

摘要

仔鱼开口饵料的营养价值决定了仔鱼质量和成活率的高低。目前,淡水仔鱼育苗中选用的开口饵料主要以豆油、豆浆和蛋黄等人工饵料为主,育苗过程中容易出现摄食率低,鱼苗大量死亡的现象。轮虫是淡水浮游动物的重要组成部分,具有营养价值高、大小适口和可得性高等优点,是淡水仔鱼最理想的开口饵料。当前,我国轮虫培养产量低、技术不完善,生产上往往难以满足需求。水体扰动普遍存在于自然水体中,研究报道水体扰动对浮游动物的摄食、生长和繁殖具有重要影响。然而,关于水体扰动的方式和强度对轮虫种群繁殖的影响鲜见报道。轮虫食性较为广泛,其中养殖轮虫主要以蛋白核小球藻和面包酵母为主。本研究以萼花臂尾轮虫为研究对象,以蛋白核小球藻和面包酵母为轮虫饵料,开展了不同扰动方式(充气扰动和造流扰动)和扰动强度对轮虫规模化培育的相关研究。主要研究结果如下:

(1) 在给定蛋白核小球藻密度 1×10^6 cells/mL、 5×10^6 cells/mL 和 10×10^6 cells/mL 下,研究了不同扰动方式和扰动强度对萼花臂尾轮虫摄食率的影响。实验结果表明,在相同食物浓度下,轮虫摄食率随着扰动强度的增强而呈现先上升后下降的趋势;而相同扰动方式下,轮虫摄食率则随着食物浓度的升高而上升。当藻密度为 10×10^6 cells/mL 条件下,各实验组轮虫摄食率均达到最大值。其中,静止组为 3.89×10^3 cells/ind.·h;充气组中 12 L/min 充气量下轮虫摄食率为 6.70×10^3 cells/ind.·h,显著高于 6 L/min、18 L/min 和 24 L/min 充气量下轮虫摄食率 ($P < 0.05$);造流组中,13000 L/H 造流量下轮虫摄食率为 8.57×10^3 cells/ind.·h,显著高于 4000 L/H、8000 L/H 和 20000 L/H 造流量下轮虫摄食率 ($P < 0.05$)。不同扰动方式之间,充气组轮虫摄食率显著高于静止组 ($P < 0.05$),而造流组轮虫摄食率则显著高于静止组与充气组 ($P < 0.05$)。实验结果表明,水体扰动可以显著提高轮虫的摄食强度,在造流扰动下,轮虫能摄食更多的食物。

(2) 以蛋白核小球藻为饵料,采用群体累积培养法,研究了不同扰动方式和扰动强度对萼花臂尾轮虫种群增长的影响。实验结果发现,与静止培养和充气培养相比,造流培养可以显著提高轮虫的繁殖速度。13000 L/H 造流量下轮虫培养效果较好,种群密度在 7 天内可达到 107 ind./mL;而充气培养最高只有 56 ind./mL,静止培养仅有 23 ind./mL,均显著低于造流培养 ($P < 0.05$)。本实验表明,以蛋白核小球藻为饵料时,水体扰动可以提高轮虫培养产量,造流扰动是轮虫规模化培养最佳的扰动方式。

(3) 以面包酵母为饵料,采用群体累积培养法,研究了不同扰动方式和扰动强度对萼花臂尾轮虫种群增长的影响。实验结果发现,充气处理组中 12 L/min 充气量下轮虫种群密度最高,为 162 ind./mL;而所有造流处理组轮虫种群密度均超过 200 ind./mL,其中 8000 L/H 造流量下轮虫种群密度达到 297 ind./mL,与充气处理组差异极显著 ($P < 0.01$)。本实验研究结果表明,以面包酵母为饵料时,造流扰动有利于实现轮虫高产的目的。

(4) 以蛋白核小球藻为饵料,研究了不同扰动方式对萼花臂尾轮虫营养价值的影响。实验结果发现,静止培养下轮虫 17 种氨基酸总量为 29.94% (干重),必需氨基酸含量为 15.37% (干重)。与之相比,12 L/min 充气培养和 13000 L/H 造流培养下轮虫氨基

酸总量分别减少了 18%和 14%，必需氨基酸含量分别减少了 22%和 15%。3 组均检测出 20 种脂肪酸，其中有 13 种脂肪酸存在显著差异 ($P<0.05$)。就淡水仔鱼的必需脂肪酸亚油酸、 α -亚麻酸和 γ -亚麻酸而言，静止组 α -亚麻酸含量占总脂肪酸的 19.37%，明显高于 13000 L/H 造流组 ($P<0.05$)，亚油酸含量占总脂肪酸的 3.36%，明显低于 12 L/min 充气组与 13000 L/H 造流组 ($P<0.05$)， γ -亚麻酸在 3 组间含量无显著差异 ($P>0.05$)。总体而言，静止方式培养轮虫比扰动方式培养轮虫的营养价值更高。

关键词：萼花臂尾轮虫；充气扰动；造流扰动；种群动态；营养价值

Abstract

The nutritional value of initial feeding determines the quality and survival rate of larvae. At present, artificial diets such as soybean oil, soybean milk and egg yolk are mainly used as the initial feeding in the breeding of freshwater larvae, but the feeding rate is low and a large number of larvae die during the breeding process. Rotifers are an important component of freshwater zooplankton, with high nutritional value, palatable size and high availability, they are the ideal opening bait for freshwater larvae. Currently, the yield of rotifer cultivation is low and the technology is not perfect in China, making it often difficult to meet the demand in production. Hydrodynamic disturbance is commonly present in natural water bodies, and research has reported that water disturbance has a significant impact on the feeding, growth, and reproduction of planktonic animals. However, there are few reports on the impact of water disturbance methods and intensity on the reproduction of rotifer populations. Rotifers have a wide range of feeding habits, Among them, the cultured rotifers mainly consisted of *Chlorella proteinae* and yeast.. In this study, the *Brachionus calyciflorus* was taken as the research object, *Chlorella pyrenoidosa* and baker's yeast were used as the diets for rotifers, the large-scale cultivation of rotifers was studied with different disturbance methods (aeration disturbance and flow disturbance) and different disturbance intensity. The main research findings are as follows:

(1) The effects of different disturbance modes and intensities on the feeding rate of *B. calyciflorus* were studied after they had fed on *C. pyrenoidosa*, at concentrations of 1×10^6 cells/mL, 5×10^6 cells/mL and 10×10^6 cells/mL. The experimental results showed that at three algal densities, the feeding rate of rotifers increased first and then decreased with the increases of disturbance intensity. In the aeration treatment group, the feeding rate of rotifer was higher at the aeration rate of 12 L/min, while the feeding rate of rotifer was higher at the flow rate of 8000 L/H and 13000 L/H in the flow treatment group. Under the same disturbance mode, the feeding rate of rotifers increases with the increase of algal density, reaching 10×10^6 cells/mL, the feeding rate of rotifers in each experimental group reached its maximum, with the resting group reaching 3.89×10^3 cells/ind.·h; The maximum feeding rate of the inflatable groups is 6.70×10^3 cells/ind.·h, significantly higher than the stationary group ($P < 0.05$); The maximum feeding rate of the flow making groups is 8.57×10^3 cells/ind.·h, significantly higher than the stationary and inflatable groups ($P < 0.05$). The experimental results indicate that water disturbance can significantly increase the feeding intensity of rotifers, and under the disturbance of flow making, rotifers can consume more food.

(2) Using *C. pyrenoidosa* as bait, the effects of different disturbance modes and intensities on the culture of rotifer *B. calyciflorus* were studied by means of population accumulation culture. The experimental results showed that compared with static culture and aerated culture, flow culture can significantly improve the reproductive speed of rotifers. The 13000 L/H flow making group has a good reproductive effect of rotifers, and the population density can reach 107 ind./mL within 7 days; However, the highest inflation culture was only 56 ind./mL, while static culture was only 23 ind./mL, both of which were significantly lower than flow culture ($P < 0.05$). This experiment shows that when *C. pyrenoidosa* is used as bait, water disturbance

can improve the cultivation effect of rotifers, and flow disturbance is the best disturbance mode for rotifer large-scale culture.

(3) The culture effects of different disturbance modes and intensity on *B. calyciflorus* were studied by population accumulation culture method with baker's yeast as bait. The experimental results found that in the inflatable treatment group, the highest population density of rotifers was 162 ind./mL at a 12 L/min inflation rate, while the population density of rotifers in all the flow making treatment groups exceeded 200 ind./mL, among them, the population density of rotifers reached 297 ind./mL at a flow intensity of 8000 L/H, which was significantly different from the inflatable treatment group ($P<0.01$). The results of this experimental study indicate that when using bread yeast as bait, the flow disturbance is beneficial to achieve high yield of rotifers.

(4) Using *C. pyrenoidosa* as bait, the effects of different disturbances modes on the nutritional value of *B. calyciflorus* were studied. The experimental results showed that in static cultivation, the total amount of 17 amino acids in rotifers is 29.94% (dry weight), and the necessary amino acid content is 15.37% (dry weight). Compared to this, the total amino acid content of rotifers was reduced by 18% and 14%, and the essential amino acid content was reduced by 22% and 15% respectively under 12 L/min inflatable culture and 13000 L/H flow culture. Twenty fatty acids were detected in all three groups, among which 13 fatty acids had significant differences ($P<0.05$). In terms of the essential fatty acids linoleic acid, α -linolenic acid and γ -linolenic acid of freshwater larvae. The content of α -linolenic acid in static group accounted for 19.37% of total fatty acids, which was significantly higher than that in the 13000 L/H group ($P<0.05$), while the content of linoleic acid accounts for 3.36% of the total fatty acids, which was significantly lower than that of 12 L/min group and 13000 L/H group ($P<0.05$). There was no significant difference in γ -linolenic acid content among the three groups ($P>0.05$). Overall, the nutrient levels of static cultured rotifers are higher than those of disturbed cultured rotifers.

