

DOI: 10.12264/JFSC2023-0029

不同饵料对隆线蚤生长繁殖及种群动态的影响

张亚¹, 薛毓才¹, 陈慧聪¹, 舒骅¹, 穆亮亮¹, 蒋刚¹, 王伟隆^{1, 2, 3}, 黄旭雄^{1, 2, 3}

1. 上海海洋大学, 农业农村部鱼类营养与环境生态研究中心, 上海 201306;

2. 上海海洋大学, 农业农村部淡水水产种质资源重点实验室, 上海 201306;

3. 上海海洋大学, 水产科学国家级实验教学示范中心, 上海 201306

摘要: 为了探究培养隆线蚤(*Daphnia carinata*)的适宜饵料, 选用玉米粉、酵母、小球藻粉(*Chlorella* sp.)、裂壶藻粉(*Schizochytrium* sp.)、绿球藻(*Chlorococcum* sp.)和微绿球藻(*Nannochloropsis oculata*)6种饵料分别喂养隆线蚤, 并测定隆线蚤的生长繁殖参数、饵料营养成分及养殖水体水质和细菌含量等参数。结果显示, 投喂绿球藻组隆线蚤在培养各阶段均具有最高的成活率; 投喂小球藻粉、绿球藻和微绿球藻组隆线蚤首次产子代时间(4.0 d)显著快于其他各组; 投喂绿球藻组隆线蚤具有最大的繁殖量(375.2 ind); 投喂玉米粉组子代存活率显著低于其他其他组。投喂绿球藻组隆线蚤具有最大的净繁殖率 R_0 (293.3), 且显著高于其他组; 投喂小球藻粉组隆线蚤具有最短的平均世代时间 T (5.0 d), 且显著低于其他组; 投喂小球藻粉、绿球藻和微绿球藻组隆线蚤的内禀增长率 r_m 和周限增长率 λ 无显著差异($P>0.05$), 3组均显著高于其他组($P<0.05$)。对饵料营养成分与隆线蚤生长繁殖参数进行相关性热图分析显示, 饵料蛋白含量与隆线蚤首次产子代时间极显著负相关, 但与内禀增长率、周限增长率、净繁殖率和繁殖量显著正相关; 饵料碳水化合物含量与隆线蚤首次怀卵时间显著正相关; 饵料花生四烯酸(ARA, C20: 4n-6)含量与隆线蚤繁殖量、存活率、净繁殖率极显著或显著正相关, 饵料亚油酸(C18: 2n-6)含量与隆线蚤首次怀卵时间显著正相关, 与存活率显著负相关, 饵料油酸(18: 1)含量与隆线蚤存活率极显著负相关。结果表明, 饵料的蛋白含量及脂肪酸组成是影响饵料培养隆线蚤效果的关键因素, 6种饵料中绿球藻更适宜培养隆线蚤。

关键词: 隆线蚤; 饵料; 生长繁殖; 种群动态

中图分类号: S963

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2023)05-0643-12

生物饵料广泛应用于海水及淡水经济水产动物的种苗培育, 是多数品种种苗高效培育不可或缺的要害^[1-2]。然而, 由于卤虫卵市场价格的居高不下, 开发能替代卤虫无节幼体的其他生物饵料一直是产业热点之一。枝角类因其大小与卤虫无节幼体接近, 具有运动速度慢, 生长快, 繁殖能力强, 营养价值高, 易培养等特点, 成为水产动物苗种生产中替代卤虫无节幼体、节省育苗饵料成本的重要潜在选项。

饵料是影响枝角类生长繁殖和营养价值的重要因素之一。李治等^[3]探究了蛋白核小球藻

(*Chlorella pyrenoidosa*)、双对栅藻(*Scenedesmus bijugatus*)、四尾栅藻(*Scenedesmus quadricauda*)和沙角衣藻(*Chlamydomonas sajao*)4种不同饵料对透明蚤(*Daphnia hyaline*)的影响, 发现投喂双对栅藻的透明蚤寿命最高, 投喂蛋白核小球藻的蚤产前发育期最短, 投喂四尾栅藻的蚤产子代数最多。对大型蚤(*Daphnia magna*)^[4-7]、拟同形蚤(*Daphnia similoides*)^[8]、盔形蚤(*Daphnia galeata*)^[9]、蒙古裸腹蚤(*Moina mongolica*)^[10]、多刺裸腹蚤(*Moina macrocopa*)^[11]、发头裸腹蚤(*Moina irasa*)^[12]等枝角类的研究也均发现饵料种类对枝角类的生

收稿日期: 2023-02-27; 修订日期: 2023-03-19.

基金项目: 上海市农委科技兴农项目(201902-5), 上海市农委科技兴农项目(2021-02-08-00-12-F00761).

作者简介: 张亚(1996-), 女, 硕士, 研究方向为水产动物营养与饲料. E-mail: 18080761709@163.com

通信作者: 黄旭雄, 教授, 研究方向为水产动物营养与饲料. E-mail: xxhuang@shou.edu.cn

长、繁殖以及种群动态变化有着显著影响。

隆线蚤(*Daphnia carinata*)适应温度范围广,是一种春、夏、秋季池塘常见的滤食性淡水枝角类,体长约 1.5~3.8 mm,可作为鱼虾幼体优良的活饵料^[13]。有关饵料浓度对隆线蚤种群增长影响的研究已见报道^[14],但不同饵料对隆线蚤的影响鲜有报道。

本研究选择玉米粉(corn powder)、酵母(yeast)、小球藻粉(*Chlorella* sp.)、裂壶藻粉(*Schizochytrium* sp.)、绿球藻(*Chlorococcum* sp.)和微绿球藻(*Nannochloropsis oculata*)作为饵料培养隆线蚤,测定了饵料种类对隆线蚤生长繁殖及培

养水体水质的影响,以期为后续隆线蚤的室内水池大量培养提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

隆线蚤采自上海崇明岛,经分离纯化后在实验室建立培养系。玉米粉为玉米超微粉碎后过 300 目筛网制成,酵母、小球藻粉(冻干粉)、裂壶藻粉(冻干粉)均为商用料,绿球藻和微绿球藻来自上海海洋大学生物饵料培养室,6 种饵料在光学显微镜(Olympus BH2)下测量的形态学参数详见表 1。

表 1 6 种隆线蚤饵料的形态学参数
Tab. 1 The morphological parameters of six diets for *Daphnia carinata*

n=100; $\bar{x} \pm SD$

饵料 diet	形状 shape	直径/ μm diameter	体积/ μm^3 volume	饵料密度/ $(\times 10^4 \text{ particles/mL})$ diet density
玉米粉 corn powder	边缘不规则的近球形 subspherical with irregular edge	14.51 $\pm$ 4.12	1976.45 $\pm$ 1524.21	6 $\pm$ 1.29
酵母 yeast	球形 spherical	5.21 $\pm$ 0.78	79.00 $\pm$ 35.14	157 $\pm$ 6.27
小球藻粉 <i>Chlorella</i> sp.	球形 spherical	2.95 $\pm$ 0.57	15.00 $\pm$ 8.90	238 $\pm$ 8.81
裂壶藻粉 <i>Schizochytrium</i> sp.	球形 spherical	7.46 $\pm$ 1.25	235.29 $\pm$ 110.55	19 $\pm$ 2.38
绿球藻 <i>Chlorococcum</i> sp.	球形 spherical	3.38 $\pm$ 0.79	23.48 $\pm$ 15.21	301 $\pm$ 5.35
微绿球藻 <i>Nannochloropsis oculata</i>	球形 spherical	2.22 $\pm$ 0.38	6.22 $\pm$ 3.02	359 $\pm$ 6.13

