

不同食物及食物密度对盐蚕豆虫种群动力学特征的影响

汤荣成^① 齐红莉^{①②*} 王红宇^① 李雪菡^①
王茜^① 戴伟^① 张树林^①

① 天津农学院水产学院, 天津市水产生态及养殖重点实验室 天津 300384;

② 中国海洋大学原生动植物学实验室 青岛 266003

摘要: 为探究不同食物及食物密度对盐蚕豆虫 (*Fabrea salina*) 种群动力学的影响。本文采用商业酵母和杜氏藻 (*Dunaliella salina*) 两种不同类型的饲料喂食盐蚕豆虫, 探究其种群动力学特征。结果表明, 杜氏藻组的盐蚕豆虫具有较高的生长率 [$(0.78 \pm 0.019) /d$]、较低的世代时间 [$(0.89 \pm 0.021) d$], 内禀生长率为 1.49/d, 米氏常数值为 1 121.32; 商业酵母组生长率较低 [$(0.36 \pm 0.001) /d$], 世代时间较长 [$(1.93 \pm 0.007) d$], 内禀生长率为 0.51/d, 米氏常数值为 2.68。One-way ANOVA 检验结果表明, 食物及食物密度对盐蚕豆虫的种群生长均有极显著影响 ($P < 0.01$)。以密度为 10×10^9 cells/L 的杜氏藻投喂, 可在短时间内实现盐蚕豆虫的高密度培养和利用, 而酵母适用于实验室中盐蚕豆虫的保种工作。

关键词: 盐蚕豆虫; 生长率; 食物密度; 种群动力学

中图分类号: Q958 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3263 (2019) 04-529-09

Effects of Different Food Densities on the Population Dynamics of *Fabrea salina*

TANG Rong-Cheng^① QI Hong-Li^{①②*} WANG Hong-Yu^① LI Xue-Han^①
WANG Qian^① DAI Wei^① ZHANG Shu-Lin^①

① Tianjin Key Laboratory of Aqua-Ecology and Aquaculture, College of Fisheries Science, Tianjin Agricultural University, Tianjin 300384;

② Lab of Protozoology, Ocean University of China, Qingdao 266003, China

Abstract: The purpose of this paper is to investigate the effects of different food and food densities on the population dynamics of *Fabrea salina*. Commercial yeast and *Dunaliella salina* were provided to the *F. salina*. The *F. salina* fed by *D. salina* had the higher growth rate ($0.78 \pm 0.019 / d$), and lower generation time ($0.89 \pm 0.021 d$). Its intrinsic growth rate is 1.49/d, and the Michaelis constant was 1 121.32. However, the growth rate

基金项目 天津市自然科学基金项目 (No. 17JCYBJC29800, 15JCYBJC23900), 天津市高等学校创新团队培养计划项目 (No. TD13-5089), 中国海洋大学海水养殖教育部重点实验室开放课题 (No. KLM2018003);

* 通讯作者, E-mail: qihl2000@163.com;

第一作者介绍 汤荣成, 男, 硕士研究生; 研究方向: 原生动植物生态学; E-mail: tangrc66077@163.com。

收稿日期: 2018-12-20, 修回日期: 2019-05-14 DOI: 10.13859/j.cjz.201904010

of *F. salina* fed by commercial yeast was lower (0.36 ± 0.001 / d), and the generation time was longer (1.93 ± 0.007 d); its intrinsic growth rate was 0.51/d and the Michaelis constant was 2.68. One-way ANOVA test results showed that the kind of food and food density had a significant effect on the population growth of *F. salina* ($P < 0.01$). Feeding *F. salina* by *D. salina* with a density of 10×10^9 cells/L can achieve high-density culture in a short period of time. While, yeast is suitable to feed *F. salina* to keep them in the laboratory for longer time.

Key words: *Fabrea salina*; Growth rate; Feeding density; Population dynamics

原生动物纤毛虫在微食物网中占据着重要的地位, 微食物网对于海洋生态系统具有重要性和生态学意义(王梅等 2003, 类彦立等 2007)。活饵料的正确选取对幼鱼的第一个摄食阶段十分重要(Lee et al. 2018), 有关枝角类和桡足类作为活饵料的研究较多(徐金传等 2011, Rasdi et al. 2016, Broach et al. 2017), 但是对于一些海鱼幼苗来说, 常规的开口饵料轮虫或卤虫体积太大, 因此海洋中常见的、体积较小的浮游动物可能是其重要的开口饵料。目前国内外有关于原生动物被用于大西洋真鲷(*Gadus morhua*)、红鳍笛鲷(*Lutjanus erythropterus*)等鱼苗的开口饵料的报导(von Hebing et al. 2000, Mukai et al. 2016), 纤毛虫作为原生动物重要组成部分, 成为经济鱼类开口饵料潜力巨大(叶锦春等 1984)。