Keywords: *Brachionus calyciflorus*; aeration disturbance; flow disturbance; population dynamics; nutritional value

目 录

第一章 绪论.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 轮虫的产业价值.....	1
1.2.1 轮虫简介.....	1
1.2.2 轮虫在水产养殖中的应用.....	2
1.3 影响轮虫种群培养的因素.....	3
1.3.1 环境因素对轮虫种群培养的影响.....	3
1.3.2 技术因素对轮虫种群培养的影响.....	5
1.4 水动力扰动对浮游生物的影响及在生产中的应用.....	7
1.4.1 水动力扰动对浮游植物的影响.....	7
1.4.2 水动力扰动对浮游动物的影响.....	7
1.4.3 水动力扰动在浮游生物生产中的应用.....	8
1.5 课题研究的目的意义和主要内容.....	9
1.5.1 课题研究的目的意义.....	9
1.5.2 课题研究的主要内容.....	9
1.5.3 技术路线.....	10
第二章 蛋白核小球藻与不同扰动方式对萼花臂尾轮虫摄食率的影响.....	11
2.1 引言.....	11
2.2 材料与方法.....	11
2.2.1 轮虫及饵料来源.....	11
2.2.2 实验设计.....	11
2.2.3 实验指标的测定和分析.....	13
2.3 结果与分析.....	13
2.4 讨论.....	16
2.5 本章小结.....	17
第三章 蛋白核小球藻与不同扰动方式对萼花臂尾轮虫种群动态的影响.....	18
3.1 引言.....	18
3.2 材料与方法.....	18
3.2.1 轮虫及饵料来源.....	18
3.2.2 实验设计.....	18
3.2.3 实验指标的测定和分析.....	18
3.3 结果与分析.....	20

3.3.1 蛋白核小球藻联合气扰扰动对轮虫种群动态及水体水质的影响	20
3.3.2 蛋白核小球藻联合流扰扰动对轮虫种群动态及水体水质的影响	23
3.4 讨论	27
3.4.1 蛋白核小球藻联合不同扰动方式对水体水质的影响	27
3.4.2 蛋白核小球藻联合不同扰动方式对轮虫种群动态的影响 ..	28
3.5 本章小结	29
第四章 面包酵母与不同扰动方式对萼花臂尾轮虫种群动态的影响	30
4.1 引言	30
4.2 材料与方法	30
4.2.1 轮虫及饵料来源	30
4.2.2 实验设计	30
4.2.3 实验指标的测定和分析	30
4.3 结果与分析	30
4.3.1 面包酵母联合气扰扰动对轮虫种群动态及水体水质的影响	30
4.3.2 面包酵母联合流扰扰动对轮虫种群动态及水体水质的影响	33
4.4 讨论	36
4.4.1 面包酵母联合不同扰动方式对水体水质的影响	36
4.4.2 面包酵母联合不同扰动方式对轮虫种群动态的影响	37
4.5 本章小节	39
第五章 蛋白核小球藻与不同扰动方式对萼花臂尾轮虫营养价值的影响	40
5.1 前言	40
5.2 材料与方法	40
5.2.1 轮虫及饵料来源	40
5.2.2 实验设计	40
5.2.3 实验指标的测定好分析	40
5.3 结果与分析	41
5.3.1 不同扰动方式对轮虫氨基酸组成及含量的影响	41
5.3.2 不同扰动方式对轮虫脂肪酸组成及含量的影响	42
5.4 讨论	43
5.5 本章小结	44
第六章 结论与展望	45
6.1 结论	45
6.2 展望	46

参考文献.....	47
-----------	----

第一章 绪论

1.1 研究背景

水产品营养价值高，富含丰富的优质蛋白和其它关键微量营养元素，是人类必不可少的食物之一^[1]。我国是世界上水产养殖和消费量最大的国家，据《2022 中国渔业统计年鉴》^[2]数据显示：2021 年，我国水产品总产量 6690.29 万吨，其中，养殖产量 5394.41 万吨，捕捞产量 1295.89 万吨。在养殖产量中，淡水养殖产量 3183.27 万吨，海水养殖产量 2211.14 万吨。可见，水产养殖在我国水产品供给中居于核心地位，其中淡水养殖是我国居民养殖水产品的主要来源。

为满足不断增长的需求，水产养殖在技术创新方面不断发展，传统养殖业逐渐向现代养殖业转换，对水产养殖的领域研究也逐渐细化。水产养殖过程分为育苗、养殖和收获三个阶段。目前，在养殖和收获两个阶段，技术几近成熟，但育苗阶段的设施和技术还相对较弱^[3]。对于渔民来说，获得充足、健康的幼苗十分重要。在孵化场的幼苗生产中，主要关注的是持续供应幼苗的活食，轮虫是最适合作为幼苗活食的浮游生物^[4]。

1.2 轮虫的产业价值

1.2.1 轮虫简介

轮虫（Rotifer）是一类多细胞动物，其个体较小，一般体长为 100-500 μm ，身体由头、躯干和足三部分组成。具有区别于其它水生动物的三大典型特征：（1）前端扩大呈圆盘状，形成具有纤毛的头冠；（2）消化道咽喉部膨大，形成肌肉发达的咀嚼囊，内藏咀嚼器；（3）体腔两侧有一对原肾管，其末端包含焰茎球（图 1-1）^[5]。

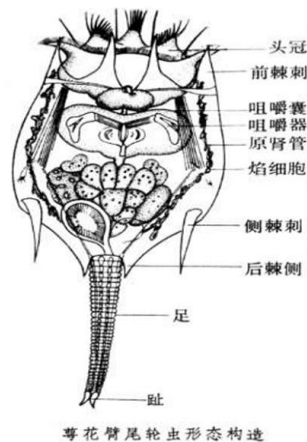


图 1-1 蓴花臂尾轮虫形态构造^[5]

Figure. 1-1 The modal conformation of *Brachionus calyciflorus*

现有已报道的轮虫 2000 多种，依据其生殖方式和生活习性分为三个总纲：营有性生殖的尾盘纲（Seisonidea）、营孤雌生殖的蛭态纲（Bdelloidea）、孤雌生殖与有性生殖交替出现的单巢纲（Monogononta）。其中，单巢纲轮虫种类最多，目前已报道 1500 余种^[6]。单巢纲轮虫具有两种雌体类型：非混交雌体（amictic female）与混交雌体（mictic female）。在环境适宜、食物充足时，非混交雌体产出非混交卵，非混交卵则继续孵化出

非混交雌体幼体；在环境突变或食物匮乏时，单巢纲轮虫则转变为有性繁殖，产出混交雌体。若混交雌体不受精，则产出雄性个体，可与非混交雌体进行有性生殖；当混交雌体受精时，则产生可抵御恶劣环境的休眠卵，休眠卵在环境适宜时会重新萌发并进行孤雌生殖以延续种群繁殖^[7]。

轮虫在天然水体中广泛分布^[8]，作为水生食物链的重要一环，轮虫可以将初级生产者藻类所固定的能量传递给更高的营养级，在水域生态系统的物质和能量流动中发挥着重要的作用（图 1-2）^[9]。轮虫在海水和淡水中均能生存，其典型代表种类有海水中的褶皱臂尾轮虫（*Brachionus plicatilis*）和淡水中的蓼花臂尾轮虫（*Brachionus calyciflorus*）^[10]。其中，褶皱臂尾轮虫的研究较为深入，被广泛应用在海水鱼、虾、蟹的育苗阶段。但褶皱臂尾轮虫在淡水中不易培养，无法应用于淡水渔业的生产上。

本研究中选用的研究对象为淡水中最为常见的蓼花臂尾轮虫，隶属轮虫动物门（Rotifer）、单巢纲（Monogononta）、游泳目（Ploima）、臂尾轮虫科（Brachionidae）、臂尾轮虫属（*Brachionus*）。其营养全面，种群繁殖能力强，是淡水轮虫规模化培养的首选种类^[11]。

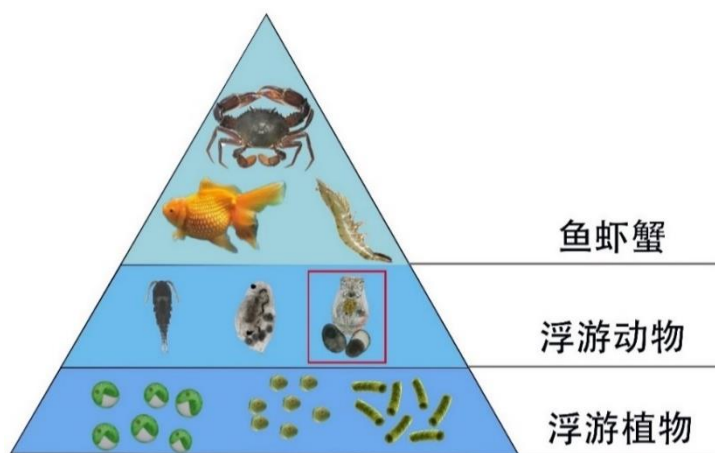


图 1-2 轮虫在水生食物链中的作用

Figure. 1-2 The role of rotifers in the aquatic food chain

1.2.2 轮虫在水产养殖中的应用

从营养学角度，一般将鱼类早期生活史分为内源性营养期、混合营养期和外源性营养期三个阶段^[12]。其中混合营养期是鱼类生命早期阶段的关键时期，此时，新孵化的仔鱼必须在其内源性营养储备完全耗尽之前找到并捕获食物，否则，仔鱼会进入不可逆转的饥饿状态，此阶段鱼苗的死亡率最高^[13, 14]。

生产上，鱼苗的存活率差异很大，较低的只有 10%-15%，较高的则达 90%以上^[15]。虽然放养密度、水温等是影响鱼苗成活率的重要因素，但决定鱼苗成活率的关键因素往往是在下塘后开口摄食的前 3 天，鱼苗在此期间获得营养丰富开口饵料，对其机体的正常发育、免疫力的形成十分重要^[16]。轮虫是大多数经济鱼类的优质开口饵料，其优势主要体现在以下几个方面：

（1）适口性强：大部分仔鱼的口裂较小（ $220 \times 290 \mu\text{m}$ ）、牙结构发育不完善，仅依

靠简单的吞咽完成摄食，因此饵料尺寸必须小于仔鱼口裂尺寸，否则仔鱼无法顺利摄食^[17]。几种常见的生物饵料大小分别为：轮虫 $166 \times 230 \mu\text{m}$ ；小型枝角类 $600 \times 1800 \mu\text{m}$ ；卤虫无节幼体 $275 \times 350 \mu\text{m}$ ^[18]。可见，轮虫是最为适口的生物饵料。

(2) 可得性高：一方面，仔鱼是视觉摄食者，因此优选移动的活体饵料^[19]，另一方面，仔鱼的鳍发育不完全，游动能力较弱 ($16\text{-}29 \text{ mm/s}$)，只能捕捉到游泳能力相对较弱的浮游动物^[17]。几种活体饵料的运动速度分别是：轮虫 0.2 mm/s ；枝角类 15 mm/s ；桡足类 50 mm/s ^[20]。枝角类与桡足类的主动游泳速度较快，容易在水体中集群出现，不利于仔鱼摄食，而轮虫游泳速度较慢，在水体中分布较为均匀。因此，对仔鱼而言，轮虫的可得性最大。

(3) 营养丰富：开口饵料的营养价值直接决定了仔鱼的成活率。轮虫体内蛋白质含量约占其干重的 $28\%\text{-}63\%$ ，所含氨基酸种类齐全；脂类占 $9\%\text{-}28\%$ ，含多种仔鱼所必需的不饱和脂肪酸，能够保证仔鱼生长发育的营养需求^[21,22]。研究表明，以轮虫作为开口饵料，仔鱼的成活率高达 90% 以上，而投喂其它开口饵料时，仔鱼的成活率一般在 $20\%\text{-}70\%$ 范围内^[23]。

(4) 育苗水质好：以豆浆、鸡蛋黄和豆油等作为开口饵料，长期积累的残余饵料容易产生对仔鱼有害的氨氮和硫化物，造成幼苗成批死亡。而轮虫可在育苗池中生长繁殖，不仅可以保持开口饵料的持续供给，还可以滤食水体中的有机颗粒，起到净化水质的作用^[24]。

