 $\mu\text{gC/mL}$ ~5.0 $\mu\text{gC/mL}$ 是最适合强额孔雀水蚤生长的饵料碳质量浓度。考虑到饵料藻类的粒径,ESD 在 10.2 μm 的青岛大扁藻是比较适合强额孔雀水蚤成体的藻类饵料。桡足类人工培养生产实践中,应考虑藻类细胞粒径大小与桡足类体型之间的关系,对于粒径较小的藻类饵料,单纯提高藻细胞浓度不一定能够提高桡足类的碳源摄入,可考虑添加粒径较大的藻类饵料,加强桡足类对饵料藻类的摄食,提高培养效率。

参考文献:

- [1] 杨位迪. 厦门港浮游动物对浮游植物的摄食压力研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2007.
Yang Weidi. Studies of zooplankton grazing impacts on

- phytoplankton in Xianmen Harbor[D]. Xiamen: Xiamen University, 2007.
- [2] Alajmi F, Zeng C, Jerry D R. Domestication as a novel approach for improving the cultivation of Calanoid Copepods: A case study with *Parvocalanus crassirostris*[J]. Plos One, 2015, 10(7): e133269.
- [3] Alajmi F, Zeng C. Evaluation of microalgal diets for the intensive cultivation of the tropical Calanoid Copepod, *Parvocalanus crassirostris*[J]. Aquaculture Research, 2015, 46(5): 1025-1038.
- [4] Alajmi F, Zeng C. The effects of stocking density on key biological parameters influencing culture productivity of the Calanoid Copepod, *Parvocalanus crassirostris*[J]. Aquaculture, 2014, 434: 201-207.
- [5] Lawson T J, Grice G D. The developmental stages of *Paracalanus crassirostris* Dahl, 1894 (Copepoda, Calanoida)[J]. Crustaceana, 1974, 1(24): 43-56.
- [6] 薛泽. 温度、盐度、pH 和饵料对两种海洋桡足类摄食和代谢的影响[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
Xue Ze. Effect of temperature, salinity, pH and algal species on the Ingestion and metabolism of two marine Copepods[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013.
- [7] 于娟, 张瑜, 杨桂朋, 等. 饵料、温度和盐度对两种海洋桡足类摄食与排粪的影响[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2012, 42(Z2): 45-52.
Yu Juan, Zhang Yu, Yang Guipeng, et al. Effects of diet, temperature and salinity on ingestion and egestion of two species of marine Copepods[J]. Periodical of Ocean University of China, 2012, 42(Z2): 45-52.
- [8] 谢志浩, 唐学玺, 陆开宏. 藻类种类和浓度对中华哲水蚤(*Calanus sinicus*)摄食和消化酶活性的影响[J]. 生态学报, 2009, 29(2): 613-618.
Xie Zhihao, Tang Xuexi, Lu Kaihong. Effects of microalgal species and concentrations on the feeding and digestive enzyme activities of *Calanus sinicus*[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(2): 613-618.
- [9] 谢志浩, 王悠, 唐学玺. 东海原甲藻(*Prorocentrum donghaiense*)对中华哲水蚤(*Calanus sinicus*)摄食和消化酶活性的影响[J]. 海洋与湖沼, 2009, 40(4): 494-499.
Xie Zhihao, Wang You, Tang Xuexi. Effect of *prorocentrum donghaiense* on feeding and digestive enzyme activity of *Calanus sinicus*[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2009, 40(4): 494-499.
- [10] 李超伦, 孙松, 王荣. 中华哲水蚤对自然饵料的摄食选择性实验研究[J]. 海洋与湖沼, 2007, 38(6): 529-535.
Li Chaolun, Sun Song, Wang Rong. An experimental study on grazing selectivity of *Calanus sinicus* to natural food particles[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2007, 38(6): 529-535.
- [11] 高华, 高亚辉, 梁君荣. 几种赤潮藻对中华哲水蚤摄食、产卵和孵化的影响[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2006, 45(4): 553-557.
Gao hua, Gao Yahui, Liang Junrong. Effects of red-tide causative algae on the feeding behavior, egg production and egg hatching of a planktonic copepod *Calanus sinicus* brodsky[J]. Journal of Xiamen University (natural science), 2006, 45(4): 553-557.
- [12] 张武昌, 王荣. 饵料浓度对中华哲水蚤摄食的影响[J]. 海洋学报(中文版), 2000, 22(6): 88-94.
Zhang Wuchang, Wang Rong. Effect of concentration of food particles on the feeding behavior of the marine planktonic copepod *Calanus sinicus*[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2000, 22(6): 88-94.
- [13] 陈清香. 安氏伪镖水蚤(*Pseudodiaptomus annandalei* Sewell, 1919)的实验生态学研究[D]. 广州: 中山大学, 2006.
Chen Qingxiang. The experimental ecology study on the Calanidae copepod: *Pseudodiaptomus annandalei* Sewell, 1919[J]. Guangzhou: Sun Yat-sen University, 2006.
- [14] 陈清香, 吕军仪, 盛军庆, 等. 饵料对安氏伪镖水蚤生殖力的影响[J]. 热带海洋学报, 2006, 25(1): 38-41.
Chen Qingxiang, Lü Junyi, Sheng Junqing, et al. Effect of diets on fecundity of *Pseudodiaptomus annandalei* Sewell, 1919[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2006, 25(1): 38-41.
- [15] 何学佳, 杨华明, 吕柏东, 等. 核酸指标对桡足类安氏伪镖水蚤摄食率、生长率及产卵率的指示作用[J]. 热带海洋学报, 2018, 37(2): 26-35.
He Xuejia, Yang Huaming, Lü Baidong, et al. Nucleic acid proxies for ingestion rate, growth and reproduction in copepod *Pseudodiaptomus annandalei*[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2018, 37(2): 26-35.
- [16] 潘洁红, 刘光兴. 甲维盐对安氏伪镖水蚤(*Pseudodiaptomus annandalei*)摄食、呼吸、发育和生殖的影响[J]. 海洋与湖沼, 2019, 50(1): 181-187.
Pan Jiehong, Liu Guangxing. The impact of emamectin benzoate on the feeding, respiration, survival, development, and reproduction of *Pseudodiaptomus annandalei*[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2019, 50(1): 181-187.
- [17] 石琛. 环境因子氮、磷、重金属对安氏伪镖水蚤生长和摄食的影响[D]. 广州: 暨南大学, 2011.
Shi Chen. Environmental factors of nitrogen, phosphorus, heavy metals on growth and ingestion in *Pseudodiaptomus annandalei*[D]. Guangzhou: Jinan University, 2011.
- [18] 石琛, 吕颂辉, 何学佳. 不同磷条件对安氏伪镖水蚤的生长及摄食的影响[J]. 水生生物学报, 2011, 35(3): 460-466.
Shi Chen, Lü Songhui, He Xuejia. Effect of phosphorus condition on growth and ingestion in *Pseudodiaptomus annandalei*[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2011, 35(3):