盐蚕豆虫(*Fabrea salina*)隶属于纤毛虫门(Ciliophora)多膜纲(Polyhymenophora)异毛目(Hetootricha)蚕豆虫属(宋微波等 2009)。盐蚕豆虫个体小、分布广、运动慢、生长周期短、耐盐性高, 可以在多种环境中自然繁殖(Song et al. 2003, Pandey et al. 2004a)。盐蚕豆虫作为海水幼鱼潜在活饵料的重要性首先是由 Morris 于 1956 年提出, 后续的研究表明, 盐蚕豆虫可以替代轮虫作为巴西笛鲷(*L. cyanopterus*)鱼苗的开口饵料, 并且巴西笛鲷鱼苗生长效果会更好(Rhodes et al. 2008)。生化组成和脂肪酸谱分析也表明, 盐蚕豆虫身体表面无任何坚硬的物质覆盖, 容易被幼鱼捕食和消化, 营养全面符合许多海水经济鱼类鱼苗生长需求(Pandey 2001, Pandey et al. 2004b)。

本文以盐蚕豆虫为实验对象, 研究用不同密度的杜氏藻(*Dunaliella salina*)和酵母作为食物对其种群动力学特征的影响, 以期能够为盐蚕豆虫的规模化培养、利用、保种等研究提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 纤毛虫种群维持及培养

本实验用盐蚕豆虫 2016 年 6 月采自天津市北大港沿岸湿地(盐度 45.29, 水温 26.56 °C), 经形态分类学鉴定为盐蚕豆虫(Song et al. 1997)。实验前将盐蚕豆虫置于经 0.22 μm 孔径滤膜抽滤的盐度 50 的人工海水中进行培养(张绍丽等 2001), 以杜氏藻和商业干酵母分别投喂, 室温下扩大培养, 当以杜氏藻和商业干酵母喂食的盐蚕豆虫密度分别达到 4×10^5 ind/L 和 3×10^4 ind/L 时, 方可开展实验。杜氏藻浓缩液购于中盐制盐工程技术研究院; 商业干酵母购自安琪酵母股份有限公司。

1.2 实验方法

在锥形瓶中加入 50 ml 的培养液, 接种盐蚕豆虫后密度为 4×10^3 ind/L, pH 为 (8 ± 0.2) , 每天 9 时, 按照实验设置的食物浓度进行投喂。实验在温度 (28 ± 1) °C、光照强度 2 000 lx、光照周期 L : D = 14 : 10 (即白昼与黑夜分别为 14 h 和 10 h) 的恒温培养箱中进行。本实验共设 10 个处理组, 杜氏藻和酵母密度各设 5 个梯度, 分别是 2×10^9 、 4×10^9 、 6×10^9 、 8×10^9 、 10×10^9 cells/L 和 6、8、10、12、14 mg/L, 各平行均设 3 个重复。实验持续 13 d, 每隔 24 h 测定盐蚕豆虫的种群密度一次, 用终浓度为 2%

的戊二醛固定液固定(类彦立等 2011),用 1 ml 浮游动物计数框计数,计数重复两次,计数误差不可超过 15% (齐红莉等 2018)。

浮游纤毛虫生长率(张武昌等 2014)为 $\mu = [\ln(C_t/C_0)]/t$, 式中, μ 是生长率, C_0 和 C_t (ind/L)分别是初始纤毛虫的丰度和 t (d)时纤毛虫的丰度。

自由生纤毛虫是通过二分裂的方式进行种群增长的(潘莹等 2010),因此其世代时间(G)与种群自然生长率(μ)之间的关系为 $G = \ln(2/\mu)$,代入上述所得 μ 值,以计算 G 。

纤毛虫的生长率和饵料浓度存在一定的数值关系, Montagnes (1996)把特定温度下纤毛虫的生长率与饵料浓度的关系表示为, $\mu = [\mu_{\max}(P - x')]/[k + (P - x')]$, 式中, μ 是生长率, μ_{\max} 是内禀生长率, P 是饵料的浓度, x' 是生长阈值浓度,即生长率为零(不生长)时的饵料浓度, k 是常数,饵料浓度为 $x' + k$ 时,纤毛虫的生长率为 $\mu_{\max}/2$, k 值表明了捕食者摄食的特征常数,以此来判断饵料是否适宜。

1.3 数据处理

Excel 2016 制图,通过 SPSS 22.0 进行单因素方差分析, $P < 0.05$ 时,差异显著, $P < 0.01$ 时,差异极显著。

2 结果

2.1 盐蚕豆虫在不同食物密度中的种群生长

不同密度杜氏藻饲喂盐蚕豆虫的种群增长过程存在以下特点: 5 个密度组的种群生长都

存在停滞期、指数期、稳定期和衰退期四个时期;在经过 24 h 的停滞期后,各组均进入指数生长期,其中,食物密度最低的 2×10^9 cells/L 组指数生长期最长。 6×10^9 和 8×10^9 cells/L 处理组最先达到最大种群密度,其次是 4×10^9 、 10×10^9 和 2×10^9 cells/L 处理组, 6×10^9 、 8×10^9 、 4×10^9 、 10×10^9 、 2×10^9 cells/L 组的最大种群密度分别为 $(2.41 \pm 0.26) \times 10^5$ 、 $(3.43 \pm 0.13) \times 10^5$ 、 $(7.10 \pm 0.65) \times 10^4$ 、 $(5.01 \pm 0.20) \times 10^5$ 、 $(6.20 \pm 0.22) \times 10^4$ ind/L (图 1)。