1.3 影响轮虫种群培养的因素

影响轮虫规模化培养产量的因素包括环境因素与技术因素两个方面。轮虫的培养效果主要依赖于适宜的培养环境，培育环境必须有利于轮虫的孤雌繁殖，以便非混交雌体能够连续且快速地产生产非混交雌卵，影响轮虫培养效果的环境因素主要包括饵料、温度、光照、氨氮浓度和溶解氧浓度等。此外，轮虫的培养效果也依赖于从业者的培养管理经验，主要包括接种密度、日换水率、培养方式和日常观察等方面。

1.3.1 环境因素对轮虫种群培养的影响

(1) 饵料对轮虫种群培养的影响

饵料为轮虫提供可吸收的能量与营养物质以维持个体的生长与繁殖^[25]，轮虫食性较为广泛，微藻、酵母、豆浆和细小的有机碎屑等均可以作为轮虫的饵料，其中，轮虫规模化培养中主要用到的饵料有微藻、酵母和细菌^[26,27]。

微藻是轮虫规模化培养中最常用的饵料，但并不是所有微藻都适合用于轮虫规模化培养。冯蕾等^[28]研究了小新月菱形藻、蛋白核小球藻、金藻、扁藻和牟氏角毛藻 5 种藻类对轮虫摄食生态的影响，结果表明，轮虫对蛋白核小球藻的摄食率最高，达到 $2.5\text{-}3.0 \times 10^3 \text{ cells/ind.}\cdot\text{h}$ 。蛋白核小球藻不仅利于轮虫摄食，并且营养较为丰富，可为轮虫繁殖提供充足的能量。Sun 等^[29]研究表明，与其它饵料相比，以蛋白核小球藻为食的轮虫具有更高的净生殖率、产卵量与更长的寿命。微藻种类不同，营养成分及含量有所差别，单一种类微藻投喂会造成轮虫营养单一，有时无法满足仔鱼多样化的营养需求，因此，

生产中常将蛋白核小球藻、球等鞭金藻、紫球藻等多种营养丰富的藻类混合投喂轮虫,以实现轮虫营养的均衡,进而提高仔鱼的成活率^[30,31]。此外,轮虫种群增长率与饵料密度之间存在相关性,藻的投喂量并非越大越好,关于最适藻密度,以往的研究结果则具有较大分歧。同样以蛋白核小球藻为食物,席貽龙等^[32]研究认为,轮虫培养的最适饵料浓度为 $1.5-3 \times 10^6$ cells/mL,此浓度下,轮虫生殖期历时长达 179-198 h,且平均每个雌体可产幼体 2 个以上;王金秋等^[33]研究则发现,饵料浓度为 $45-60 \times 10^6$ cells/mL 时轮虫种群瞬时增长率接近 2.75 d^{-1} ,明显高于其它饵料浓度,因此他认为蛋白核小球藻密度为 $45-60 \times 10^6$ cells/mL 是轮虫规模化培养的最适饵料密度。可见,不同研究者之间的研究结果差异巨大,造成这些分歧的原因可能包括轮虫密度、实验条件、藻的状态和持续时间等多种因素不同所致。

面包酵母供应稳定且成本低廉,在微藻供应不足时,可作为临时性饵料培养轮虫。实践表明,面包酵母在水中存活率低,以面包酵母作为食物时应坚持少量多次的原则,以投喂量 0.6-1.5 g/百万轮虫·天,投加次数 6-8 次/天为宜^[34]。此外,单独使用面包酵母培养轮虫,轮虫营养匮乏,运用到水产育苗中容易导致仔鱼大量死亡^[35]。因此,使用面包酵母培养的轮虫在投喂仔鱼前需使用营养强化剂进行营养强化,常用的强化剂有微藻、鱼肝油和南极大磷虾粉等,营养强化时间以 18-24 h 为宜^[35-37]。当前,虽然实验室条件下以面包酵母培养轮虫可取得较好的效果,但在实际应用中,轮虫培养时间短,产量低,尚有很大的研究空间。

许多细菌细胞内蛋白质含量高且含有多种维生素等营养物质,其中维生素 B₁₂ 被认为是促进轮虫繁殖的一类微量有机物质^[38]。近年来,关于细菌在轮虫的培养中应用的报道逐渐增多,其中报道较多的是光合细菌。王鉴等^[39]在蛋白核小球藻藻液中添加 250 ppm 的光合细菌,发现轮虫种群增长率提升了 6%;王金秋等^[40]则在酵母液中添加了 1%-10% 的光合细菌,发现轮虫产量可提高 4-5 倍;但王巍^[41]的研究则表明,单纯投喂光合细菌培养轮虫,轮虫种群则不见增长;杨质楠等^[42]分析认为,光合细菌对轮虫培养的促进作用主要是通过改善水质实现的。因此,生产上,通常将光合细菌视为改善水质的辅助性饵料使用,而避免将光合细菌做为主体饵料培养轮虫。

(2) 温度对轮虫种群培养的影响

温度的变化与轮虫种群动态密切相关。马杰等^[43]研究发现,当温度较高时(30℃),轮虫会将较多的能量用于代谢需求;而当温度较低时(15℃),轮虫则将较多的能量用于侧棘刺的形成和生长。这表明,高温与低温都会消耗轮虫用于生殖的能量,不利于轮虫规模化培养。冯蕾等^[28]研究则表明,温度对轮虫的摄食活动具有影响,在 15-35℃ 范围内,轮虫的摄食强度随着温度的上升而先增加后降低,最适摄食温度为 25℃。能量的消耗与摄食强度的变化影响着轮虫的培养效果。董婧等^[44]研究发现,在 20-30℃ 范围内,轮虫种群密度峰值随温度升高而先上升后降低,且峰值出现时间也呈逐渐前移的趋势。汪蝉等^[45]则研究发现,在 24-32℃ 范围内,随着温度的升高,轮虫的发育将会加速,繁殖期与寿命则会缩短,因此内禀增长率会随着温度的升高而升高,但繁殖能力并不因此提高。综上所述,温度是影响轮虫的规模化培养效果的重要环境因素,若想实现高密

度与延长培养时间, 25 °C为最适培养温度。

(3) 光照对轮虫种群培养的影响

光照对轮虫培养效果的影响是间接的, 其主要对饵料产生直接影响^[26]。研究表明, 选用酵母投喂轮虫时, 不同光照条件下轮虫的总生殖量与轮虫平均寿命相差不大^[46], 而用微藻培养轮虫时, 光照则可以促进轮虫的繁殖^[47]。分析认为, 一方面, 光照可促进藻的光合作用释放氧气, 供轮虫呼吸, 改善水质状况, 进而促进了轮虫的繁殖; 另一方面, 光照下也有利于藻的生长, 可以补充培养过程中的饵料消耗, 进而间接提高轮虫的产量。有研究表明, 在以微藻为饵料时, 控制光照强度为 4400-10000 Lux, 光照周期为 L: D=18: 6 的光照环境有利于实现轮虫产量的最大化^[48]。

(4) 氨氮浓度对轮虫种群培养的影响

轮虫培养过程中排泄物的积累与饵料的分解将导致培养水体氨氮浓度升高, 氨氮浓度是影响轮虫培养稳定性的重要因素^[41]。程媛媛等^[49]分析认为, 高浓度的氨氮会破坏轮虫的生物膜, 进而导致轮虫大量死亡。Sananurak 等^[50]实践表明, 轮虫对氨氮的耐受范围为 6-10 mg/L, 但一般要控制氨氮浓度在 5 mg/L 以内才可以保证培养的稳定性。在生产中, 随着培养时间的延长, 轮虫排泄物及饵料分解使水体氨氮浓度快速升高, 工作人员常采用换水、充气等措施来降低氨氮浓度, 延长培养时间^[41]。

(5) 溶解氧浓度对轮虫种群培养的影响

溶解氧浓度是影响轮虫培养稳定性的另一重要环境因素^[41]。轮虫对溶解氧的适应范围较广, 当水体溶解氧量在 0.40-0.48 mg/L 时, 轮虫卵便可正常萌发^[51], 溶解氧范围 2-7 mg/L 时轮虫都能正常繁殖^[52], 致死溶解氧界限为 0.38 mg/L^[41]。生产中, 由于饵料的投加, 其耗氧量有时甚至远高于轮虫, 需要补充氧气, 充气量的控制由从业者根据经验调整。根据经验, 一般要在饵料投加初期加大充气量, 防止溶解氧的短缺。但充气量过大则会在水面形成大量气泡, 气泡中携带大量轮虫, 气泡破裂后, 轮虫便贴壁而死^[53]。目前, 关于溶解氧水平对轮虫种群密度的研究较少, 诸多文献也仅以“适当充气”描述^[54], 关于不同溶解氧水平对轮虫培养的影响还有待于进一步研究。

1.3.2 技术因素对轮虫种群培养的影响

(1) 接种密度对轮虫种群培养的影响

接种密度也是轮虫规模化培育中需要关注的问题。微藻生命周期较长且不会污染水质, 因此, 选择微藻作为培养饵料时, 对接种密度没有明确要求。而酵母在水中存活率较低, 当以酵母为轮虫饵料时, 酵母的日投喂量根据轮虫总量计算所得, 若轮虫接种密度较低, 则酵母投喂量较少, 轮虫很难滤食到足够的食物。研究表明, 以酵母为饵料时, 轮虫接种密度应在 30 ind./mL 左右才能保证后续培养正常进行^[34]。

(2) 日换水率对轮虫种群培养的影响

轮虫培育期间, 不断积累的排泄物、饵料残余以及轮虫残体的分解将导致水质恶化, 影响轮虫的生长繁殖, 固定换水有助于缓解培育系统的水质压力。在生产中, 换水与采收一般同时进行。有研究认为, 日换水率(日采收率)为 20%时轮虫能达到更高的密度,

过量的换水将会稀释轮虫的密度，导致增长率跟不上稀释率^[55]。刘英霞等^[56]则发现，轮虫的繁殖速度与种群密度成反比，通过日常采收，控制种群密度在 100 ind./mL 时，可以兼顾轮虫的繁殖速度与种群数量问题，保证轮虫的持续供应。总体而言，换水率可以根据实际情况具体调整，但不宜超过 20%。