1.2 实验设计

取源自同一母蚤繁殖的同世代同日龄幼蚤作为试验材料,将 6 种饵料预先配制成 50 mg DW/L 的饵料悬浊液置于试验恒温培养箱中等温,其中,活饵料绿球藻和微绿球藻分别用曝气自来水稀释离心藻泥至 3.01×10^6 和 3.59×10^6 particles/mL (绿球藻, 16.6 pg DW/cell; 微绿球藻, 13.9 pg DW/cell),最终各组水体饵料密度如表 1 所示。实验共设玉米粉、酵母、小球藻粉、裂壶藻粉、绿球藻、微绿球藻 6 个处理组。将 100 mL 各种饵料悬浊液分别装入 36 个小烧杯中,每组饵料设 6 个重复,在每个烧杯中分别放入 10 只试验幼蚤进行培养。实验在恒温光照培养箱中进行,温度 (30 $\pm$ 1) $^{\circ}\text{C}$,光强 40~60 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,光周期 L:D=12 h:12 h。试验期间每天定时完全更换 1 次培养液,每日统计蚤的存活情况,如发现幼蚤,

则及时从烧杯中移出并统计幼蚤数量。将各处理组的隆线蚤繁殖的第 1 胎、第 2 胎和第 3 胎分别取 20 ind 移到与亲本相同的条件下培养至子代生产,统计各处理组幼蚤发育到首次繁殖时的存活率。试验直至亲体全部死亡。

1.3 饵料营养成分测定

绿球藻(3000 r/min)和微绿球藻(10000 r/min)分别离心 10 min 后去上清,藻泥用蒸馏水溶解后,再次离心,取藻泥冷冻干燥 48 h 后捣碎成藻粉备用。分别称取各种粉状饵料 5~25 mg,移入 10 mL 离心管,加入 5 mL 蒸馏水,冰水浴超声波破碎 20 min 后,离心取上清用于测定饵料蛋白质和碳水化合物含量。蛋白质采用福林-酚蛋白法^[15]测定;碳水化合物采用苯酚-硫酸法^[16]测定。分别称取干燥后的饵料 100~200 mg,采用氯仿-甲醇法^[17]测定总脂,后用 BF_3 甲酯化法^[18]

测定饵料中的脂肪酸, 用 Agilent-7890A 型气相色谱仪联合 Agilent-5975C 质谱仪测定脂肪酸组成。根据 37 种脂肪酸甲酯混标(Sigma, 47885U)的分析图谱和保留时间, 对样品中脂肪酸进行定性, 采用峰面积归一化法确定各脂肪酸的相对百分含量。

1.4 水质测定

培养期间在更换培养液前后定期取培养液水样, 经 0.45 μm 醋酸纤维滤膜过滤后, 滤液 pH 用 pH 计测定; 用纳氏试剂法^[19]测定水样氨氮含量。取 10~100 μL 水样在无菌营养琼脂平板上涂布后, 将培养皿置于温度(30±1) °C 培养箱中培养 60 h, 计数平板上的菌落数。

1.5 计算方法

1.5.1 生长繁殖及种群动态参数 根据试验数据编写不同饵料投喂下隆线蚤的生命表^[20], 并计算其平均世代时间(T)、净繁殖率(R_0)、内禀增长率(r_m)和周限增长率(λ)。

存活率 = $\frac{\text{亲体存活数}}{\text{亲体总数}}$

净繁殖率 $R_0 = \sum_{x=0}^{\infty} I_x m_x$

平均世代时间 $T = \frac{\ln R_0}{r_m}$

内禀增长率 $\sum_{x=0}^{\infty} e^{-r_m \cdot x} I_x m_x = 1$

周限增长率 $\lambda = e^{r_m}$

式中, x 为隆线蚤的日龄数, I_x 为 x 日龄隆线蚤的存活率, m_x 为 x 日龄隆线蚤平均每个体产子代数

1.5.2 非离子氨转化^[21]

$$\text{NH}_3\text{-N} = \frac{\text{NH}_3 + \text{NH}_4^+}{1 + 10(\text{pK}_a - \text{pH})}$$

式中, $\text{pK}_a = 0.09018 + 2729.92/T$, $T = 273 + t$, 其中 pK_a 为水体解离平衡常数, T 为水体温度开氏度, t 为水体温度摄氏度。

1.6 数据处理

实验结果用平均值±标准差($\bar{x} \pm \text{SD}$)表示, 采用 SPSS 25.0 进行单因素方差分析(One-way ANOVA), 并采用 Duncan 氏进行多重比较检验。采用 R 语言(version 3.6.3)进行相关性分析。 $P < 0.05$ 表示存在显著性差异, $P < 0.01$ 表示存在极显著性差异。

2 结果与分析

2.1 投喂不同饵料对隆线蚤存活率的影响

在相同的投喂量下, 不同饵料显著影响隆线蚤的存活率(图 1)。培养第 5 天时, 小球藻粉组隆

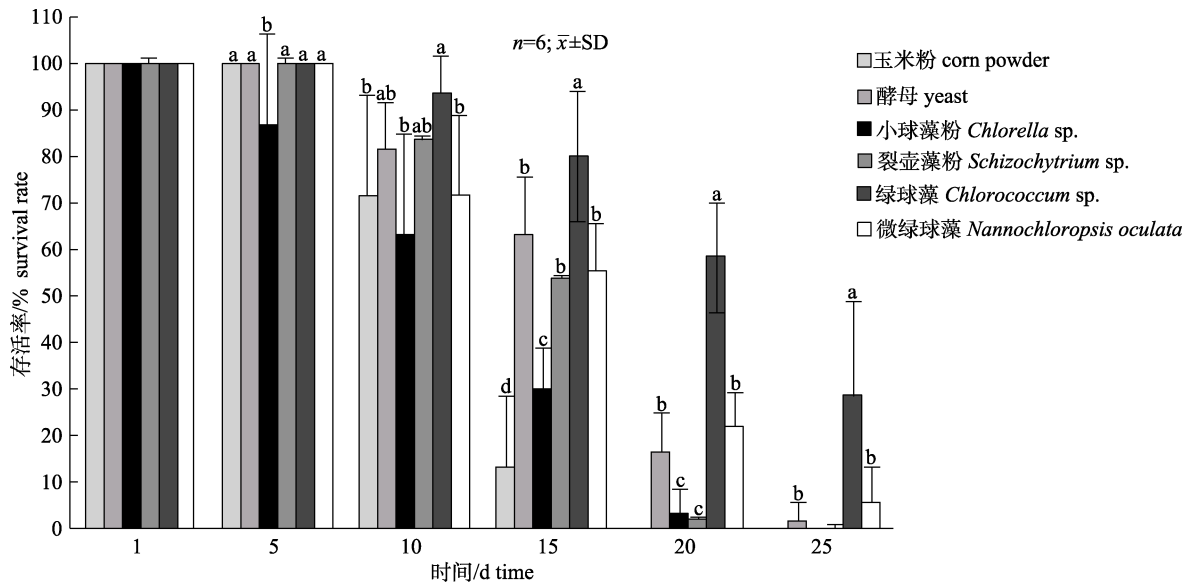


图 1 不同饵料对隆线蚤存活率的影响

同一时间点不同饵料处理组上标有不同字母表示组间差异显著($P < 0.05$)。

Fig. 1 The survival rate of *Daphnia carinata* fed different diets

Different letters on the column indicate significant differences among different diet treatments at the same time ($P < 0.05$).