2×10^9 cells/L 组 216 h 种群密度达到峰值,264 h 后进入衰退期,稳定期种群平均密度为 $(5.70 \pm 0.54) \times 10^4$ ind/L; 4×10^9 cells/L 组至 168 h 种群密度达到峰值,216 h 后进入衰退期,稳定期种群平均密度为 $(6.30 \pm 0.60) \times 10^4$ ind/L; 6×10^9 cells/L 组至 144 h 种群密度达到峰值,192 h 后进入衰退期,稳定期种群平均密度为 $(2.26 \pm 0.20) \times 10^5$ ind/L; 8×10^9 cells/L 组至 144 h 种群密度达到峰值,192 h 后进入衰退期,稳定期种群平均密度为 $(3.27 \pm 0.15) \times 10^5$ ind/L; 10×10^9 cells/L 组至 192 h 种群密度达到峰值,264 h 后进入衰退期,稳定期种群平均密度为 $(4.61 \pm 0.27) \times 10^5$ ind/L。各杜氏藻密度组种群最大密度和稳定期种群平均密度差异较大。

One-way ANOVA 检验结果表明, 2×10^9 和 4×10^9 cells/L 杜氏藻组盐蚕豆虫的种群最大密度和稳定期平均密度差异均不显著,其他浓度组间的最大种群密度和稳定期平均密度均

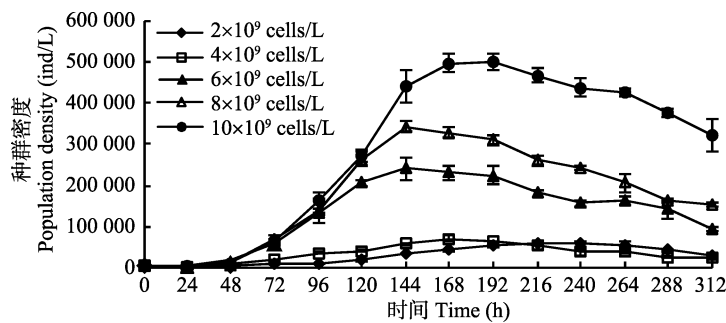


图 1 盐蚕豆虫在不同密度杜氏藻组中的种群生长曲线

Fig. 1 Population growth curve of *Fabrea salina* fed by different density group of *Dunaliella salina*

存在极显著差异 ($P < 0.01$) (表 1)。

表 1 杜氏藻组盐蚕豆虫最大种群密度和稳定期平均密度的 One-way ANOVA 检验

Table 1 The results of One-way ANOVA test of *Fabrea salina* in both its maximum density and average density fed on *Dunaliella* in its stable density period

杜氏藻密度 (cells/L) <i>Dunaliella</i> density	P 值 P value				
	2×10^9	4×10^9	6×10^9	8×10^9	10×10^9
2×10^9	—	0.55 ^b	<0.01 ^b	<0.01 ^b	<0.01 ^b
4×10^9	0.70 ^a	—	<0.01 ^b	<0.01 ^b	<0.01 ^b
6×10^9	<0.01 ^a	<0.01 ^a	—	<0.01 ^b	<0.01 ^b
8×10^9	<0.01 ^a	<0.01 ^a	<0.01 ^a	—	<0.01 ^b
10×10^9	<0.01 ^a	<0.01 ^a	<0.01 ^a	<0.01 ^a	—

a 表示稳定期平均密度; b 表示最大种群密度。

a indicates the average density during the stable period; b indicates the maximum population density.

不同密度酵母饲喂的种群增长特点同杜氏藻组, 5 个处理组的种群都存在种群增长的四个时期, 均在经过 24 h 的停滞期后进入指数生长期, 指数期持续时间差别不明显 (图 2)。其中, 10 mg/L 处理组最先达到最大种群密度, 之后, 6、8、12 和 14 mg/L 处理组同时达到最大种群密度, 分别为 (29.00 ± 1.77)、(20.00 ± 2.50)、(23.00 ± 0.69)、(33.00 ± 0.50) 和 (35.00 ± 0.94) ind/L。

One-way ANOVA 检验结果表明, 12 与 14 mg/L 酵母组盐蚕豆虫的种群最大密度和稳定期平均密度差异均不显著, 6 与 8 mg/L 酵母组盐蚕豆虫的稳定期平均密度差异显著 ($P < 0.05$), 其他浓度组间的最大种群密度和稳定期平均密度均存在极显著性差异 ($P < 0.01$) (表 2)。