(3) 培养方式对轮虫种群培养的影响

根据轮虫的培养与收获特点，培养方式可分为一次性培养，半连续化培养和连续化培养^[35]。一次性培养通常在土池中进行，渔民向土池施肥与投饵后，轮虫经过 4-7 天的培养即全部采收，再进行下一轮培养。在生产中，为了免受外界环境的影响，一些养殖单位会利用闲置的温室大棚进行生产（如图 1-3a）。土池培养投资少且操作简单，但其种群密度通常只能维持在 10-100 ind./mL，很难满足实际需求^[57]。半连续培养法通常在水泥池或较大的水箱中进行（如图 1-3b, 1-3c）^[58,59]，该方法每天排出一定体积的培养水收获轮虫，并用相同体积的藻液补充。此方法的优点是粗放培养，减少一定的工作量；缺点是易于滋生原生动物，与轮虫产生竞争关系。在生产上，半连续培养可维持轮虫密度在 100-300 ind./mL^[60]。连续化培养则在较为精密的设备中进行，Mangesh 等^[61]设计了一套循环养殖系统用于轮虫的连续化生产（如图 1-3d），该系统包含微藻培养、轮虫培养、水处理和收获四个单元。轮虫培养单元定期排除一部分养殖水以保持水质，排出的水体经过滤、紫外消毒等净水措施处理后重新用于微藻培养，通过这些措施，可以将系统中产生的碎屑减少到最低限度，并且减少了养殖废水的排放。在此培养系统中，每天可收获轮虫 380 ind./mL，产量较大。但是，连续化培养运行成本过高，需要用到诸如恒化器、恒浊器等设备，对于一般育苗场不太适用。目前，我国轮虫的供应主要来源于一次性培养和半连续化培养^[52]，国内诸多研究也围绕一次性培养与半连续化培养进行。

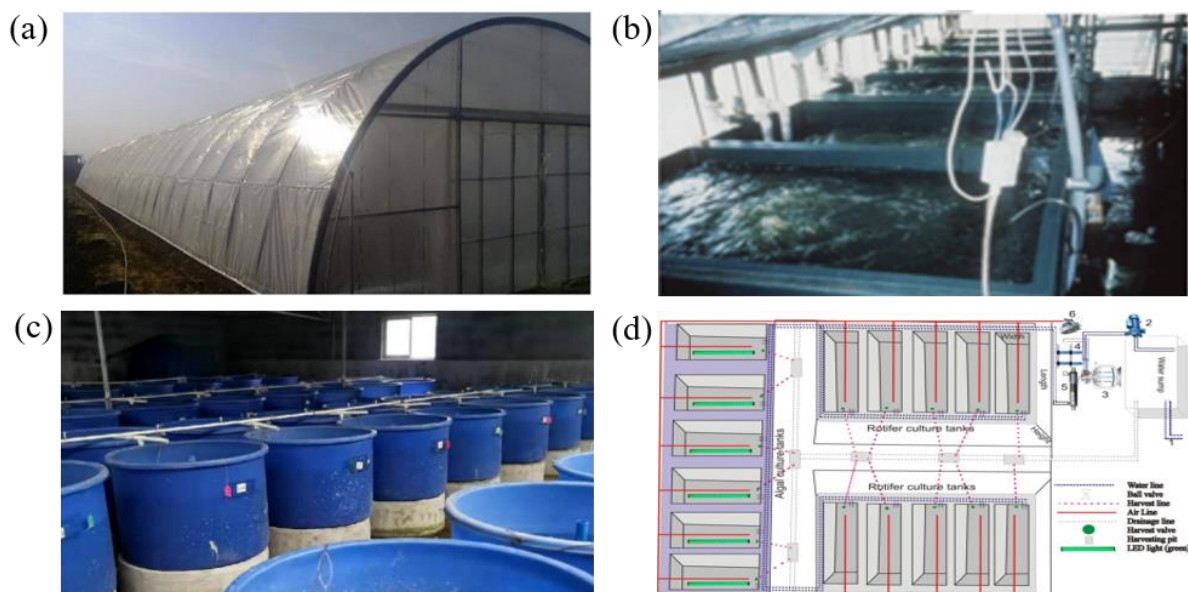


图 1-3 温室大棚培养 (a) ^[62]；水泥池培养 (b)；水箱培养 (c) ^[63]；循环养殖系统示意图^[64]
Figure. 1-3 Greenhouse culture (a); Cement pool culture (b); Tank culture (c); Schematic diagram of cyclic culture system system (d)

(4) 日常观察

日常观察内容包括轮虫的运动能力、抱卵和摄食情况。轮虫的运动能力可通过肉眼观察,具体操作为取样品于透明瓶内,对光观察,若轮虫运动较快、趋光性较强则表明轮虫生长较好。轮虫抱卵和摄食情况则在显微镜下观察,处于对数增长期的轮虫摄食活动活跃,肠胃饱满且可同时抱卵 2-3 个,若不抱卵或抱卵较少则表明环境恶化,需及时收获轮虫以避免轮虫大量死亡^[65, 66]。

1.4 水动力扰动对浮游生物的影响及在生产中的应用

自然水体广泛受到外部环境的影响产生水动力扰动(简称扰动),研究表明,扰动是影响天然水体理化性质及水生生物生长的重要因素^[67, 68],近年来,已有越来越多的研究表明扰动对浮游生物具有直接或间接的影响。

1.4.1 水动力扰动对浮游植物的影响

目前,已有较多学者报道了扰动对浮游植物的生长和生理活动的影响,主要包括以下 4 个方面:(1)促进营养盐吸收。扰动可以促进营养物质向藻类细胞的转运,从而促进营养物质的摄取速率,并提高生长速率^[69]。但是这种促进作用是有限的。研究表明,低强度的扰动($\epsilon=10^{-7}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-3}$)有利于羊角月牙藻对营养盐的吸收,藻的增长率提升了近 300%^[70],而在较高强度的扰动下(300 rpm),铜绿微囊藻对磷的吸收能力和亲和力下降,导致藻生长受到抑制^[71]。(2)提高光合作用。扰动可以避免部分藻类长期处于黑暗环境,使得所有藻类都能获得充足的光照,提高了藻类的光合作用效率,进而促进藻类生长^[72]。(3)驱散有毒代谢产物。Wang 等^[73]的研究表明,随着扰动强度的增强,微藻的代谢产物二甲基硫化物的浓度急剧下降,微藻的生长环境得到改善。(4)机械损伤。当水体扰动达到一定强度后,会对藻细胞产生机械损伤作用,不利于藻类生物量的保持^[74]。不同微藻对扰动的耐受性不同,微藻细胞壁的尺寸和刚度是决定损伤程度的关键因素^[75, 76]。综上所述,水动力扰动对浮游植物的影响可概括为:低强度的扰动可以促进浮游植物对营养盐的吸收、提高光合作用、驱散有毒副产物,进而促进浮游植物的生长;而高强度的扰动将阻碍浮游植物对营养成分的吸收,并对微藻产生损伤作用,抑制浮游植物的生长。

1.4.2 水动力扰动对浮游动物的影响

水动力扰动对浮游动物的影响包括改变浮游动物的行为、调整群落结构以及改变捕食效率三个方面,具体表现为:

(1)水动力扰动改变浮游动物的行为。大部分浮游动物都是运动的,这种运动由它们有限的游泳能力和周围水体的流动共同塑造^[77, 78]。Tanaka 等^[79]调查发现,在水面上层(<10 m),桡足类与枝角类的丰度随着扰动强度的增加而降低。Michalec 等^[80]研究则表明,一些浮游生物会主动调节其运动,以提高它们在扰动环境中的生存能力,如桡足类可通过第一触角上的机械感受器的弯曲来感受周围水流的变化,当受到扰动刺激时,其将发生逃逸反应,逃逸方向与涡流方向一致,逃逸速度也随着扰动强度的增强而增加。

而在体型较小的轮虫群落中，却没有发现这样的行为。总体而言，当水体产生扰动时，个体较大的桡足类和枝角类将会逃离，躲到静水处，而个体较小的轮虫只能“随波逐流”。

(2) 水动力扰可以调整浮游动物的群落结构。Sluss 等^[81]发现，在许多水流湍急的河流，浮游动物中以轮虫为主导，桡足类与枝角类数量较少，而在水面较为平静的湖泊，却常以枝角桡足类为主导。Zhou 等^[82]发现，随着扰动实验的进行，浮游生物群落很快由大型甲壳类动物主导转变为轮虫主导，分析认为，这是水动力扰动对浮游动物具有剪切伤害引起的。水体扰动对浮游动物的伤害与最小涡流大小（即：科尔莫戈罗夫尺度）有重要关系，在天然水体中，科尔莫戈罗夫尺度大小通常在毫米级别，与许多枝角类、桡足类大小相接近，导致这些大型浮游动物容易受到水流的剪切作用。因此，在湍急的水体中，体型较大的枝角类与桡足类往往容易被体型较小的轮虫取代。

(3) 水动力扰动影响浮游动物的捕食效率。Mackenzie 等^[83]分析认为，扰动可以提高浮游动物与浮游植物之间的接触率，进而提高浮游动物的摄食率。但这种促进作用存在圆顶效应，即低强度扰动下，增加的扰动强度会提高浮游动物摄食，而在高强度扰动下，增加的扰动会降低浮游动物检测或捕获食物的能力，并且还会给较大的枝角类与桡足类带来伤害^[84]。

关于扰动对轮虫影响的研究相对较少，且相关报道既有积极也有消极的。Miquelis 等^[85]研究发现，在静止环境中轮虫普遍抱卵 1-2 个，处于扰动环境中的轮虫抱卵明显减少，甚至不抱卵，因此他认为扰动不利于轮虫的繁殖。与之相反，Tamarad 等^[81]发现，轮虫在高度扰动的环境中更具竞争优势并逐渐成为优势门类，Rodriguez 等^[86]也发现，大风过后剧烈扰动的水体，总伴随着轮虫的数量的快速增加，因此他们二人认为扰动对轮虫的繁殖具有促进作用。Horppila 等^[87]则分析认为，由于轮虫可作为枝角类与桡足类的食物，当水体产生高强度扰动时，枝角类与桡足类或是逃逸或是死亡，轮虫因失去天敌而大量繁殖，因此他认为扰动主要对轮虫产生的影响是间接的。总的来说，自然环境中轮虫种群密度的影响因素较多，目前尚没有达成扰动对轮虫影响的统一结论。

1.4.3 水动力扰动在浮游生物生产中的应用

水动力扰动对浮游生物的影响最初由生态研究工作者提出，目的是为了探究不同藻类的临界流速，为富营养化水体的治理提供科学依据^[88]。许多微藻培养工作者受到相关研究的启发，对水动力扰动在微藻培养中的应用进行了探索。王艳等^[89]研究了充气与造流两种扰动方式对球形棕囊藻的产量影响，研究发现，经过 12 天的培养，造流培养的产量更高，是充气培养 1.33 倍，表明造流扰动对微藻的培养效果更好。冷晓飞等^[90]进而研究了不同造流强度对小新月菱藻产量的影响，研究发现，相比于静止培养，2000、3000 和 5000 L/H 造流强度下小新月菱藻产量分别提升了 53.1%、74.6%和 93.1%，表明高强度造流更有利于微藻的繁殖。此外，王楠等^[91]则研究的不同扰动时长对荒漠蓝藻产量的影响，结果发现，每日造流 6 h 下荒漠蓝藻的产量最高，分别是 3 h 和 12 h 扰动时长产量的 1.10 和 1.12 倍。Demirell 等^[92]则进一步将充气 and 造流两种扰动方式结合起来培养硅藻，研究发现，相比于充气扰动，充气联合造流扰动培养下硅藻的产量提高了 18%，