线蚤存活率显著低于其余各组($P<0.05$), 其余各组的存活率均为 100%。培养第 10 天时, 各组隆线蚤存活率都出现了不同程度的下降, 绿球藻组存活率和酵母组及裂壶藻粉组无差异显著, 但显著高于玉米粉组、小球藻粉组和微绿球藻组($P<0.05$)。培养第 15 天时, 绿球藻组隆线蚤的存活率最高(80.0%), 显著高于其余各组($P<0.05$), 玉米粉组存活率最低(13.3%), 显著低于其余各组($P<0.05$)。实验第 20 天时, 绿球藻组隆线蚤的存活率(58.3%)显著高于其余各组($P<0.05$), 酵母组存活率(16.7%)和微绿球藻组存活率(21.7%)显著高于小球藻粉组存活率(3.3%)和裂壶藻粉组存活率(1.7%)($P<0.05$), 玉米粉组隆线蚤已全部死亡; 试验第 25 天时, 绿球藻组隆线蚤的存活率(28.3%)显著高于酵母组(1.7%)和微绿球藻组(5.0%)($P<0.05$), 小球藻粉组和裂壶藻粉组隆线蚤全部死亡。

2.2 投喂不同饵料对隆线蚤繁殖的影响

由表 2 可知, 各饵料组隆线蚤首次怀卵时间均为 3.0 d, 组间无显著差异($P>0.05$); 小球藻粉组、绿球藻组和微绿球藻组隆线蚤首次产子代时间最短, 均为 4.0 d, 显著快于其他各组($P<0.05$), 裂壶藻粉组首次产子代时间最长, 显著慢于其他各组($P<0.05$); 每只雌蚤平均产子代数在绿球藻组(375.2 ind)与微绿球藻组(359.1 ind)之间无显著差异, 两者均显著高于其他组($P<0.05$), 裂壶藻粉组每只雌蚤平均产子代总数最低, 仅 25.8 ind, 与玉米粉组(30.3 ind)无显著差异, 但显著低于小

球藻粉组和酵母组($P<0.05$); 玉米粉组蚤子代存活率最低, 显著低于其他组($P<0.05$), 绿球藻组蚤子代存活率最高, 达 100%。

2.3 投喂不同饵料对隆线蚤种群动态的影响

根据图 1 和表 2 的结果, 统计各组饵料投喂的隆线蚤种群动态见表 3。饵料显著影响隆线蚤的种群动态。绿球藻组净增殖率 R_0 最高, 为 293.3, 其次为微绿球藻组(213.6), 均显著高于其他组($P<0.05$), 酵母组和小球藻粉组组间 R_0 差异不显著, 裂壶藻粉组 R_0 (13.7) 显著低于其他组($P<0.05$)。小球藻粉组隆线蚤平均世代时间 T 最短(5.0 d), 显著低于其他各组($P<0.05$); 其次为绿球藻组和微绿球藻组, 裂壶藻粉组隆线蚤平均世代时间 T 最长(14.0 d), 显著高于其他组($P<0.05$)。隆线蚤种群内禀增长率 r_m 和周限增长率 λ 在小球藻粉组、绿球藻组和微绿球藻组之间均无显著差异, 且均显著高于其他各组种群内禀增长率 r_m 和周限增长率 λ ($P<0.05$), 裂壶藻组隆线蚤种群内禀增长率 r_m 和周限增长率 λ 均最低。

2.4 6 种饵料的营养成分分析

对投喂隆线蚤的 6 种饵料的概略营养成分分析表明, 各种饵料的蛋白质、脂肪和碳水化合物含量均存在显著差异(表 4)。6 种饵料中, 蛋白质含量最高的为小球藻粉(41.3%), 最低的为玉米粉(6.1%); 脂肪含量最高的为裂壶藻粉(42.0%), 最低的为酵母(3.1%); 碳水化合物含量最高为玉米粉(63.2%), 最低为小球藻粉(14.9%)。

表 2 摄食不同饵料的隆线蚤的繁殖性能
Tab. 2 Reproduction characteristics of *Daphnia carinata* fed different diets

n=6; $\bar{x} \pm SD$

项目 item	玉米粉 corn powder	酵母 yeast	小球藻粉 <i>Chlorella</i> sp.	裂壶藻粉 <i>Schizochytrium</i> sp.	绿球藻 <i>Chlorococcum</i> sp.	微绿球藻 <i>Nannochloropsis oculata</i>
首次怀卵时间/d time for first maturity	3.0±0.0	3.0±0.0	3.0±0.0	3.0±0.0	3.0±0.0	3.0±0.0
首次产子代时间/d time for first offspring	5.0±0.8 ^c	7.5±0.6 ^b	4.0±0.0 ^d	11.7±1.8 ^a	4.0±0.0 ^d	4.0±0.0 ^d
每只雌蚤繁殖量/ind offspring number per female	30.3±7.6 ^c	89.8±27.3 ^b	97.0±21.2 ^b	25.8±10.2 ^c	375.2±21.2 ^a	359.1±37.5 ^a
子代存活率/% survival on offspring	78.3±5.8 ^b	98.3±2.9 ^a	86.7±2.9 ^{ab}	85.0±17.3 ^{ab}	100.0±0.0 ^a	98.3±2.9 ^a

注: 表中同一行字母上标不同表示组间差异显著($P<0.05$).
Note: The different letter superscripts on the same line indicate significant differences among different diet treatments ($P<0.05$).

表 3 不同饵料下隆线蚤的种群动态参数

Tab. 3 Population dynamic parameters of *Daphnia carinata* fed different diets

n=6; $\bar{x} \pm SD$						
项目 item	玉米粉 corn powder	酵母 yeast	小球藻粉 <i>Chlorella</i> sp.	裂壶藻粉 <i>Schizochytrium</i> sp.	绿球藻 <i>Chlorococcum</i> sp.	微绿球藻 <i>Nannochloropsis oculata</i>
净繁殖率 R_0 net reproductive rate	19.7±6.1 ^d	50.8±6.8 ^c	68.4±19.1 ^c	13.7±4.1 ^d	293.3±37.0 ^a	213.6±26.8 ^b
平均世代时间 T mean generation time	8.6±0.8 ^c	11.2±0.5 ^b	5.0±0.2 ^c	14.0±0.8 ^a	6.6±0.2 ^d	6.2±0.3 ^d
内禀增长率 r_m intrinsic growth rate	0.3±0.1 ^b	0.4±0.0 ^b	0.9±0.1 ^a	0.2±0.0 ^c	0.9±0.0 ^a	0.9±0.0 ^a
周限增长率 λ finite growth rate	1.4±0.1 ^b	1.4±0.0 ^b	2.3±0.2 ^a	1.2±0.0 ^c	2.4±0.0 ^a	2.4±0.1 ^a

注: 表中同一行字母上标不同表示组间差异显著($P<0.05$).

Note: Different letter superscripts on the same line indicate significant differences among different diet treatments ($P<0.05$).

表 4 6 种隆线蚤饵料的营养成分

Tab. 4 Proximate composition of six diets for *Daphnia carinata*

n=3; $\bar{x} \pm SD$; %						
项目 item	玉米粉 corn powder	酵母 yeast	小球藻粉 <i>Chlorella</i> sp.	裂壶藻粉 <i>Schizochytrium</i> sp.	绿球藻 <i>Chlorococcum</i> sp.	微绿球藻 <i>Nannochloropsis oculata</i>
蛋白质含量 protein content	6.1±0.3 ^c	26.8±0.7 ^b	41.3±2.5 ^a	9.6±0.2 ^d	24.4±0.3 ^c	24.1±1.0 ^c
总脂肪含量 total lipid content	6.7±0.7 ^c	3.1±0.2 ^f	11.0±0.3 ^d	42.0±1.4 ^a	18.5±0.7 ^b	16.6±0.1 ⁰ ^c
碳水化合物含量 carbohydrate content	63.2±4.2 ^a	37.0±3.1 ^c	14.9±2.1 ^f	21.1±0.7 ^e	42.1±1.4 ^b	28.6±1.0 ^d

注: 表中同一行字母上标不同表示组间差异显著($P<0.05$).