杜氏藻组和酵母组存在共性, 即种群生长阶段都有停滞期、指数期、稳定期、衰退期四个时期; 两个饵料组都在 24 h 后进入指数生长期, 但酵母组的指数期持续时间比杜氏藻组的短。观察发现, 无论是最大种群密度还是稳定期平均密度, 酵母组的盐蚕豆虫种群密度远低于杜氏藻组; 酵母组达到最大种群密度的时间早于杜氏藻组, 酵母组最早在 120 h 时达到种群数量峰值, 杜氏藻组最早达到种群数量峰值是在 144 h。

2.2 不同食物密度下盐蚕豆虫的种群动力学特征

杜氏藻和酵母两个饵料组中盐蚕豆虫种群生长率和世代时间差异较大。随着饵料密度的增大, 不同杜氏藻密度组中的盐蚕豆虫种群生长率依次为 (0.30 ± 0.005)、(0.41 ± 0.016)、(0.68 ± 0.023)、(0.74 ± 0.007)、(0.78 ± 0.019) 1/d, 相应的世代时间依次为 (2.28 ± 0.035)、(1.68 ± 0.068)、(1.02 ± 0.034)、(0.93 ± 0.009)、(0.89 ± 0.021) d。种群生长率随饵料密度的增大呈现上升的趋势, 世代时间则是随饵料密度增加呈现下降趋势。10 × 10⁹ cells/L

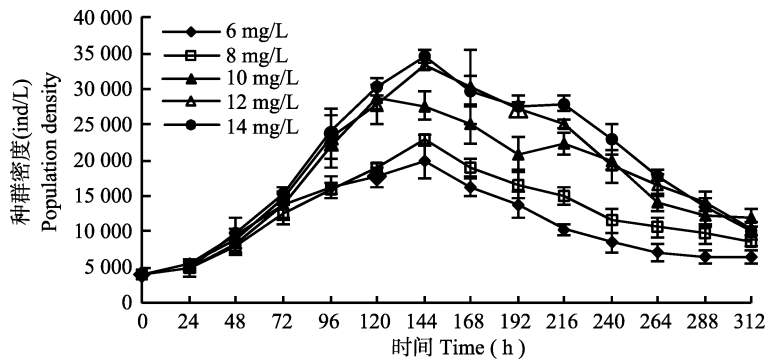


图 2 盐蚕豆虫在不同酵母密度组中的种群生长曲线

Fig. 2 Population growth curve of *Fabrea salina* fed by different density group of yeast

表 2 酵母密度组最大种群密度和稳定期平均密度的 One-way ANOVA 检验

Table 2 The results of One-way ANOVA test of *Fabrea salina* in both its maximum density and average density fed on yeast in its stable density period

酵母密度 (mg/L) Yeast density	P 值 P value				
	6	8	10	12	14
6	—	0.02 ^b	<0.01 ^b	<0.01 ^b	<0.01 ^b
8	<0.01 ^a	—	<0.01 ^b	<0.01 ^b	<0.01 ^b
10	<0.01 ^a	<0.01 ^a	—	<0.01 ^a	<0.01 ^b
12	<0.01 ^a	<0.01 ^a	<0.01 ^a	—	0.26 ^b
14	<0.01 ^a	<0.01 ^a	<0.01 ^a	0.46 ^a	—

a 表示稳定期平均密度; b 表示最大种群密度。

a indicates the average density during the stable period; b indicates the maximum population density.

杜氏藻组的种群生长率最高, 相应的世代时间最短(图 3)。One-way ANOVA 检验结果表明, 杜氏藻 5 个浓度组之间的生长率存在极显著性差异 ($P < 0.01$)。世代时间上, 2×10^9 cells/L 与其他杜氏藻组均存在极显著性差异 ($P < 0.01$); 4×10^9 cells/L 组同上; 6×10^9 与 8×10^9 杜氏藻组之间存在显著性差异 ($P < 0.05$); 8×10^9 cells/L 与 10×10^9 cells/L 杜氏藻组之间差异不显著(表 3)。

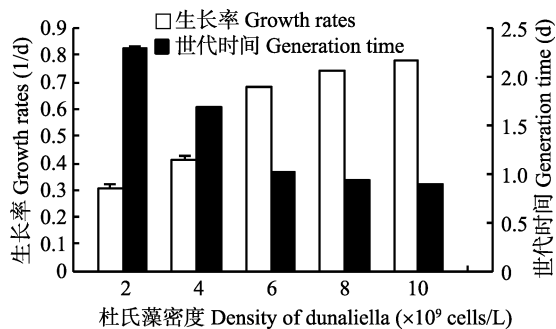


图 3 盐蚕豆虫在不同杜氏藻密度组中的种群生长率和世代时间

Fig. 3 Population growth rate and generation duration of *Fabrea salina* fed on *Dunaliella salina* with different densities

表 3 杜氏藻密度组种群生长率和世代时间的 One-way ANOVA 检验

Table 3 The results of One-way ANOVA test of *Fabrea salina* fed on *Dunaliella* in both its maximum density and average density in its stable density period