不饱和脂肪酸的相对百分含量也提升了 6.23%。综上，在微藻的培养中，造流培养比充气培养效果更好，且培养效果与造流强度及造流时间相关。

虽然诸多学者关于天然水体中水动力扰动对轮虫群落结构的影响尚未达成统一的结论，但在轮虫的培养中，已有研究发现不同扰动方式和扰动强度对轮虫种群动态具有影响，如江巍^[41]研究中发现两管充气组轮虫的平均增长率比单管充气组轮虫平均增长率增高出 16.13%，刘毅^[26]的研究中也发现水体扰动时轮虫增长率较高。遗憾的是，二者研究均未做出深入探讨，关于不同扰动方式和扰动强度对轮虫培养效果的影响缺乏量化研究。

1.5 课题研究的目的意义和主要内容

1.5.1 课题研究的目的意义

我国淡水养殖面积广、产量大，共有各类育苗场近千个，育苗水体数十万立方。在水产育苗过程中，开口饵料的选择对仔鱼的发育和免疫力的形成十分重要。当前，许多养殖单位常用的开口饵料有豆油、豆浆、蛋黄以及相关添加剂，但这些饵料营养价值低、缺乏活性物质且不易消化，容易造成仔鱼生长缓慢甚至大量死亡。萼花臂尾轮虫是最优质的淡水仔鱼开口饵料，但目前，我国轮虫供应多以土池、水泥池培养为主，其产量较低、生产周期过长，已无法满足水产育苗的需要，水产育苗行业急需一种快速、高效的轮虫培养方法。

水动力扰动有望促进轮虫的生长繁殖，但不同扰动方式和不同扰动强度对轮虫生长繁殖的影响还缺乏量化研究。本研究从生产和实用角度出发，以萼花臂尾轮虫为研究对象，在两种主要饵料食物（蛋白核小球藻和面包酵母）下，探索不同扰动方式（充气扰动和造流扰动）和扰动强度对轮虫规模化培养的影响，从而筛选出适宜轮虫规模化培养的扰动方式与扰动强度，以提高轮虫培养产量。在实际应用中，可以起到去除微藻并为仔鱼提供开口饵料的作用，具有环境价值和经济价值的双重意义。

1.5.2 课题研究的主要内容

本研究的主要思想是通过扰动增加萼花臂尾轮虫与食物的接触概率，以此提高轮虫的摄食率，进而提高轮虫的培养产量。详细工作内容如下：

（1）以蛋白核小球藻为轮虫饵料，通过调节充气量与造流量，探讨不同扰动方式和扰动强度对萼花臂尾轮虫摄食率的影响。计数轮虫密度和蛋白核小球藻密度，根据公式计算轮虫摄食率。

（2）以蛋白核小球藻为轮虫饵料，研究不同扰动方式和扰动强度对萼花臂尾轮虫种群动态的影响。主要实验参数包括藻密度、溶解氧和氨氮三项水质指标及萼花臂尾轮虫种群密度、种群抱卵率和种群增长率三项种群动态指标。

（3）以面包酵母为轮虫饵料，研究不同扰动方式和扰动强度对萼花臂尾轮虫种群动态的影响。主要实验参数包括溶解氧、氨氮两项水质指标和萼花臂尾轮虫种群密度、种群抱卵率和种群增长率三项种群动态指标。

(4) 以蛋白核小球藻为轮虫饵料，研究不同扰动方式对萼花臂尾轮虫的营养价值的影响。实验参数包括轮虫氨基酸含量和脂肪酸相对含量两项营养指标。

1.5.3 技术路线

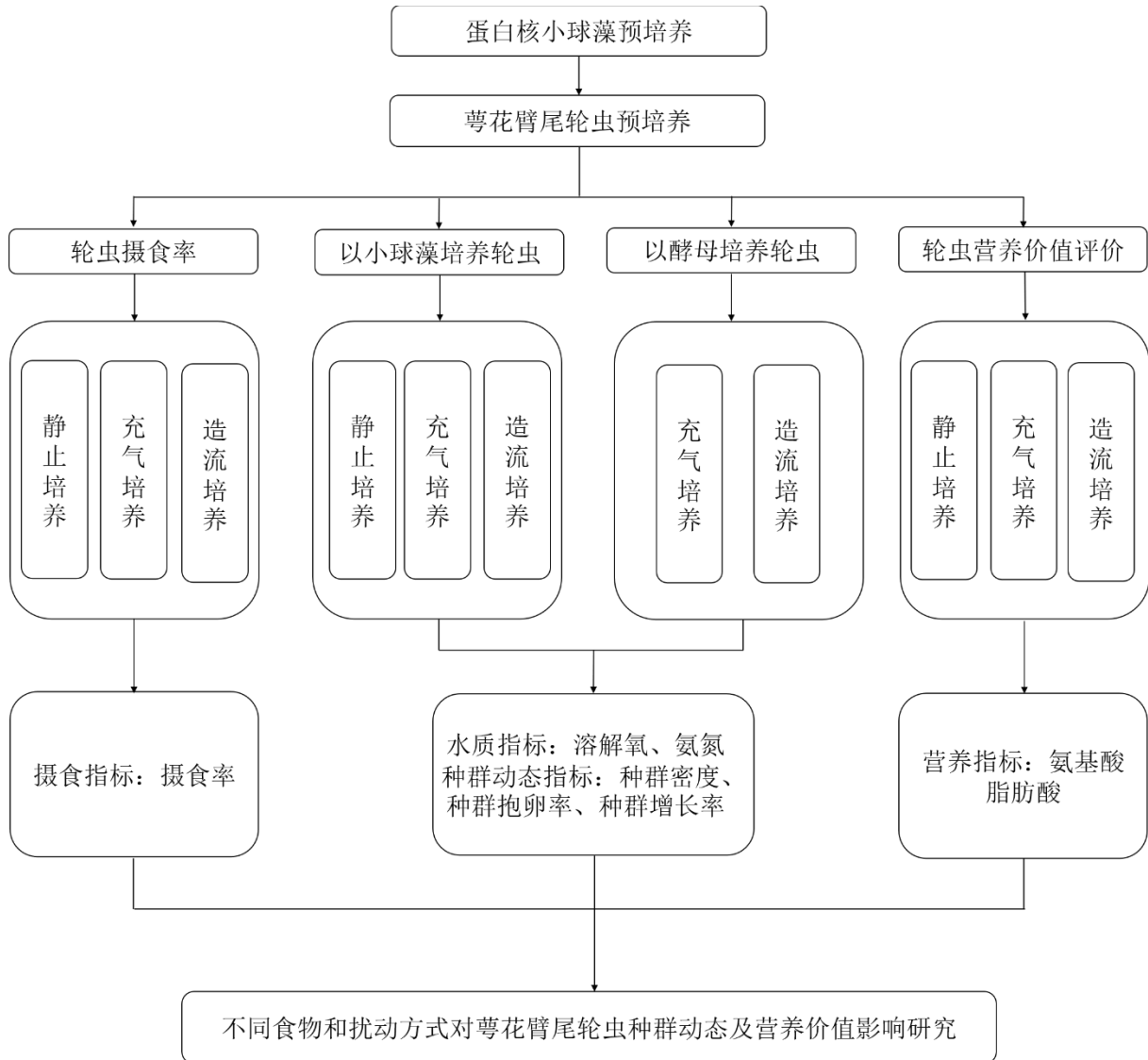


图 1-4 技术路线图

Figure.1-4 Diagram of technical route

第二章 蛋白核小球藻与不同扰动方式对萼花臂尾轮虫摄食率的影响

2.1 引言

萼花臂尾轮虫是一类滤食性浮游动物，其摄食强度决定了个体能否获得充足的能量和营养物质进行生长繁殖^[25]。当前，关于轮虫的摄食生态的研究主要围绕食物种类、温度和光照等环境因子进行^[28, 93, 94]，研究已相对成熟。有研究报道，水体扰动可以增加浮游动物与浮游植物的接触率，进而提高浮游动物的摄食率^[95]，但关于不同扰动方式和扰动强度对轮虫摄食生态的影响缺乏量化研究。

对于相同浓度、相同大小的饵料，轮虫更倾向于摄食藻类；且相较于面包酵母与光合细菌，蛋白核小球藻生命周期较长、易于培养且营养丰富，是轮虫规模化培育的首选饵料^[96-98]；充气扰动、机械造流与液体回流是人工扰动水体的主要方式，其中充气扰动与机械造流在水产养殖中应用较为普遍^[99]。基于以上两个因素，本实验在不同蛋白核小球藻密度下，研究不同充气强度和不同造流强度对萼花臂尾轮虫摄食率的影响。研究可为轮虫规模化培育提供技术参考，也可为水域生态系统浮游生物的生态学研究做出补充。

2.2 材料与方法

2.2.1 轮虫及饵料来源

本实验在中国水产科学研究院淡水渔业研究中心进行，实验所用蛋白核小球藻（FACHB-10）与萼花臂尾轮虫均由中国水产科学研究院淡水渔业研究中心提供。

蛋白核小球藻在微藻培养车间进行预培养，培养液为“水生四号培养液”^[100]（配方见表 2.1），培养容器为 5 L 塑料桶，温度为 24-26 °C，设置昼夜比 L:D=12:12，光照强度为 1250 Lux，定期摇晃，一日两次，使蛋白核小球藻保持悬浮。蛋白核小球藻大规模培养于室外进行，培养容器为 70 L 塑料桶，培养用水为基地自来水，水体经过 1 天时间的充分曝气以去除水中残余氯气，光照方式为自然日光。

萼花臂尾轮虫在蛋白核小球藻培养车间进行预培养，培养容器为 5 L 塑料桶，预培养期间定期投加蛋白核小球藻为轮虫食物，培养环境与蛋白核小球藻预培养环境一致。轮虫经扩大培养以满足实验所需后，在中国水产科学研究院淡水渔业研究中心厂房内开展实验，实验期间通过电加热棒控制水温为 24-26 °C。

2.2.2 实验设计

实验设置环境因子包括：（1）扰动因子，扰动因子包括充气扰动与造流扰动，每种扰动设 4 个扰动强度。4 个充气组充气量分别为 6 L/min、12 L/min、18 L/min、24 L/min，4 个造流组造流量分别为 4000 L/H、8000 L/H、13000 L/H、20000 L/H；设置静止组作为对照组。（2）食物密度因子，本实验以蛋白核小球藻作为轮虫的食物，蛋白核小球藻密度设置为 1×10^6 cells/mL、 5×10^6 cells/mL 和 10×10^6 cells/mL。以 1 个对照组，4 个充气组，4 个造流组，3 个蛋白核小球藻密度组为不同因子进行正交实验（详见表 2.2），