Note: The different letter superscripts on the same line indicate significant differences among different diet treatments ($P<0.05$).

6 种饵料的脂肪酸组成存在显著差异(表 5)。玉米粉中富含亚油酸(C18 : 2n-6, 50.2%), 其次为油酸(C18 : 1, 35.1%); 酵母中含量最高的脂肪酸为 C16 : 0 (34.8%), 其次为 C18 : 0 (24.3%); 小球藻粉中含量最高的脂肪酸为亚油酸(43.1%), 其次为 C16 : 0 (20.3%); 裂壶藻粉富含 DHA (C22 : 6n3, 78.3%), 其次为 C16 : 0 (16.7%); 绿球藻含量最高的脂肪酸为亚麻酸(C18 : 3n3, 32.9%), 其次为亚油酸(26.0%); 微绿球藻富含 EPA (C20 : 5n-3, 49.6%)。总体上, 酵母富含饱和脂肪酸(60.0%), 显著高于其他饵料($P<0.05$); 其他饵料中富含多不饱和脂肪酸。

表 5 6 种隆线蚤饵料的脂肪酸组成

Tab. 5 Fatty acids compositions of six diets for *Daphnia carinata*

n=3; $\bar{x} \pm SD$; %						
脂肪酸 fatty acid	玉米粉 corn powder	酵母 yeast	小球藻粉 <i>Chlorella</i> sp.	裂壶藻粉 <i>Schizochytrium</i> sp.	绿球藻 <i>Chlorococcum</i> sp.	微绿球藻 <i>Nannochloropsis oculata</i>
C14 : 0	0.1±0.0 ^c	0.3±0.0 ^d	0.6±0.1 ^c	0.7±0.0 ^b	0.4±0.1 ^c	1.7±0.1 ^a
C15 : 0	ND	ND	0.3±0.1 ^a	0.2±0.0 ^b	0.3±0.1 ^a	ND
C16 : 0	10.8±0.2 ^c	34.8±1.0 ^a	20.3±0.2 ^b	16.7±0.0 ^c	15.4±0.1 ^d	10.6±0.0 ^c
C17 : 0	0.1±0.0 ^d	0.3±0.0 ^b	0.3±0.0 ^b	0.1±0.0 ^c	0.4±0.0 ^a	ND
C18 : 0	1.7±0.1 ^c	24.3±0.4 ^a	1.3±0.2 ^d	0.9±0.0 ^c	3.5±0.1 ^b	0.3±0.0 ^f
C20 : 0	0.4±0.0 ^{ab}	0.4±0.1 ^a	ND	0.3±0.0 ^b	0.1±0.0 ^c	ND
C22 : 0	ND	ND	ND	0.2±0.0 ^a	ND	ND

(待续 to be continued)

(续表 5 Tab. 1 continued)

脂肪酸 fatty acid	玉米粉 corn powder	酵母 yeast	小球藻粉 <i>Chlorella</i> sp.	裂壶藻粉 <i>Schizochytrium</i> sp.	绿球藻 <i>Chlorococcum</i> sp.	微绿球藻 <i>Nannochloropsis oculata</i>
C14 : 1n5	ND	ND	ND	0.3±0.0 ^a	ND	ND
C16 : 1	0.3±0.0 ^d	15.2±0.3 ^b	3.3±0.1 ^c	0.2±0.0 ^d	3.2±0.0 ^c	19.3±0.0 ^a
C17 : 1n7	ND	ND	0.5±0.0 ^a	ND	0.4±0.1 ^b	0.4±0.0 ^b
C18 : 1	35.1±0.1 ^a	21.1±0.4 ^b	8.0±0.0 ^c	0.7±0.0 ^f	4.3±0.1 ^e	5.3±0.0 ^d
C20 : 1n9	0.2±0.1	ND	ND	ND	ND	ND
C16 : 2n6	ND	ND	11.2±0.1 ^a	ND	ND	0.2±0.0 ^b
C16 : 3n3	ND	ND	11.1±0.1 ^b	ND	12.6±0.1 ^a	ND
C18 : 2n6	50.2±0.2 ^a	3.6±0.4 ^d	43.1±0.1 ^b	0.1±0.0 ^f	26.0±0.1 ^c	2.7±0.0 ^c
C18 : 3n3	1.2±0.0 ^b	ND	ND	0.3±0.0 ^d	32.9±0.1 ^a	0.4±0.0 ^c
C20 : 3n6	ND	ND	ND	0.3±0.0	ND	ND
C20 : 4n6(ARA)	ND	ND	ND	0.2±0.0 ^c	0.5±0.0 ^b	9.4±0.0 ^a
C20 : 5n3 (EPA)	ND	ND	ND	0.6±0.0 ^b	ND	49.6±0.2 ^a
C22 : 6n3 (DHA)	ND	ND	ND	78.3±0.1	ND	ND
Σ SFA	13.1±0.4 ^c	60.0±1.5 ^a	22.8±0.5 ^b	19.2±0.1 ^d	20.1±0.4 ^c	12.6±0.1 ^c
Σ MUFA	35.6±0.2 ^a	36.7±0.7 ^a	11.8±0.2 ^c	1.3±0.0 ^c	8.0±0.2 ^d	25.0±0.1 ^b
n-3 PUFA	1.2±0.0 ^c	0.0±0.0 ^f	11.1±0.1 ^d	79.1±0.1 ^a	45.5±0.2 ^c	50.1±0.2 ^b
n-6 PUFA	50.2±0.3 ^b	3.6±0.4 ^c	54.3±0.2 ^a	0.6±0.0 ^f	26.5±0.1 ^c	12.1±0.1 ^d

注: ND 为未检测到该种脂肪酸。表中同一行字母上标不同表示组间差异显著($P<0.05$)。
Note: ND means that the fatty acid has not been detected. The different letter superscripts on the same line indicate significant differences among different diets ($P<0.05$).

2.5 投喂不同饵料对隆线溞培育水体水质及细菌数量的影响

投喂不同饵料后隆线溞培养液中 pH、NH₃-N 含量和细菌数量如表 6 所示。投喂玉米粉、酵母、小球藻粉和裂壶藻粉组在更换培养液后水体的 pH 略有上升,而投喂绿球藻和微绿球藻组在更换培养液后水体的 pH 略有降低。每日更换培养液

前后各组 NH₃-N 含量均保持低位,投喂小球藻粉和酵母组在更换培养液后水体 NH₃-N 含量略有降低,投喂其余饵料组在更换培养液后水体 NH₃-N 含量略有升高($P<0.05$)。所有饵料组的培养液中细菌数量均在更换培养液后降低,其中以小球藻粉和裂壶藻粉组在更换培养液前细菌数量最高。

表 6 投喂不同饵料的隆线溞养殖水体水质变化
Tab. 6 The changes of pH, amonia and bacterium count in culture medium when the *Daphnia carinata* fed different diets
 $n=3$; $\bar{x} \pm SD$

水质参数 parameter		玉米粉 corn powder	酵母 yeast	小球藻粉 <i>Chlorella</i> sp.	裂壶藻粉 <i>Schizochytrium</i> sp.	绿球藻 <i>Chlorococcum</i> sp.	微绿球藻 <i>Nannochloropsis oculata</i>
酸碱度 pH	AD	8.07±0.06 ^{ab}	8.03±0.06 ^{bc}	8.10±0.00 ^a	8.10±0.00 ^a	8.00±0.00 ^c	8.00±0.00 ^c
	BD	7.97±0.06 ^b	7.90±0.00 ^c	8.00±0.00 ^b	7.90±0.00 ^c	8.10±0.00 ^a	8.10±0.00 ^a
氨氮/(mg/L)NH ₃ -N	AD	0.04±0.00 ^b	0.02±0.00 ^d	0.05±0.00 ^a	0.03±0.00 ^c	0.01±0.00 ^c	0.01±0.00 ^c
	BD	0.00±0.00 ^d	0.03±0.00 ^b	0.08±0.00 ^a	0.00±0.00 ^c	0.00±0.00 ^c	0.00±0.00 ^d
细菌数/(×10 ⁴ CFU/mL) bacterium count	AD	5.00±0.77 ^b	2.24±0.19 ^d	3.20±0.41 ^c	5.13±0.64 ^b	6.13±0.15 ^a	4.90±0.18 ^b
	BD	10.26±0.47 ^c	7.08±0.32 ^d	30.60±0.64 ^a	25.18±1.07 ^b	10.75±0.59 ^c	10.75±1.46 ^c

注: AD 为培养液更换后测定值, BD 为培养液更换前测定值。表中同一行字母上标不同表示组间差异显著($P<0.05$)。
Note: AD means the detected values after culture medium exchange, BD means the detected values before culture medium exchange. The different letter superscripts on the same line indicate significant differences among different diet treatments ($P<0.05$).