杜氏藻密度 (cells/L) Dunaliella density	P 值 P value				
	2×10^9	4×10^9	6×10^9	8×10^9	10×10^9
2×10^9	—	<0.01 ^b	<0.01 ^b	<0.01 ^b	<0.01 ^b
4×10^9	<0.01 ^a	—	<0.01 ^b	<0.01 ^b	<0.01 ^b
6×10^9	<0.01 ^a	<0.01 ^a	—	<0.01 ^b	<0.01 ^b
8×10^9	<0.01 ^a	<0.01 ^a	0.03 ^a	—	<0.01 ^b
10×10^9	<0.01 ^a	<0.01 ^a	<0.01 ^a	0.16 ^a	—

a 表示稳定期平均密度; b 表示最大种群密度。

a indicates the average density during the stable period; b indicates the maximum population density.

随饵料密度的增大, 不同酵母密度组中盐蚕豆虫种群生长率依次为 (0.27 ± 0.017)、(0.29 ± 0.004)、(0.32 ± 0.015)、(0.35 ± 0.003)、(0.36 ± 0.001) 1/d, 相应的世代时间依次为 (2.60 ± 0.163)、(2.39 ± 0.034)、(2.15 ± 0.067)、(1.96 ± 0.016)、(1.93 ± 0.007) d。种群生长率随饵料密度的增大呈现上升的趋势, 世代时间则是随饵料密度增加呈现下降趋势。14 mg/L 浓度组的盐蚕豆虫种群生长率最高, 相应的世代时间最短(图 4)。One-way ANOVA 检验结果表明, 12 mg/L 与 14 mg/L 酵母组的盐蚕豆虫种群生长率差异不显著。世代时间上,

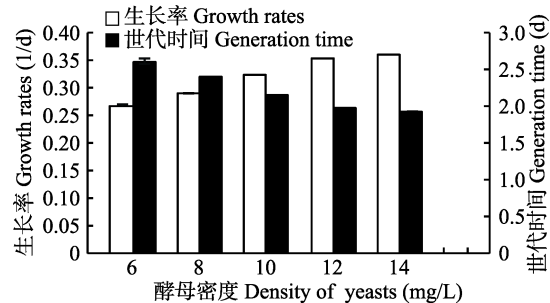


图 4 盐蚕豆虫在不同酵母密度组中的种群生长率和世代时间

Fig. 4 Population growth rate and generation time of *Fabrea salina* fed on Yeast in different densities

10 和 12、14 mg/L 酵母组之间分别存在显著性差异 ($P < 0.05$); 12 与 14 mg/L 酵母组之间差异不显著 (表 4)。

表 4 酵母密度组种群生长率和世代时间的 One-way ANOVA 检验

Table 4 The results of One-way ANOVA test of *Fabrea salina* fed on Yeast in both its period of maximum density and average density in its stable density period

酵母密度 (mg/L) Yeast density	P 值 P value				
	6	8	10	12	14
6	—	<0.01 ^b	<0.01 ^b	<0.01 ^b	<0.01 ^b
8	<0.01 ^a	—	<0.01 ^b	<0.01 ^b	<0.01 ^b
10	<0.01 ^a	<0.01 ^a	—	<0.01 ^b	<0.01 ^b
12	<0.01 ^a	<0.01 ^a	0.01 ^a	—	0.45 ^b
14	<0.01 ^a	<0.01 ^a	0.03 ^a	0.63 ^a	—

a 表示稳定期平均密度; b 表示最大种群密度。

a indicates the average density during the stable period; b indicates the maximum population density.

根据 Michaelis-Menten 方程和 Lineweaver-Burk 双倒数作图法, 作盐蚕豆虫在不同食物饵料组中的双倒数曲线 (图 5), 求得不同饵料组中的内禀生长率及 k 值, 各参数值详见表 5、表 6。结合公式, 经计算求得杜氏藻组的内禀生长率、常数 k 的值分别为 1.49/d、1 121.32, 生长阈值浓度为 100.20 mg/L (以碳含量计), 酵母组的内禀生长率、k、x' 的值为 0.51/d、2.68、0.22 mg/L (以碳含量计)。

3 讨论

研究海洋浮游纤毛虫的摄食情况对了解海洋浮游纤毛虫在海洋浮游生态系统物质循环和能量流动中的作用有重要意义。摄食主要研究内容包括纤毛虫的食性、纤毛虫对不同饵料的摄食强度和选择性。食物浓度、温度、光线等都会对纤毛虫的生长、摄食以及生长效率等关键因子产生影响 (Salt et al. 2017)。纤毛虫的种