共 27 个处理组。实验前先将预培养的萼花臂尾轮虫分别转入到上述 27 个处理组，并分别在扰动条件下稳定培养 3 天以使轮虫适应扰动环境，作为实验用轮虫。正式实验开始后，将实验用轮虫捞出加入 70 L 的白色塑料桶中，每个白色塑料桶中有 50 L 的蛋白核小球藻，每个处理中均有空白组和实验组，空白组中不加入轮虫，观察蛋白核小球藻变化情况，实验组轮虫密度为 30 ind./mL，每组 3 个平行。实验共持续 3 h，实验开始前与结束后，取 50 mL 藻液用鲁戈试剂固定，然后在显微镜下记数，记录实验前后蛋白核小球藻密度的变化，最后根据 Frost^[101]公式计算轮虫摄食率。

表 2.1 “水生四号营养液”配方表
Table. 2.1 “Aquatic culture No. 4”medium

成分	浓度
KCl	25 mg/L
NaHCO ₃	100 mg/L
(NH ₄) ₂ SO ₄	200 mg/L
FeCl ₃ (1%)	0.15 mL/L
MgSO ₄ ·7H ₂ O	80 mg/L
土壤浸出液	0.50 mL/L
Ca(H ₂ PO ₄) ₂ + 2(CaSO ₄ ·H ₂ O)	30 mg/L

注：土壤浸出液按土壤和水 2:1 比例搅匀浸泡，使用前用高温灭菌锅高温消毒。

表 2.2 不同处理组设置情况
Table. 2.2 Settings of different processing groups

处理组	1×10 ⁶ cells/mL	5×10 ⁶ cells/mL	10×10 ⁶ cells/mL
对照组	+	+	+
6 L/min 充气量	+	+	+
12 L/min 充气量	+	+	+
18 L/min 充气量	+	+	+
24 L/min 充气量	+	+	+
4000L/H 造流量	+	+	+
8000L/H 造流量	+	+	+
13000L/H 造流量	+	+	+
20000L/H 造流量	+	+	+

2.2.3 实验指标的测定和分析

(1) 轮虫为典型的滤食性生物, 因此本实验采用饵料浓度差减法, 通过对比实验组和空白组中的饵料浓度差异来研究轮虫的摄食率。轮虫对蛋白核小球藻的摄食率用 Frost^[101] 公式计算:

$$G = \frac{V}{N} \times \frac{\ln C_t - \ln C_{tf}}{t} \times \frac{C_{tf} - C_0}{\ln C_{tf} - \ln C_0} \quad (2.1)$$

式中: G 表示摄食率 ($\text{cells} \cdot \text{ind.}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$), 即为每只轮虫单位时间内滤过的蛋白核小球藻细胞数; V 表示实验溶液体积 (mL); t 为摄食时间 (h); N 为每个实验桶中轮虫个体数 (ind.); C_0 为起始饵料浓度 (cells/mL); C_t 为空白组中的最终饵料浓度 (cells/mL); C_{tf} 为实验组中的最终饵料浓度 (cells/mL)。

(2) 蛋白核小球藻样品采集及计数参考《水和废水监测分析方法》^[102], 样品采集后用鲁戈试剂 (最终浓度 1%) 进行固定, 然后静置 48 h, 去掉上清液, 将其浓缩至 50 mL, 得到最终样品。吸取样品 0.1 mL, 均匀注入 0.1 mL 浮游植物计数框中, 使用生物显微镜 (Olympus Corporation, Tokyo, Japan) 400× 下计数 100 个视野, 每个样计数 3 次, 取其平均值, 通过公式计算获得蛋白核小球藻的密度, 蛋白核小球藻密度公式为:

$$C = \frac{A \times V_s \times n}{A_c \times V_a} \quad (2.2)$$

式中: C 表示水样中蛋白核小球藻密度 (cells/mL); A 表示计数框面积 (mm^2); V_s 表示浓缩后水样体积 (mL); n 表示计数所得蛋白核小球藻个数; A_c 表示计数面积 (mm^2); V_a 表示计数框体积 (mL)

(3) 萼花臂尾轮虫样品采样及计数参考《水和废水监测分析方法》^[102], 使用 300 目浮游生物网进行过滤收集并浓缩至 50 mL, 然后用甲醛 (最终浓度 4%) 固定保存。均匀摇晃样品, 吸取样品 5 mL 均匀注入浮游动物计数框内, 使用生物显微镜 (Olympus Corporation, Tokyo, Japan) 40× 下全片计数, 每个样计数三次, 取其平均值, 通过公式计算获得萼花臂尾轮虫的密度, 密度公式为:

$$N = \frac{n_1 V_1}{V_2 V_3} \quad (2.3)$$

式中: N 表示水样中萼花臂尾轮虫密度 (ind./mL), n_1 表示计数所得萼花臂尾轮虫个数, V_1 表示水样浓缩体积 (mL), V_2 表示计数所取水样的体积 (mL), V_3 表示采样时水样体积 (mL)。

(4) 数据分析

所有数据均采用平均值 ± 标准差进行表达。使用 Origin 2018 软件进行制图, 采用 SPSS25 进行数据分析和方差分析, $P < 0.05$ 的比较被认为有显著差异。

2.3 结果与分析

充气处理组萼花臂尾轮虫摄食率变化如图 2-1 所示。由图可知, 在相同充气量下, 轮虫摄食率随着食物浓度的升高而增加。但在相同食物浓度下, 摄食率随着充气量增加

而呈现先上升后下降的趋势, 3 个食物密度下, 轮虫摄食率最大值均出现在 12 L/min 组中, 而最低值却并未出现在同一处理组中。当食物密度为 1×10^6 cells/mL 和 5×10^6 cells/mL 时, 24 L/min 组摄食率最低, 分别是 2.41×10^3 cells/ind.·h、 3.40×10^3 cells/ind.·h, 除与对照组差异不明显外 ($P > 0.05$), 显著低于 12 L/min 组和 18 L/min 组 ($P < 0.05$); 至食物密度为 10×10^6 cells/mL 时, 对照组轮虫摄食率最低, 为 3.89×10^3 cells/ind.·h, 除与 24 L/min 组差异不明显外 ($P > 0.05$), 同样显著低于 12 L/min 和 18 L/min 两组 ($P < 0.05$)。整体而言, 轮虫摄食率随着充气强度的增加而提高, 但过度的充气则会抑制轮虫的摄食, 在 50 L 培养水体内, 适宜充气强度为 6-18 L/min。

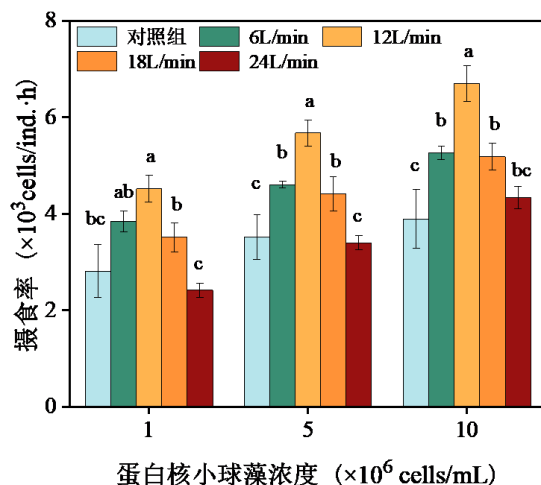


图 2-1 不同蛋白核小球藻密度与充气量对萼花臂尾轮虫摄食率的影响

Figure. 2-1 Effects of different *C. pyrenoidosa* density and aeration on grazing rate of *B. calyciflorus*

注: 相同食物密度间不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$), 相同字母表示差异不显著 ($P > 0.05$)

造流处理组轮虫摄食率变化如图 2-2 所示。由图可知, 造流处理组中轮虫摄食率同样随着蛋白核小球藻浓度的增加而上升, 3 个藻密度下, 对照组轮虫摄食率均显著低于各造流组 ($P < 0.05$), 而轮虫摄食率最大值却并不出现在同一强度造流组中。在藻浓度为 1×10^6 cells/mL 时, 造流量为 8000 L/H 时轮虫摄食率为 5.58×10^3 cells/ind.·h, 显著高于静止组、4000 L/H 组和 20000 L/H 组 ($P < 0.05$), 而当藻密度为 5×10^6 、 10×10^6 cells/mL 时, 造流量为 13000 L/H 时摄食率分别为 6.82×10^3 cells/ind.·h 和 8.57×10^3 cells/ind.·h, 显著高于静止组与 4000 L/H 组 ($P < 0.05$)。此外, 在 1×10^6 cells/mL 藻密度时, 20000 L/H 组轮虫摄食率和 4000L/H 组轮虫摄食率差异不明显 ($P > 0.05$), 而当藻密度为 5×10^6 和 10×10^6 cells/mL 时, 20000 L/H 组轮虫摄食率则显著高于 4000L/H 组轮虫摄食率 ($P < 0.05$) 总体而言, 轮虫摄食率随着造流量的增加而先上升后下降, 造流扰动有利于提高轮虫的摄食率, 最佳造流量随着微藻密度的升高而增大。

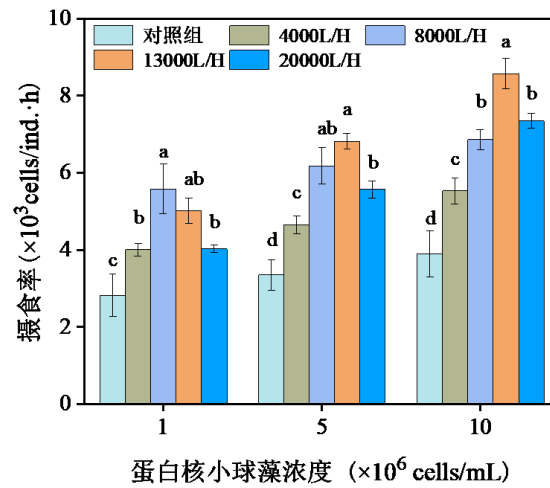


图 2-2 不同蛋白核小球藻密度与造流量对萼花臂尾轮虫摄食率的影响

Figure. 2-2 Effects of different *C. pyrenoidosa* density and fluidization on grazing rate of *B. plicatilis*注：相同食物密度间不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)，相同字母表示差异不显著 ($P > 0.05$)

所有实验组轮虫摄食率见表 2.3。由表可知，相同藻密度下，不同扰动方式轮虫摄食率差异较大 ($P < 0.05$)。在藻浓度为 1×10^6 cells/mL 和 5×10^6 cells/mL 时，8000 L/H 和 13000 L/H 两个造流组轮虫摄食率均高于所有充气组，其中，藻浓度为 1×10^6 cells/mL 时，8000 L/H 造流量组表现显著 ($P < 0.05$)；在藻浓度为 5×10^6 cells/mL 时，13000 L/H 造流量组表现显著 ($P < 0.05$)。当藻密度为 10×10^6 cells/mL 时，8000 L/H、13000 L/H 和 20000 L/H 造流量组轮虫摄食率均高于所有充气处理组，其中 13000 L/H 表现显著 ($P < 0.04$)。

表 2.3 蛋白核小球藻密度与扰动对萼花臂尾轮虫摄食率的影响

Table. 2.3 Grazing rate of *B. calyciflorus* by *C. pyrenoidosa* and different disturbance methods