2.6 饵料营养与隆线蚤生长繁殖性能和种群动态相关性分析

饵料营养和隆线蚤的生长繁殖性能及种群动态的相关性分析热图显示,隆线蚤亲体的存活率与饵料ARA含量呈显著正相关,但与饵料亚油酸和n-6 PUFA含量呈显著负相关,与饵料油酸含量呈极显著负相关;平均世代周期和饵料n-6 PUFA含量呈极显著负相关;首次产子代时间和饵料蛋

白质含量呈极显著负相关;首次怀卵时间与饵料亚麻酸、碳水化合物和亚油酸的含量均呈显著正相关;内禀增长率和周限增长率与饵料n-6 PUFA和蛋白质的含量呈显著正相关;子代存活率与饵料的ARA含量呈显著正相关;净繁殖率与饵料中ARA和蛋白质含量均呈显著正相关;每只雌蚤产子代总数与饵料的蛋白质含量呈显著正相关,与饵料ARA含量呈极显著正相关(图2)。

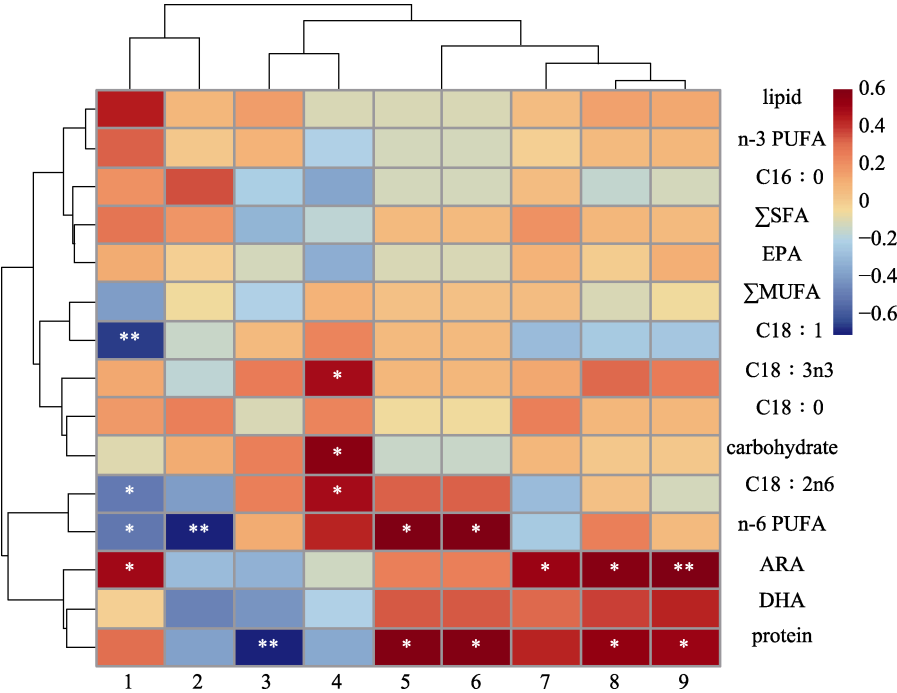


图2 饵料营养参数与隆线蚤生长繁殖和种群动态相关性热图

1. 存活率; 2. 平均世代周期; 3. 首次产子代时间; 4. 首次怀卵时间; 5. 内禀增长率; 6. 周限增长率; 7. 子代存活率; 8. 净繁殖率; 9. 每只雌蚤产子代总数. *为 $P<0.05$, 表示显著相关; **为 $P<0.01$, 表示极显著相关.

Fig. 2 Correlation heatmap between diet nutrition parameters and growth, reproduction and population dynamic of *Daphnia carinata*

1. survival rate, 2. mean generation time, 3. time for first offspring, 4. time of first maturity, 5. intrinsic growth rate, 6. finite growth rate, 7. survival on offspring, 8. net reproductive rate, 9. offspring number per female. * means significant correlations ($P<0.05$). ** means very significant correlations ($P<0.01$).

3 讨论

饵料不仅供给枝角类生长、发育、繁殖等新陈代谢所需的营养素,还影响养殖环境水质,因此是影响枝角类种群动态变化的重要因子。有关投饵量对培养隆线蚤的研究已见报道^[14]。本研究中,在维持各饵料组日投喂量一致(50 mg DW/L)的情况下,比较了6种不同饵料对隆线蚤生长繁殖性能的影响。

饵料的形态大小及可获得性是影响枝角类生长繁殖的重要因素^[3]。Burns^[22]对枝角类的研究表明,滤食性枝角类对食物大小有选择性,通常仅能滤食小于40 μm的食物。在本研究中6种试验饵料均能被隆线蚤滤食,但6种饵料投喂后在水体中的稳定性存在差异;绿球藻和微绿球藻为活饵料,在水体中悬浮性较好;而其他4种均为非活性饵料,投喂后可观察到不同程度的凝聚和下

沉,其中裂壶藻粉尤为明显。饵料的凝聚和下沉在一定程度上降低隆线蚤的有效摄食,甚至可能造成其滤食系统堵塞^[23],致使隆线蚤获取能量减少,影响自身的存活和繁殖,这可能是造成裂壶藻粉组新生子代存活率低于其他组的原因。

养殖水体水质影响隆线蚤的生长繁殖和种群动态。翁显龙等^[24]研究认为适宜隆线蚤生长繁殖的 pH 为 7~8,符芳菲等^[14]研究认为适宜隆线蚤种群增长的 pH 为 8.0~8.2,本研究的 pH 变化范围为 7.9~8.1,适宜培养隆线蚤。非离子氨侵入机体组织后,会造成组织缺氧,甚至死亡,对水生动物有严重的毒害作用^[25]。研究显示 7 d 龄内拟同形蚤的非离子氨 24 h 半致死浓度最低为 1.3 mg/L^[26],而经驯化的蒙古裸腹蚤非离子氨 24 h 半致死浓度由 6.95 mg/L 升至 9.47 mg/L^[27],可见枝角类对非离子氨具有一定的调控适应能力。在本研究中,每 24 h 换水量接近 100%,养殖期间各组水质均保持在适宜范围内,但不同饵料对养殖水体水质产生的影响不同。在投喂 4 种非活性饵料组中,水体 pH 换水后随时间延长略有下降,这可能是由于隆线蚤及细菌等水体生物呼吸作用产生 CO₂ 在水中积累引起;在投喂绿球藻和微绿球藻两种活饵料组中,水体 pH 在换水后随时间延长略有上升,这可能是由于活体微藻经光合作用吸收水体中 CO₂ 造成^[28]。在投喂酵母和小球藻粉组中,水体中非离子氨含量在换水后随时间延长增加,这可能与酵母和小球藻粉中蛋白质含量较高且其细胞蛋白入水后易溶解溃散有关。Lyu 等^[29]研究报告,当非离子氨浓度为 0.06 mg/L 时,10%的短钝蚤繁殖能力受到影响。在本研究中,酵母组和小球藻粉组隆线蚤亲体产子代数及子代存活率均低于绿球藻组和微绿球藻组。在各组更换培养液前水质分析中显示,酵母组和小球藻粉组水体中非离子氨浓度分别升至 0.03 和 0.08 mg/L,且显著高于绿球藻组和微绿球藻组,可能导致在酵母组和小球藻粉组中隆线蚤机体触发抵御非离子氨的侵害作用相关的防御机制,增加能量消耗^[30-31],从而减少机体生长繁殖代谢供能,降低其生长繁殖性能。在饵料投喂后,各组水体中细菌含量显