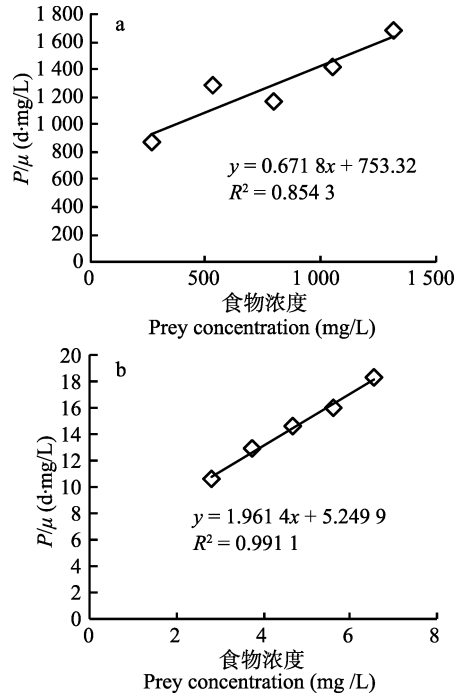


图 5 盐蚕豆虫在杜氏藻 (a) 和酵母 (b) 不同密度组中的双倒数曲线

Fig. 5 Double reciprocal curves of *Fabrea salina* fed on *Dunaliella* (a) and Yeast (b) in different density

P/μ 是食物浓度与生长率的比值, 食物浓度是以食物中的碳含量计。
 P/μ is the ratio of prey concentrations to growth rate, prey concentrations have been converted to carbon.

表 5 盐蚕豆虫在杜氏藻不同密度组中的参数值
Table 5 Parameter values of *Fabrea salina* in different density groups of *Dunaliella*

杜氏藻密度 (cells/L) Dunaliella density	食物浓度 (以碳含量计) (mg/L) Prey concentration, P (have been converted to carbon)	生长率 (1/d) Growth rates, μ	P/μ (d·mg/L)
2×10^9	264	0.303 6	869.456 1
4×10^9	528	0.411 6	1 282.857 0
6×10^9	792	0.682 9	1 159.839 5
8×10^9	1 056	0.741 7	1 423.827 5
10×10^9	1 320	0.783 0	1 685.750 2

P/μ 是食物浓度与生长率的比值, 食物浓度是以食物中的碳含量计。

P/μ is the ratio of prey concentrations to growth rate, prey concentrations have been converted to carbon.

表 6 盐蚕豆虫在酵母不同密度组中的参数值

Table 6 Parameter values of *Fabrea salina* in different density groups of Yeast

酵母密度 (mg/L) Yeast density	食物浓度 (以碳含量计) (mg/L) Prey concentration, P (have been converted to carbon)	生长率 (1/d) Growth rates, μ	P/μ (d·mg/L)
6	2.820 0	0.266 8	10.567 9
8	3.760 0	0.290 3	12.951 2
10	4.700 0	0.322 3	14.581 7
12	5.640 0	0.353 4	15.960 3
14	6.580 0	0.359 9	18.282 1

P/μ 是食物浓度与生长率的比值, 食物浓度是以食物中的碳含量计。

P/μ is the ratio of prey concentrations to growth rate, prey concentrations have been converted to carbon.

群生长通常符合逻辑斯蒂增长曲线 (张绍丽等 2001)。本研究表明, 盐蚕豆虫在不同食物及不同食物浓度的人工海水中的种群生长均符合逻辑斯蒂增长曲线, 即分为明显的停滞期、指数增长期、稳定期和衰退期, 但是种群密度最大值、稳定期平均密度在不同食物中差异较大, 杜氏藻组的最大种群密度和稳定期平均密度远大于酵母组的最大种群密度和稳定期平均值。实验结果表明, 两种食物组中, 种群密度均随食物浓度增大呈现增长趋势, 且酵母组达到种群密度峰值的时间短于杜氏藻组。这与不同培养条件对海洋尾丝虫 (*Uronema marinum*) (曾红等 2015)、水滴伪康纤虫 (*Pseudocohnilembus persalinus*) (沈琳琳等 2014) 的种群生长研究结果基本一致, 即种群密度会随着食物密度增大而出现增长趋势。此现象产生的原因可能是食物浓度对生物摄食的影响: 无其他限制因子的情况下, 摄食率随食物浓度增大呈线性增大 (李承春 2012), 或者是培养液浓度对种群生长率和生物量存在明显影响, 在一定范围内, 培养液浓度的增大对种群生长有促进作用 (王梅等 2003)。

浮游纤毛虫的丰度和生物量无法反映出种群动态变化的机制, 而生长率是评估纤毛虫生

产力、理解其种群动力学的重要参数。世代时间以及形态变化规律是种群生态学研究中的必要指数, 对种群的增长与繁殖以及海洋纤毛虫对环境胁迫的适应情况等方面的研究具有至关重要意义 (张武昌等 2014)。本实验发现, 不同饵料组的生长率和世代时间差异较大, 杜氏藻组的生长率明显高于酵母组的生长率, 而世代时间普遍低于酵母组, 其中, 杜氏藻组中 10×10^9 cells/L 组和酵母组中 14 mg/L 这两组的种群生长率最高, 相应的世代时间最短。对比之下, 10×10^9 cells/L 的杜氏藻更适合培养盐蚕豆虫。两种饵料组中, 饵料浓度低时, 纤毛虫种群生长缓慢且丰度小, 生长率低, 世代时间长, 此阶段的纤毛虫生长受上行控制的影响, 上行控制是指较低营养级食物资源的密度、生物量可决定较高营养级的种群结构, 故生长率随饵料浓度增加而增大。