处理组	摄食率 ($\times 10^3$ cells/ind.·h)		
	1×10^6 cells/mL	5×10^6 cells/mL	10×10^6 cells/mL
对照组	2.81 ± 0.55^{cd}	3.52 ± 0.47^d	3.89 ± 0.61^e
6 L/min 组	3.84 ± 0.21^{bc}	4.60 ± 0.07^c	5.26 ± 0.14^{cd}
12 L/min 组	4.52 ± 0.28^b	5.67 ± 0.27^b	6.70 ± 0.37^b
18 L/min 组	3.51 ± 0.30^c	4.41 ± 0.36^c	5.18 ± 0.28^{cd}
24 L/min 组	2.41 ± 0.14^d	3.40 ± 0.14^d	4.34 ± 0.23^{de}
4000 L/H 组	4.00 ± 0.17^{bc}	4.66 ± 0.23^c	5.53 ± 0.34^c
8000 L/H 组	5.58 ± 0.64^a	6.18 ± 0.47^{ab}	6.86 ± 0.26^b
13000 L/H 组	5.01 ± 0.33^{ab}	6.82 ± 0.20^a	8.57 ± 0.40^a
20000 L/H 组	4.02 ± 0.09^{bc}	5.56 ± 0.22^b	7.35 ± 0.19^b

注：同列数据右上角不同字母是表示差异显著 ($P < 0.05$)，相同字母表示差异不显著 ($P > 0.05$)。

2.4 讨论

轮虫是滤食性浮游动物,研究轮虫的摄食率,能有效地避免饵料浪费,减少生产成本并对轮虫的规模化培养起到指导作用^[103]。有研究表明,食物浓度对轮虫摄食率具有影响,并呈现出不同的摄食模式:在一定的食物浓度范围内,轮虫的摄食率随着食物浓度的上升而增加,当达到一定程度后,轮虫摄食率达到饱和点,达到饱和点后,摄食率或下降^[104]或维持恒定^[101],还有的研究认为轮虫的摄食率不存在饱和点^[94]。关于在何种食物密度下出现饱和点,研究人员的结论也有所不同。同样以蛋白核小球藻为食物,房宽等^[93]认为,藻密度为 1×10^6 cells/mL 时,轮虫摄食率达到饱和点,刘文娟等^[105]则认为,藻密度为 0.57×10^6 cells/mL 时,轮虫摄食率达到饱和点。此前分析认为,较高的饵料密度可能会干扰轮虫的摄食器官或是抑制了轮虫的纤毛转动,从而使轮虫运动速度下降,导致摄食率下降。本研究结果与梁叶^[25]、黄鹤忠等^[94]研究结果一致,即在饵料浓度为 $1-10 \times 10^6$ cells/mL 时,轮虫摄食率随着食物浓度的升高而增加,并不存在饱和点。研究认为,轮虫密度可能是造成诸多研究结果出现差异的主要原因。在房宽等^[93]的研究中,轮虫的起始密度为 1 ind./mL,而黄鹤忠等^[94]研究中轮虫起始密度为 20 ind./mL,本研究中起始密度为 30 ind./mL。郑艳琳^[106]认为,轮虫摄食率下降可能是微藻产生了某些抑制性物质所导致,江巍^[41]也发现,在轮虫培育早期,轮虫数量还不占优势,高密度的藻液会导致轮虫短时间内繁殖困难,需要保持适宜的低浓度藻液投喂,当轮虫数量增加后再投喂高浓度藻液。综上,本研究分析认为,与低密度相比,高密度下轮虫种群可能对某些抑制性物质的耐受能力更强。因此,在本实验中,轮虫摄食率不仅不会随着饵料密度的升高而降低,反而能进一步增加。

本实验研究结果表明,与静止培养相比,充气与造流两种扰动方式均能明显提高轮虫的摄食率($P < 0.05$)。诸多研究认为,水体扰动能够提高浮游动物与食物的接触概率,进而提高摄食率^[80, 84, 107]。在静止水体中,轮虫通过轮盘转动使水旋动,使水流向轮虫头部前端,轮虫以此捕食水中的食物,但这种捕食行为是随机的,目前尚没有证据表明轮虫能够远程检测食物,或从远处定向摄取食物^[108]。充气与造流均可以使培养水体产生扰动,因此,在本研究中,充气组与造流组轮虫摄食率较静止组明显增加($P < 0.05$)。研究还发现,在相同食物密度下,轮虫摄食率随着扰动强度的增强而呈现先上升后下降的趋势。这是由于,浮游动物的摄食率是由接触率与接触时间共同决定的,随着扰动强度的增加,浮游动物与食物的接触概率增加,摄食率提高;但随着扰动强度的进一步增加,浮游动物与食物的接触时间将会减少,摄食率趋于平缓或下降^[107]。

本实验结果表明,在3个藻密度下,造流处理组轮虫摄食率均明显高于充气处理组,其原因可能包括两个方面。一方面,这可能是二者水体的波动强弱不同造成的。充气组中,气泡多集中于出气口,接近出气口的水体波动明显,外部水体则波动较弱^[109],而造流泵可以全方位对水下空间进行充分搅动^[110],冷晓飞等^[90]也发现,造流可使水体均匀翻滚,水体呈明显烟雾状。因此,在造流组中,轮虫与微藻的接触更加充分且均匀,摄食率因而较之充气组更高。另一方面,轮虫在充气组中的分布也是不均匀的。充气组中,气泡的运动方向为升流式上升,在水面向四周扩散,最终在靠近侧壁时破裂^[109],水中悬

浮物的运动则受气液两相流动的影响,沿着气泡运动方向进行环形流动^[111]。但微藻与轮虫对气泡气浮作用的反应不同。微藻细胞体积较小、表面负电位高,气泡则尺寸较大且表面同样带有负电荷,较大的尺寸差异和静电斥力的作用使得微藻受到气泡上浮作用影响较小^[112]。而轮虫受到气泡的影响较大,泡沫的黏性较大,能黏附轮虫从水面溢出,有研究表明,被粘附的轮虫最高可达轮虫总量的 50%^[53],此时,这些被粘附的轮虫无法正常参与摄食,摄食率也因此降低。综上所述,造流组水体扰动剧烈均匀,且不会阻碍轮虫摄食,因此摄食率较高。

本实验还发现,在造流组中,低食物密度(1×10^6 cells/mL)时,低强度扰动(8000 L/H)更有利于轮虫摄食,而高食物密度(5×10^6 cells/mL、 10×10^6 cells/mL)时,高强度扰动(13000 L/H)则有利于轮虫摄食。Visser 等^[107]认为,浮游动物的摄食率是由浮游动物与食物的接触概率与接触时间共同决定的。因此,本研究分析认为,当食物浓度较低时,轮虫或许需要较多的接触时间确保被接触的食物被有效摄食,此时,低强度扰动相比于静止组,接触概率增加,相比于高扰动组,接触时间较长,因此摄食率较高。当食物浓度较高时,虽然轮虫与单个食物的接触时间减少,但单位时间内可供选择的食物更多。因此,高食物密度时轮虫的摄食率由接触概率决定,高强度的扰动有利于轮虫的摄食。而在充气组中,3 个食物密度中均以 12 L/min 充气量下轮虫摄食率最高,并未出现变化,这可能也是受到气泡粘附作用的影响。当充气强度较高时,虽然有可能会改变轮虫与食物的接触概率与接触时间,但会有更多轮虫被气泡粘附,无法进行摄食,因此摄食率较低。

2.5 本章小结

本章共设置了 27 个实验组,在不同食物密度下研究了不同扰动方式和扰动强度对萼花臂尾轮虫摄食率的影响,研究结论为:在饵料密度为 $1-10 \times 10^6$ cells/mL 范围内,轮虫摄食率随着食物浓度的增加而上升;在相同食物浓度下,轮虫摄食率均随着扰动强度的增加而呈现先上升后下降的趋势;而在充气扰动与造流扰动两种扰动方式之间,造流扰动下轮虫摄食率始终高于充气扰动。研究结果表明,造流扰动可以显著提高轮虫摄食率,在饵料密度为 $1-10 \times 10^6$ cells/mL 时,8000-13000 L/H 的造流强度能在 50 L 培养水体使轮虫获得较多的食物。

第三章 蛋白核小球藻与不同扰动方式对萼花臂尾轮虫种群动态的影响

3.1 引言

第二章的研究结果表明, 充气与造流两种扰动方式均可提高轮虫的摄食率。有研究表明, 充足的摄食可以缩短轮虫产卵间隔, 增加产卵量, 进而提高轮虫培养产量^[113, 114]。因此, 本章节在第二章研究的基础上, 以蛋白核小球藻作为轮虫的食物, 在不同充气强度与不同造流强度下对萼花臂尾轮虫进行种群累积培养, 探讨不同扰动方式对萼花臂尾轮虫种群培养的规律, 为轮虫的规模化培养提供科学参考和依据。

3.2 材料与方法

3.2.1 轮虫及饵料来源

同 2.2.1。

3.2.2 实验设计

根据预实验结果, 实验共设置 9 个处理组。分别为静止对照组、4 个充气组和 4 个造流组。4 个充气组充气量分别为 6 L/min、12 L/min、18 L/min、24 L/min; 4 个造流组造流量分别为 4000 L/H、8000 L/H、13000 L/H、20000 L/H, 每个处理组三个平行。将 50 L 提前培养好的蛋白核小球藻加入到 70 L 白色塑料桶中, 然后加入萼花臂尾轮虫, 蛋白核小球藻起始密度为 12×10^6 cells/mL, 萼花臂尾轮虫起始密度为 55 ind./L。实验共进行 10 天。每天上午 7:00 取一定水样, 回实验室分析氨氮浓度, 藻密度和轮虫种群动态, 同时现场测定溶解氧浓度。

3.2.3 实验指标的测定和分析

(1) 溶解氧浓度使用便携式多参数水质测定仪 (W-1) 测定。

(2) 氨氮测定方法参照《HJ 535-2009 水质 氨氮的测定 纳氏试剂分光光度法》

(3) 蛋白核小球藻样品采集及计数参考《水和废水监测分析方法》^[102], 样品采集后用鲁戈试剂 (最终浓度 1%) 进行固定, 然后静置 48 h, 去掉上清液, 将其浓缩至 50 mL, 得到最终样品。吸取样品 0.1 mL, 均匀注入 0.1 mL 浮游植物计数框中, 使用生物显微镜 (Olympus Corporation, Tokyo, Japan) 400×下计数 100 个视野, 每个样计数 3 次, 取其平均值, 通过公式计算获得蛋白核小球藻的密度, 蛋白核小球藻密度公式为:

$$C = \frac{A \times V_s \times n}{A_c \times V_a} \quad (3.1)$$

式中: C 表示水样中蛋白核小球藻密度 (cells/mL); A 表示计数框面积 (mm²); V_s 表示浓缩后水样体积 (mL); n 表示计数所得蛋白核小球藻个数; A_c 表示计数面积 (mm²); V_a 表示计数框体积 (mL)