著增加,其中小球藻粉组和裂壶藻粉组的细菌含量增加最为显著。有研究报道,饲喂盍形蚤的饵料中假单胞菌占比达 80%时,其亲本失去繁殖能力^[32]。因此,造成投喂小球藻粉和裂壶藻粉的隆线蚤繁殖性能显著低于绿球藻和微绿球藻组,还可能与养殖水体中大量的细菌滋生有关。

个体的存活率和繁殖量是影响种群变化的核心参数。枝角类的存活率主要受外部环境的影响,适宜的外部环境有利于提升个体存活率^[4,7,10,27,32]。而枝角类的生殖量则受到内外因共同影响,种类及龄期是影响其生殖量的主要内因^[33-34];温度、食物、种群密度及溶氧量等是常见的外因^[35],其中食物是重要的影响因子^[13]。在本研究中,各饵料组的投喂量一致,但各饵料的营养组成存在明显的差异,这表明饵料的营养组成可能会影响隆线蚤的生长繁殖及种群动态。蛋白质是机体生命活动的主要承担者,参与体内的催化反应、免疫反应,在细胞信号转导、细胞黏附及细胞周期中具有重要功能,维持了机体生长、更新和修复过程^[36-37],通过饵料获取充足的蛋白质是保证甲壳动物生长、发育与繁殖的必要条件^[38-39]。在饵料营养组成与隆线蚤生长繁殖参数相关性热图(图 2)中显示,隆线蚤首次产子时间与饵料蛋白含量呈极显著负相关,但内禀增长率、周限增长率、净繁殖率和繁殖量与饵料蛋白含量呈显著正相关。在本研究中,玉米粉和裂壶藻粉蛋白质含量最低,可能不能满足隆线蚤对蛋白质的营养需求,造成二者饲喂的隆线蚤生殖量小、种群增长缓慢。

脂质是机体的重要组成成分,结构及化学特性多样化,在机体中多被分解为游离脂肪酸和部分甘油酯而吸收^[37],具有储存能量、构成细胞膜等功能^[40],因此饵料中脂质的含量对甲壳动物的存活^[41]、生长^[42]、繁殖^[43]具有重要影响。隆线蚤几乎不能从头合成脂质,因此饵料中的脂质是其主要来源^[44]。在本研究中,热图分析显示隆线蚤内禀增长率、生殖量和存活率与饵料中 DHA、EPA 和亚麻酸等 n-3 系列多不饱和脂肪酸含量之间存在正相关,但相关性不显著。目前关于隆线蚤的脂肪酸需求量报道较少,但是已有的研究显示

EPA 和 DHA 对枝角类的生长繁殖有重要作用, 可提高蚤状蚤的体生长率和产子代数^[45], 且 EPA 对枝角类种群增长有促进作用^[46]。微绿球藻的 EPA 含量远高于绿球藻, 但投喂两种微藻的隆线蚤生殖量及种群增长却没有显著差异, 这可能是由于绿球藻含有更高的亚麻酸, 隆线蚤可将其合成 EPA^[47], 从而保证隆线蚤对 EPA 的需求, 维持隆线蚤良好的生长繁殖性能。然而, 尽管裂壶藻粉 DHA 含量很高, 但是隆线蚤的生长繁殖能力显著差于其他组, 导致这一结果可能与 DHA 在裂壶藻的营养物质组成中占比例较大, 而在投喂后到隆线蚤摄食于体内的过程中被氧化变质致其营养价值降低有关。本研究中隆线蚤的存活率与饵料中亚油酸(18:2n-6)含量和 n-6 系列多不饱和脂肪酸含量之间存在显著负相关。推测这可能与饵料中 n-3 PUFA 与 n-6 PUFA 存在竞争酶系统有关, n-3 PUFA 与 n-6 PUFA 不能相互转化且相互竞争^[48-49], 摄入过高的 n-6 PUFA 可能抑制了 n-3 PUFA 的代谢, 从而导致成活率下降。但隆线蚤存活率与饵料 ARA(20:4n-6)含量呈显著正相关, 这可能与 ARA 具有增强抗应激胁迫的能力有关, 在凡纳滨对虾^[50]、黑鲷^[51]等其他水生动物研究中发现, ARA 能够增强其抗应激能力, 从而提升其存活率。此外, 隆线蚤存活率与饵料油酸(18:1)含量极显著负相关(图 2), 其原因仍有待于进一步探究。

4 结论

综上所述, 本研究用于投喂隆线蚤的 6 种饵料, 因其营养组成、投喂后在水体中的形态及可获得性以及投喂后对水体水质及细菌数量的影响而表现出不同的培养效果。饵料的蛋白质含量及脂肪酸的组成是影响饵料培养隆线蚤效果的重要因素, 6 种饵料中绿球藻是培养隆线蚤最好的饵料。

参考文献:

[1] Das P, Mandal S C, Bhagabati S K, et al. Important live food organisms and their role in aquaculture[J]. *Frontiers in aquaculture*, 2012, 5(4): 69-86.

[2] Kandathil Radhakrishnan D, AkbarAli I, Schmidt B V, et al. Improvement of nutritional quality of live feed for aquaculture: An overview[J]. *Aquaculture Research*, 2020,

51(1): 1-17.

- [3] Li Z, Chuai J, Zhang Q J, et al. Effects of microalgal species and density on reproduction and population dynamics of water fleas *Daphnia hyaline*[J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2019, 34(4): 531-537. [李治, 揣洁, 张清靖, 等. 饵料种类及密度对透明蚤繁殖和种群动态的影响[J]. 大连海洋大学学报, 2019, 34(4): 531-537.]
- [4] Shi W, Liu Q G, Wu J, et al. Effects of different algae on the survival and reproduction of *Daphnia magna*[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, 28(6): 1128-1133. [史文, 刘其根, 吴晶, 等. 不同藻类对大型蚤存活和生殖的影响[J]. 生态学杂志, 2009, 28(6): 1128-1133.]
- [5] Wang L J, Cheng Y X, Wu X G, et al. Effects of *Microcystis viridis* and other different feeding conditions on growth and lipid composition of *Daphnia magna*[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2006, 30(6): 843-847. [王丽娟, 成永旭, 吴旭干, 等. 绿色微囊藻等不同食物对大型蚤生长和脂类成分的影响[J]. 水产学报, 2006, 30(6): 843-847.]
- [6] Choi J Y, Kim S K, Chang K H, et al. Population growth of the Cladoceran, *Daphnia magna*: A quantitative analysis of the effects of different algal food[J]. *PLoS One*, 2014, 9(4): e95591.
- [7] Martínez-Jerónimo F, Villaseñor R, Rios G, et al. Effect of food type and concentration on the survival, longevity, and reproduction of *Daphnia magna*[J]. *Hydrobiologia*, 1994, 287(2): 207-214.
- [8] Huang H T, Lei L M, Peng L, et al. Effect of *Microcystis aeruginosa* and *Cylindrospermopsis raciborskii* on the growth and reproduction of *Daphnia similoides* (large sub-tropical cladoceran)[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2015, 21(2): 366-371. [黄海塘, 雷腊梅, 彭亮, 等. 微囊藻和拟柱孢藻对亚热带大型枝角类拟同形蚤(*Daphnia similoides*)生长与繁殖的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2015, 21(2): 366-371.]
- [9] Repka S. Effects of food type on the life history of *Daphnia* clones from lakes differing in trophic state. I. *Daphnia galeata* feeding on *Scenedesmus* and *Oscillatoria*[J]. *Freshwater Biology*, 1997, 38(3): 675-683.
- [10] Qian J, Li H W, Yang Z L, et al. Effects of different algae on survival and reproduction of *Daphnia mongolica*[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2016, 44(7): 477-480. [钱军, 李洪武, 杨子兰, 等. 不同藻类对蒙古裸腹蚤存活和生殖的影响[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(7): 477-480.]
- [11] Alva-Martínez A F, Sarma S S S, Nandini S. Effect of mixed diets (cyanobacteria and green algae) on the population growth of the cladocerans *Ceriodaphnia dubia* and *Moina macrocopa*[J]. *Aquatic Ecology*, 2007, 41(4): 579-585.