纤毛虫的生长率随饵料浓度的变化呈先升高再下降再升高的双峰型曲线, 在饵料浓度低的情况下没有显著的生长趋势, 随着饵料浓度的增大, 生长率随之增大, 当饵料浓度达到和大于一定数值时, 随着饵料浓度的继续增大, 生长率在某一数值保持稳定或者呈现下降趋势, 此时的生长率称为内禀生长率 (μ_{\max}), 常用来指示饵料的养分价值和适口性 (张武昌等 2014, Reid et al. 2018)。Montagnes (1996) 首次运用米氏方程来研究浮游纤毛虫的种群生长, 通过对纤毛虫生长率和食物饵料碳含量的分析, 研究 4 种纤毛虫的种群生长情况。其中, k 值被用来判断实验过程中饵料的适宜程度。本实验得出杜氏藻组的内禀生长率和 k 值均显著大于酵母组, 这与 Montagnes (1996) 研究结果基本一致, 表明与酵母相比杜氏藻更适宜用作高密度培养盐蚕豆虫的食物来源。

盐蚕豆虫作为饵料生物, 具有极强的发展潜力, 如果能实现大规模培养, 将有利于海水鱼养殖业的发展 (Morris 1965, Barnabé 1974, 卞伯仲等 1987), 大多数浮游纤毛虫具有与桡足类无节幼体相似或更小的尺寸, 使其更适合

作为海水鱼鱼苗的开口饵料。盐蚕豆虫隶属于纤毛虫门多膜纲异毛目蚕豆虫属，可在封闭的高盐度水体中构成优势种，符合潜在的活食物生物体所需的大多数标准。实验显示，盐蚕豆虫在以密度为 10×10^9 cells/L 的杜氏藻为食物的培养液中生长得更好，这可能与盐蚕豆虫的摄食偏好有关。研究者通过用不同颜色荧光微球标记食饵，评估和定义实验用鱼在首次进食几种饵料时的摄食偏好，发现幼鱼的摄食偏好具有物种特异性 (Lee et al. 2018)。对盐蚕豆虫细胞质的观察揭示了其食物空泡内存在杜氏藻细胞，仅在少数情况下 (2% ~ 5%) 可以在食物泡中检测到小球藻 (*Chlorella salina*) (Pandey et al. 2004a)。研究发现，杜氏藻在高盐水体呈现，可忍受很大范围的盐度突变，在海水养殖中杜氏藻已作为活饵料投入使用，如贝类幼体、卤虫 (*Brine Shrimp*) 以及西藏拟蚤 (*Daphniopsis tibetana*)、蒙古裸腹蚤 (*Moina mongolica*) 等盐水枝角类等的饲养 (刘亚军等 2004)。盐蚕豆虫的丰度与杜氏藻的发生率呈正相关，在盐场从 3 月到 6 月中旬左右，出现丰富的杜氏藻的同时会有大量的盐蚕豆虫。因此为了能够获得较大产量的盐蚕豆虫，杜氏藻是理想食物选择。

不同食物及食物密度对盐蚕豆虫的种群生长有极显著影响，其中以密度为 10×10^9 cells/L 的杜氏藻投喂可在短时间内实现盐蚕豆虫的高密度培养和利用，酵母适合实验室中盐蚕豆虫的保种工作。

致谢 感谢中国海洋大学原生动物实验室为本次实验提供实验材料及实验方法的支持。

参 考 文 献

- Barnabé G. 1974. Mass Rearing of the Bass *Dicentrarchus labrax* L. // Blaxter J H S. The Early Life History of Fish. Springer Berlin Heidelberg, 749–753.
- Broach J S, Cassiano E J, Watson C A. 2017. Baseline culture parameters for the cyclopoid copepod *Oithona colcarva*: a potential new live feed for marine fish larviculture. *Aquaculture Research*, 48(8): 4461–4469.
- Lee I S, Ohs C L, Broach J S, et al. 2018. Determining live prey preferences of larval ornamental marine fish utilizing fluorescent microspheres. *Aquaculture*, 490: 125–135.
- Montagnes D J S. 1996. Growth responses of planktonic ciliates in the genera *Strobilidium* and *Strombidium*. *Advances in Microbiology*, 130(1): 241–254.
- Morris R M. 1956. Some Aspects of the Problem of Rearing Marine Fishes. San Francisco: Department of Biological Sciences, Stanford University, Ph. D Thesis, 26–110.
- Mukai Y, Sani M Z, Mohammad-Noor N, et al. 2016. Effective method to culture infusoria, a highly potential starter feed for marine finfish larvae. *International Journal of Fisheries and Aquatic Studies*, 4(3): 124–127.
- Pandey B D. 2001. Ecology, Biology and Culture Aspects of *Fabrea salina*. Mumbai: University of Mumbai Doctoral dissertation, Ph. D. Thesis.
- Pandey B D, Yeragi S G. 2004a. Preliminary and mass culture experiments on a heterotrichous ciliate, *Fabrea salina*. *Aquaculture*, 232(1/4): 241–254.
- Pandey B D, Yeragi S G, Pal A K. 2004b. Nutritional value of a heterotrichous ciliate, *Fabrea salina* with emphasis on its fatty acid profile. *Asian Australasian Journal of Animal Sciences*, 17(7): 995–999.
- Rasdi N W, Qin J G. 2016. Improvement of copepod nutritional quality as live food for aquaculture: a review. *Aquaculture Research*, 47(1): 1–20.
- Reid A H, Sprules W G. 2018. A comprehensive evaluation of *Daphnia pulex* foraging energetics and the influence of spatially heterogeneous food. *Inland Waters*, 8(1): 50–59.
- Rhodes M A, Phelps R P. 2008. Evaluation of the ciliated protozoa, *Fabrea salina* as a first food for larval red snapper, *Lutjanus campechanus* in a large scale rearing experiment. *Journal of Applied Aquaculture*, 20(2): 120–133.
- Salt J L, Bulit C, Zhang W. et al. 2017. Spatial extinction or persistence: landscape-temperature interactions perturb predator-prey dynamics. *Ecography*, 40(10): 1177–1186.
- Song W, Packroff G. 1997. Taxonomy and morphology of marine