- 460-466.
- [19] 孙晓红. 小型桡足类种群动力学研究[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2008.
Sun Xiaohong. Population dynamics of small copepod[D]. Qingdao: The Institute of Oceanology, the Chinese Academy of Sciences, 2008.
- [20] Turner J. The importance of small planktonic copepods and their roles in pelagic marine food webs[J]. *Zoological Studies*, 2004, 43(2): 255-266.
- [21] 王荣, 张鸿雁, 王克, 等. 小型桡足类在海洋生态系统中的功能作用[J]. *海洋与湖沼*, 2002, 33(5): 453-460.
Wang Rong, Zhang Hongyan, Wang Ke, et al. Function performed by small copepods in marine ecosystem[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2002, 33(5): 453-460.
- [22] Strathmann R R. Estimating the organic carbon content of phytoplankton from cell volume or plasma volume[J]. *Limnology & Oceanography*, 1967, 12(3): 411-418.
- [23] 王燕. 海洋浮游植物细胞体积与细胞碳、氮及叶绿素 *a* 含量之间的关系[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011.
Wang Yan. Relationship between cell volume and cell carbon, cell nitrogen and cell chlorophyll *a* for marine phytoplankton[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2011.
- [24] Frost B W. Effects of size and concentration of food particles on the feeding behavior of the marine planktonic copepod *Calanus pacificus*[J]. *Limnology & Oceanography*, 1972, 17(6): 805-815.
- [25] Satapoomin S. Carbon content of some common tropical Andaman Sea copepods[J]. *Journal of Plankton Research*, 1999, 21(11): 2117-2123.
- [26] 高亚辉, 林波. 几种因素对太平洋纺锤水蚤摄食率的影响[J]. *厦门大学学报(自然科学版)*, 1999, 38(5): 751-757.
Gao Yahui, Lin Bo. Effects of some factors on feeding rates of *Acartia Pacifica*[J]. *Journal of Xiamen University (natural science)*, 1999, 38(5): 751-757.
- [27] 李捷, 李超伦. 高浓度硅藻对桡足类繁殖的抑制作用[J]. *生态学报*, 2004, 24(11): 2664-2670.
Li Jie, Li Chaolun. Deleterious effects of diatom in high concentration on copepod reproduction[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(11): 2664-2670.
- [28] 张光涛, 孙松. 硅藻对桡足类生长和生殖的作用[J]. *自然科学进展*, 2003, 8(13): 818-824.
Zhang Guangtao, Sun Song. The effects of growth and reproduction of copepods on diatoms[J]. *Progress in Natural Science*, 2003, 8(13): 818-824.
- [29] Ianora A, Poulet S A, Miralto A, et al. The diatom *Thalassiosira rotula* affects reproductive success in the copepod *Acartia clausi*[J]. *Marine Biology*, 1996, 125(2): 279-286.
- [30] Uye S I. Induction of reproductive failure in the planktonic copepod *Calanus pacificus* by diatoms[J]. *Marine Ecology Progress*, 1996, 133(1-3): 89-97.
- [31] Boyd C M. Selection of Particle Sizes by Filter-Feeding Copepods: A Plea for Reason[J]. *Limnology and Oceanography*, 1976, 21(1): 175-180.
- [32] Tiselius P, Jonsson P. Foraging behaviour of six calanoid copepods: observations and hydrodynamic analysis[J]. *Marine Ecology-progress Series*, 1990, 66: 23-33.
- [33] Koehl M A R, Strickler J R. Copepod feeding currents: food capture at low Reynolds number[J]. *Limnology & Oceanography*, 1981, 26(6): 1062-1073.
- [34] Hansen B. The size ratio between planktonic predators and their prey[J]. *Limnology & Oceanography*, 1994, 39(2): 395-403.
- [35] 高亚辉, 李松. 瘦尾胸刺水蚤摄食率的观察实验[J]. *热带海洋*, 1990, 9(3): 59-65.
Gao Yahui, Li Song. Observational experiments on feeding rates of *Centropages tenuiremis*[J]. *Tropical Oceanology*, 1990, 9(3): 59-65.
- [36] Huntley M E, Mai D G L. Temperature-dependent production of marine copepods: A global synthesis[J]. *The American Naturalist*, 1992, 140(2): 201-242.
- [37] Garrido S, Cruz J, Santos A M P, et al. Effects of temperature, food type and food concentration on the grazing of the calanoid copepod *Centropages chierchiae*[J]. *Journal of Plankton Research*, 2013, 35(4): 843-854.
- [38] 陈珂. 三种海洋桡足类摄食、生殖和发育的研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2004.
Chen Ke. The studies on ingestion, reproduction and development of three marine copepods[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2004.
- [39] 刘光兴, 李松. 厦门港瘦尾胸刺水蚤体长、体重与摄食率的季节变化[J]. *海洋学报(中文版)*, 1998, 20(3): 104-109.
Liu Guangxing, Li Song. Seasonal variations in body length and weight and ingestion rate of *Centropages tenuiremis* Thompson and Scott[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1998, 20(3): 104-109.