- [12] Lu Z H, Yang J X, Wang X. Effects of food types and temperature on the population dynamics of *Oenanthe flagelliforme*[J]. Freshwater Fisheries, 2002, 32(3): 38-39. [陆正和, 杨家新, 王笑. 食物种类及温度对发头裸腹蚤种群动态的影响[J]. 淡水渔业, 2002, 32(3): 38-39.]
- [13] Shi X B. *Daphnia carinata* and its culture[J]. Bulletin of Biology, 2000, 35(4): 14-17. [史新柏. 隆线蚤及其培养[J]. 生物学通报, 2000, 35(4): 14-17.]
- [14] Fu F F, Xu S L, Yuan Z, et al. Effect of feeding microparticle laver powder on population growth of *Daphnia carinata*[J]. Journal of Biology, 2014, 31(2): 5-8. [符芳菲, 徐善良, 袁舟, 等. 微颗粒紫菜粉投喂量对隆线蚤(*Daphnia carinata*)种群增长的影响[J]. 生物学杂志, 2014, 31(2): 5-8.]
- [15] Lowry O, Rosebrough N, Farr A L, et al. Protein measurement with the folin phenol reagent[J]. Journal of Biological Chemistry, 1951, 193(1): 265-275.
- [16] DuBois M, Gilles K A, Hamilton J K, et al. Colorimetric method for determination of sugars and related substances[J]. Analytical Chemistry, 1956, 28(3): 350-356.
- [17] Pruvost J, Van Vooren G, Le Gouic B, et al. Systematic investigation of biomass and lipid productivity by microalgae in photobioreactors for biodiesel application[J]. Bioresource Technology, 2011, 102(1): 150-158.
- [18] Wen W, Huang X X, Chen Q K, et al. Temperature effects on early development and biochemical dynamics of a marine fish, *Inimicus japonicus*[J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2013, 442: 22-29.
- [19] Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. Water quality-Determination of ammonia nitrogen-Nessler's reagent spectrophotometry: HJ 535—2009[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2010. [环境保护部. 水质 氨氮的测定 纳氏试剂分光光度法: HJ 535—2009[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2010.]
- [20] Lin C S. The theoretical and laboratory studies of animal population dynamics ii. a study of innate capacity for increase (r_m) of *Tribolium confusum* (H.) under certain experimental conditions[J]. Acta Zoologica Sinica, 1964, 10(3): 323-338. [林昌善. 动物种群数量变动的理论与试验研究 II. 杂拟谷盗 *Tribolium confusum*(H.)的内禀增长能力 (r_m)的研究[J]. 动物学报, 1964, 10(3): 323-338.]
- [21] Emerson K, Russo R C, Lund R E, et al. Aqueous ammonia equilibrium calculations: Effect of pH and temperature[J]. Journal of the Fisheries Research Board of Canada, 1975, 32(12): 2379-2383.
- [22] Burns C W. The relationship between body size of filter-feeding Cladocera and the maximum size of particle ingested[J]. Limnology and Oceanography, 1968, 13(4): 675-678.
- [23] Porter K G, Gerritsen J, Orcutt J D Jr. The effect of food concentration on swimming patterns, feeding behavior, ingestion, assimilation, and respiration by *Daphnia*[J]. Limnology and Oceanography, 1982, 27(5): 935-949.
- [24] Weng X L, Zuo D, Li J Y, et al. Effects of temperature and pH on the population dynamics parameters of *Daphnia carinata*[J]. Chinese Journal of Zoology, 2011, 46(1): 1-6. [翁显龙, 左迪, 李嘉尧, 等. 温度及 pH 对隆线蚤生长和生殖的影响[J]. 动物学杂志, 2011, 46(1): 1-6.]
- [25] Dong Y B, Jia J, Liu Y, et al. General situation of research on toxicity of ammonia nitrogen to aquatic animals[J]. Hebei Fisheries, 2010(6): 42-45. [董玉波, 贾甲, 刘尧, 等. 氨态氮对水产动物毒性的研究概况[J]. 河北渔业, 2010(6): 42-45.]
- [26] Xiang F H, Yang W, Chen Y F, et al. Acute toxicity of nitrite and ammonia to *Daphnia similoides* of different developmental stages: Using the modified Gaussian model to describe[J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2010, 84(6): 708-711.
- [27] Wei J, Zhao W, Li D H. Effects of temperature, salinity and $\text{NH}_3\text{-N}$ on survival, reproduction and population growth of *Moina mongolica* acclimatized for different periods[J]. Journal of Dalian Ocean University, 2010, 25(6): 495-501. [魏杰, 赵文, 李多慧. 温度、盐度、非离子氨对不同驯化时间蒙古裸腹蚤存活、生殖和种群增长的影响[J]. 大连海洋大学学报, 2010, 25(6): 495-501.]
- [28] Razzak S A, Ali S A M, Hossain M M, et al. Biological CO_2 fixation with production of microalgae in wastewater-A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 76: 379-390.
- [29] Lyu C, Cao H S, Wang Q Q, et al. Differences in long-term impacts of unionized ammonia on life-history traits of three species of *Daphnia*[J]. International Review of Hydrobiology, 2013, 98(5): 253-261.
- [30] Huang Y H, Liang Y, Li Y M, et al. The effect of acute ammonia exposure on selected immunological parameters of *Daphnia similoides* (Cladocera)[J]. Crustaceana, 2018, 91(4): 403-411.
- [31] Knops M, Altenburger R, Segner H. Alterations of physiological energetics, growth and reproduction of *Daphnia magna* under toxicant stress[J]. Aquatic Toxicology, 2001, 53(2): 79-90.
- [32] Wenzel A, Bergström A K, Jansson M, et al. Survival, growth and reproduction of *Daphnia galeata* feeding on single and mixed *Pseudomonas* and *Rhodomonas* diets[J]. Freshwater Biology, 2012, 57(4): 835-846.