- ciliates from China with description of two new species, *Strombidium globosaneum* nov. spec. and *S. platum* nov. spec. (Protozoa, Ciliophora). *Archiv für Protistenkunde*, 147(3/4): 331–360.
- Song W, Warren A, Ji D, et al. 2003. New contributions to two heterotrichous ciliates, *Folliculina simplex* (Dons, 1917), *Condylostoma curva* Burkovsky, 1970 and one licnophorid, *Licnophora lyngbycola* Fauré-Fremiet, 1937 (Protozoa, Ciliophora): descriptions of morphology and infraciliature. *Journal of Eukaryotic Microbiology*, 50(6): 449–462.
- von Hebing I H, Gallager S M. 2000. Foraging behavior in early Atlantic cod larvae (*Gadus morhua*) feeding on a protozoan (*Balanion* sp.) and a copepod nauplius (*Pseudodiaptomus* sp.). *Marine Biology*, 136(3): 591–602.
- 卞伯仲, 李明仁, 刘力. 1987. 环境因子对盐田蚕豆虫 (*Fabrea salina* Henneguy) 生长的影响. *动物学报*, 33(3): 248–254.
- 类彦立, 徐奎栋. 2007. 海洋底栖原生动物生态学研究方法学综述. *海洋科学*, 31(5): 49–57.
- 类彦立, 徐奎栋. 2011. 海洋微型底栖生物调查方法与操作规程. *海洋与湖沼*, 42(1): 157–164.
- 李承春. 2012. 海洋大型底栖纤毛虫的种群增长和摄食效应. 青岛: 中国科学院海洋研究所博士学位论文, 41–58.
- 刘亚军, 赵文. 2004. 杜氏藻的生物学和生态学研究进展. *大连海洋大学学报*, 19(2): 126–131.
- 潘莹, 姜勇, 张伟, 等. 2010. 不同温度对 3 种海洋纤毛虫种群增长的影响. *应用与环境生物学报*, 16(6): 807–811.
- 齐红莉, 汤荣成, 徐海龙, 等. 2018. 三氯异氰尿酸对海洋拟阿脑虫种群生长的影响. *水生态学杂志*, 39(3): 94–98.
- 沈琳琳, 林能峰, 詹子峰, 等. 2014. 不同培养条件水滴伪康纤虫种群生长研究. *福建农业学报*, 29(2): 107–112.
- 宋微波, 沃伦, 胡晓钟. 2009. 中国黄渤海的自由生纤毛虫. 北京: 科学出版社, 300–310.
- 王梅, 许恒龙, 陶振铨. 2003. 海洋纤毛虫试验生态学研究 I: 不同浓度葡萄糖对种群增长的影响. *应用与环境生物学报*, 9(6): 627–630.
- 徐金传, 易翀, 郭刚. 2012. 活饵料在渔业中的应用. *渔业致富指南*, (3): 23–24.
- 叶锦春, 张洁明, 陈松林. 1984. 纤毛虫的培养和利用. *淡水渔业*, (3): 9–12, 3.
- 曾红, 沈琳琳, 林能峰, 等. 2015. 不同培养条件对海洋尾丝虫种群增长的影响. *福建师范大学学报*, 31(1): 88–92.
- 张绍丽, 马洪刚, 宋微波. 2001. 海洋纤毛虫巨大拟阿脑虫的实验生态学研究: 初始密度及食物对其种群生长的影响. *海洋与湖沼*, 32(6): 641–646.
- 张武昌, 李海波, 丰美萍. 2014. 海洋浮游纤毛虫生长率研究进展. *生态学报*, 34(8): 1897–1909.