Effects of temperature and diet on the ingestion of calanoid copepods: *Parvocalanus crassirostris*

CHENG Hao-nan¹, CHENG Fang-ping^{2, 3}, WANG Shu-hong¹

(1. Fisheries college of Jimei University, Ornamental Aquarium Engineering Research Centre in Universities of Fujian Province, Xiamen 361021, China; 2. Shanghai Ocean University, College of Marine Ecology and Environment, Shanghai 201306, China; 3. Shanghai Ocean University, Centre for Research on the Ecological Security of Ports and Shipping, Shanghai 201306, China)

Received: Oct. 15, 2019

Key words: *Parvocalanus crassirostris*; clearance rate; grazing rate; ingestion rate; optimum food equivalent sphere diameter

Abstract: In order to optimize the culture conditions, the effects of different temperatures (18°C, 22°C, 26°C, and 30°C), different food types (*Isochrysis galbana*, *Chaetoceros muelleri*, and *Platymonas helgolandica*), as well as different food concentrations (0.5, 1.0, 1.5, 2.5, and 5.0 µgC/mL) on the ingestion of *Parvocalanus crassirostris* were investigated. The results showed that: (1) The clearance rates increased with temperature increase, but decreased when food concentration increase. The clearance rates had the highest values at 26°C~30°C when the food concentration was 0.5 µgC/mL; (2) The grazing and ingestion rates increased with temperature increase while feeding on *I. galbana* and *C. muelleri* and reached the highest level at 26°C. Additionally, both the grazing and ingestion rates increased while feeding on *P. helgolandica* when the temperature elevated from 18°C to 30°C. The order of the ingestion rate for three algae species were as following: *P. helgolandica*>*I. galbana*>*C. muelleri*; (3) The weight-specific ingestion rates of *P. crassirostris* for body carbon content per day is higher than that of the large copepods such as *Calanus sinicus* and *Pseudodiaptomus marinus*; (4) The optimum food equivalent sphere diameter of *P. crassirostris* is about 11.5 µm, and *P. helgolandica* is a suitable feed when the cell size was considered.

(本文编辑: 谭雪静)