- [33] Xu D Q, Liao X L. A preliminary study on the development, growth and reproduction of *Daphnia carinata*[J]. Current Fisheries, 1981, 6(2): 6-10, 34. [许典球, 廖秀林. 隆线蚤的发育、生长与生殖的初步研究[J]. 湖南水产科技, 1981, 6(2): 6-10, 34.]
- [34] Huang X F. Effect of temperature on the development, growth and egg production in *Moina affinis* (Cladocera, Moinidae)[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 1983, 7(1): 105-112. [黄祥飞. 温度对近亲裸腹蚤发育、生长和卵的生产量的影响[J]. 水生生物学集刊, 1983, 7(1): 105-112.]
- [35] Jiang X D, Li Q M, Zhao S Y, et al. Temperature reaction norms of *Daphnia carinata* fitness: The effects of food concentration, population density, and photoperiod[J]. Journal of Freshwater Ecology, 2014, 29(1): 25-36.
- [36] Nesara K, Paturi A. Nutritional requirement of fresh water prawn and shrimps: A review[J]. Journal of Entomology and Zoology Studies, 2018, 6(4): 1526-1532.
- [37] Mai K S. Nutrient Requirements of Fish and Shrimp[M]. Beijing: Science Press, 2015, 115-116. [麦康森. 鱼类与甲壳类营养需要[M]. 北京: 科学出版社, 2015: 115-116.]
- [38] Lee C, Lee K J. Dietary protein requirement of Pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei* in three different growth stages[J]. Fisheries and Aquatic Sciences, 2018, 21(1): 30.
- [39] Goimier Y, Pascual C, Sánchez A, et al. Relation between reproductive, physiological, and immunological condition of *Litopenaeus setiferus* pre-adult males fed different dietary protein levels (Crustacea; Penaeidae)[J]. Animal Reproduction Science, 2006, 92(1-2): 193-208.
- [40] Kainz M, Arts M T, Brett M T. Lipids in Aquatic Ecosystems[M]. New York: Springer-Verlag New York, 2009.
- [41] Zhou Q C, Li C C, Liu C W, et al. Effects of dietary lipid sources on growth and fatty acid composition of juvenile shrimp, *Litopenaeus vannamei*[J]. Aquaculture Nutrition, 2007, 13(3): 222-229.
- [42] Xie S W, Wei D, Fang W P, et al. Optimal dietary lipid requirement of postlarval white shrimp, *Litopenaeus vannamei* in relation to growth performance, stress tolerance and immune response[J]. Aquaculture Nutrition, 2019, 25(6): 1231-1240.
- [43] Sperfeld E, Wacker A. Maternal diet of *Daphnia magna* affects offspring growth responses to supplementation with particular polyunsaturated fatty acids[J]. Hydrobiologia, 2015, 755(1): 267-282.
- [44] Brett M T, Müller-Navarra D C, Ballantyne A P, et al. *Daphnia* fatty acid composition reflects that of their diet[J]. Limnology and Oceanography, 2006, 51(5): 2428-2437.
- [45] Ravet J L, Brett M T, Müller-Navarra D C. A test of the role of polyunsaturated fatty acids in phytoplankton food quality for *Daphnia* using liposome supplementation[J]. Limnology and Oceanography, 2003, 48(5): 1938-1947.
- [46] Gladyshev M, Sushchik N, Dubovskaya O, et al. Influence of sestonic elemental and essential fatty acid contents in a eutrophic reservoir in Siberia on population growth of *Daphnia* (longispina group)[J]. Journal of Plankton Research, 2006, 28: 907-917.
- [47] Nikolai N S. Physiology of Cladocera[M]. 2nd edition. Russia: Academic Press, 2017: 71-74.
- [48] Lyu H Y, Zhou Y, Shu H, et al. Effects of dietary different n-3 PUFA/n-6 fatty acid ratio on the growth performance and antioxidant capacity of juvenile freshwater giant prawn (*Macrobrachium rosenbergii*)[J/OL]. Journal of Fisheries of China: 1-13. [2023-02-24]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1283.S.20220408.1725.005.html>. [吕红雨, 周越, 舒毓等. 饲料中 n-3 PUFA/n-6 PUFA 比值对罗氏沼虾幼虾生长性能和抗氧化能力的影响[J/OL]. 水产学报: 1-13 [2023-02-24]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1283.S.20220408.1725.005.html>.
- [49] Castro L F C, Tocher D R, Monroig O. Long-chain polyunsaturated fatty acid biosynthesis in chordates: Insights into the evolution of *Fads* and *Elovl* gene repertoire[J]. Progress in Lipid Research, 2016, 62: 25-40.
- [50] González-Félix M L, Perez-Velazquez M, Quintero-Alvarez J M, et al. Effect of various dietary levels of docosahexaenoic and arachidonic acids and different n-3/n-6 ratios on biological performance of Pacific white shrimp, *Litopenaeus vannamei*, raised in low salinity[J]. Journal of the World Aquaculture Society, 2009, 40(2): 194-206.
- [51] Koven W, van Anholt R, Lutzky S, et al. The effect of dietary arachidonic acid on growth, survival, and cortisol levels in different-age gilthead seabream larvae (*Sparus auratus*) exposed to handling or daily salinity change[J]. Aquaculture, 2003, 228(1-4): 307-320.

Effects of different diets on growth, reproduction, and population dynamics of *Daphnia carinata*

ZHANG Ya¹, XUE Yucai¹, CHEN Huicong¹, SHU Huang¹, MU Liangliang¹, JIANG Gang¹, WANG Weilong^{1,2,3}, HUANG Xuxiong^{1,2,3}

1. Centre for Research on Environmental Ecology and Fish Nutrition (CREEFN) of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;
2. Key Laboratory of Freshwater Aquatic Genetic Resources, Ministry of Agriculture and Rural Affairs; Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;
3. National Demonstration Center for Experimental Fisheries Science Education, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China

Abstract: To identify a suitable diet for the cultivation of *Daphnia carinata*, an experiment was conducted to investigate the effects of different diets on the growth, reproduction, and population dynamics of *D. carinata*. Corn powder, yeast, *Chlorella* sp., *Schizochytrium* sp., *Chlorococcum* sp., and *Nannochloropsis oculata* were used as dietary sources. The nutritional composition of each diet, culture water quality, and bacterium count were also assessed. The results showed that the survival rate of *D. carinata* was highest when fed *Chlorococcum* sp. The *Chlorococcum* sp. and *N. oculata* groups had significantly higher first offspring times (4.0 d) compared to other groups, with the highest offspring number per female found in the *Chlorococcum* sp. group (375.2 ind). Conversely, the survival rate of offspring was significantly lower in the corn powder group than in the other groups. *D. carinata* treated with *Chlorococcum* sp. exhibited the highest net reproductive rate (R_0 , 293.3), and the mean generation time of *D. carinata* in the *Chlorella* sp. group (5.0 d) was significantly lower than that in other groups. Although there was no significant difference in intrinsic growth rate r_m and finite growth rate λ among the *Chlorella* sp., *Chlorococcum* sp., and *N. oculata* groups, all of them were significantly higher than those in the other groups. Correlation analysis between diet nutrition compositions and the growth, reproduction, and population dynamics of *D. carinata* showed that dietary protein content was significantly negatively correlated with time for first offspring but positively correlated with intrinsic growth rate, finite growth rate, net reproduction rate, and reproductive capacity. The dietary carbohydrate content was positively correlated with the time of first maturity. The dietary arachidonic acid (ARA, C20 : 4n-6) content was significantly positively correlated with reproductive capacity, survival rate, and net reproductive rate. The dietary linoleic acid (C18 : 2n-6) content was positively correlated with the time of first maturity but negatively correlated with the survival rate. The dietary oleic acid (C18 : 1) content was extremely negatively correlated with the survival rate of *D. carinata*. In conclusion, the protein content, carbohydrate content, and fatty acid composition of the diet were the key factors affecting the culture effect of *D. carinata*. Among the six diets, *Chlorococcum* sp. was found to be more suitable for the cultivation of *D. carinata*.

Key words: *Daphnia carinata*; diet; growth and reproduction; population dynamics

Corresponding author: HUANG Xuxiong. E-mail: xxhuang@shou.edu.cn