(4) 萼花臂尾轮虫和轮虫卵样品采集及计数参考《水和废水监测分析方法》^[102],

使用 300 目浮游生物网进行过滤收集并浓缩至 50 mL，然后用甲醛溶液固定（最终浓度 4%）。均匀摇晃样品，吸取样品 5 mL 均匀注入浮游动物计数框内，使用生物显微镜（Olympus Corporation, Tokyo, Japan）40×下全片计数，每个样计数 3 次，取其平均值，通过公式计算获得萼花臂尾轮虫、虫卵的密度以及抱卵率，公式为：

$$N = \frac{n_1 V_1}{V_2 V_3} \quad (3.2)$$

$$E = \frac{n_2 V_1}{V_2 V_3} \quad (3.3)$$

$$ER = \frac{E}{N} \times 100\% \quad (3.4)$$

式中：N 表示水样中萼花臂尾轮虫密度（ind./mL），E 表示水样中萼花臂尾轮虫虫卵密度（ind./mL），ER 表示抱卵率（%）， n_1 表示计数所得萼花臂尾轮虫个数， n_2 表示计数所得萼花臂尾轮虫虫卵个数， V_1 表示水样浓缩体积（mL）， V_2 表示计数所取水样的体积（mL）， V_3 表示采样时水样体积（mL）。

（5）种群增长率通过收集的萼花臂尾轮虫密度数据计算所得，计算公式为：

$$r = \frac{\ln N_T - \ln N_0}{T} \quad (3.5)$$

式中：r 表示种群增长率（ d^{-1} ）， N_T 与 N_0 分别表示表示种群在 T 天和开始的种群密度（ind./mL），T 表示实验时间。

（6）数据分析

同 2.2.3。

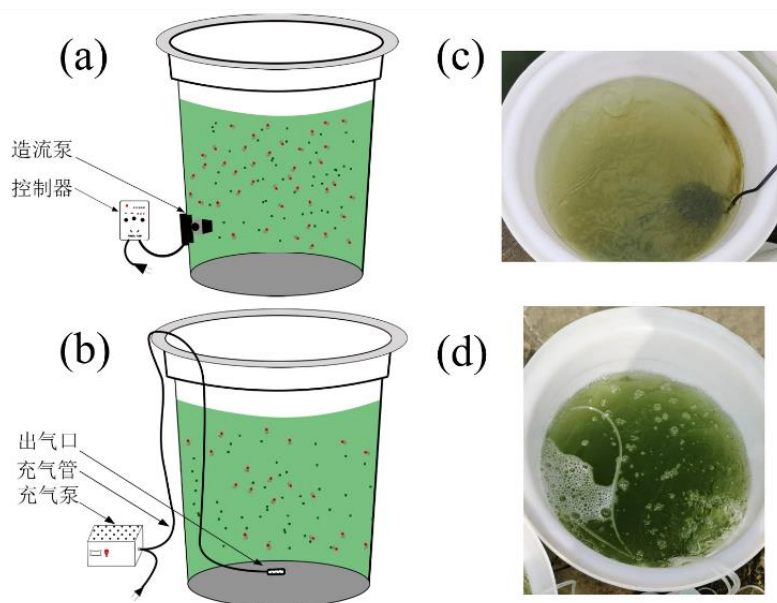


图 3-1 造流（a）与充气（b）装置示意图；造流（c）与充气（d）装置实物图
Figure. 3-1 Schematic diagram of fluidization(a) and aeration(b); Physical diagram of fluidization(c) and aeration(d)

3.3 结果与分析

3.3.1 蛋白核小球藻联合充气扰动对轮虫种群动态及水体水质的影响

实验期间水体溶解氧变化如图 3-2 (a) 所示, 所有实验组溶解氧水平均呈一定的起伏趋势。整个实验期间, 对照组溶解氧水平逐渐降低, 实验周期内溶解氧平均值为 3.97 mg/L, 显著低于各充气处理组 ($P<0.05$); 各充气组平均溶解氧水平 4.95-5.61 mg/L, 其中, 24 L/min 组平均溶解氧水平最高, 为 5.61 mg/L, 显著高于其它处理组 ($P<0.05$)。整个实验中, 溶解氧最低水平出现在第 10 天对照组中, 为 3.17 mg/L。

实验期间培养水体氨氮浓度变化如图 3-2 (b) 所示, 各实验组氨氮浓度均呈现先降低后上升趋势。实验前 5 天, 各组氨氮浓度差异不明显 ($P>0.05$), 实验结束时, 24 L/min 组氨氮浓度最低, 为 1.91 mg/L, 显著低于对照组、6 L/min 组和 12 L/min 组 ($P<0.05$), 与 18 L/min 组差异不明显 ($P>0.05$), 而 12 L/min 组氨氮浓度达到 2.22 mg/L, 显著高于 24 L/min 组 ($P<0.05$), 但与其它处理组无显著差异 ($P>0.05$)。

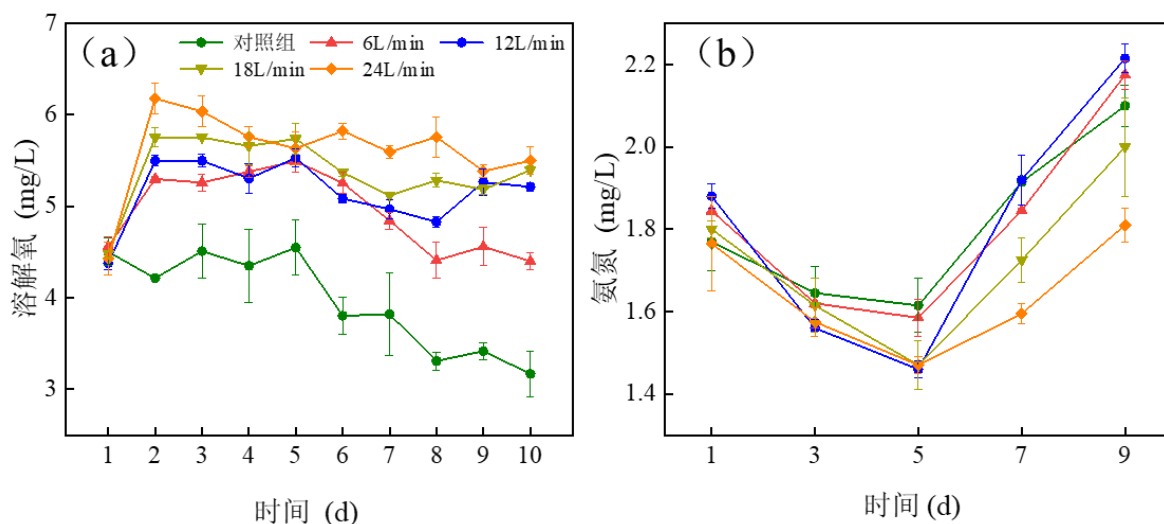


图 3-2 不同充气量组实验期间溶解氧 (a) 和氨氮浓度 (b) 随时间变化情况

Figure. 3-2 Concentration change of DO (a) and NH₄-N (b) with time in different aeration groups

实验期间蛋白核小球藻平均藻密度如图 3-3 (a) 所示, 结果显示, 平均藻密度随着充气量增加呈现先下降后上升的趋势, 其中 12 L/min 组平均藻密度为 7.11×10^6 cells/mL, 显著低于其余各组 ($P<0.05$)。藻细胞密度动态变化情况如图 3-3 (b) 所示, 实验前 3 天, 各组蛋白核小球藻藻细胞密度无明显变化 ($P>0.05$), 随后各组蛋白核小球藻均呈下降趋势。其中, 12 L/min 组藻密度下降速度较快, 且在 5-7 天内显著低于其它各组 ($P<0.05$)。24 L/min 组藻密度在 1-4 天内小幅上升, 第 5 天开始下降。实验结束时, 6 L/min 组、12 L/min 组和 18 L/min 组藻细胞密度显著低于 24 L/min 组与对照组 ($P<0.05$)。

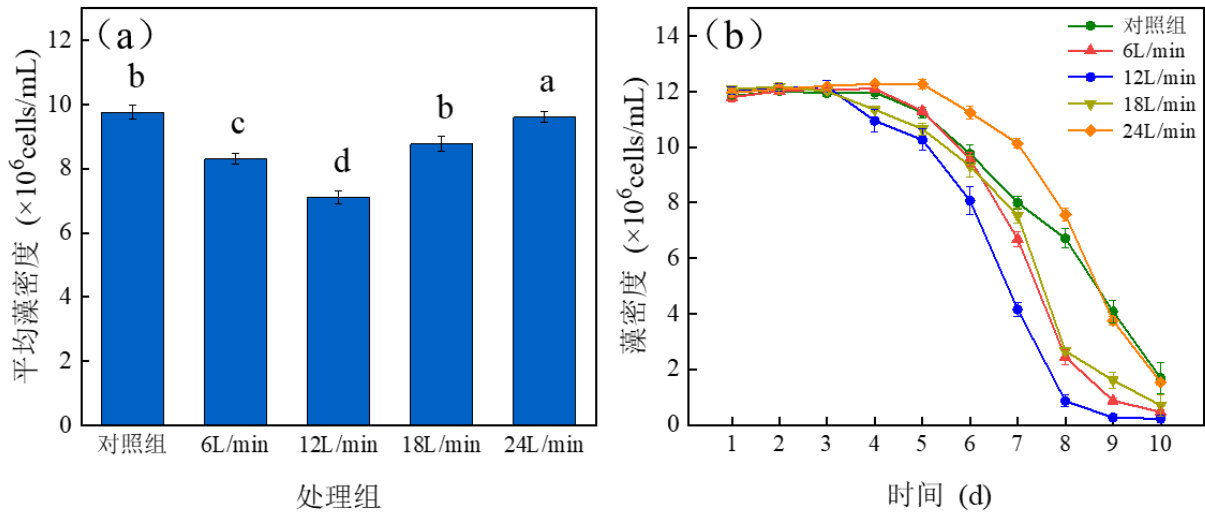


图 3-3 不同充气量对蛋白核小球藻密度的影响

Figure. 3-3 Effect of different aeration on density of *C. pyrenoidosa*

注：不同处理组之间不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)，相同字母表示差异不显著 ($P > 0.05$)

实验期间不同处理组萼花臂尾轮虫平均抱卵率如图 3-4 (a) 所示，对照组平均抱卵率分别为 55%，除与 24 L/min 组差异不明显外 ($P > 0.05$)，显著低于其余充气处理组 ($P < 0.05$)。抱卵率动态变化如图 3-4 (b) 所示，数据显示，对照组与 24 L/min 组抱卵率起伏不定，其余各充气组轮虫抱卵率均呈现先上升后下降的趋势。其中 6 L/min、12 L/min 和 18 L/min 三组种群抱卵率在实验 2-7 天内显著高于对照组 ($P < 0.05$)。12 L/min 组抱卵率水平最高，在 4-6 天内显著高于其余各组 ($P < 0.05$)。各组抱卵率峰值及出现时间见表 3.1。对照组、6 L/min、12 L/min、18 L/min 和 24 L/min 组抱卵率峰值分别为 74%、121%、162%、109%和 75%。12 L/min 组抱卵率最早在第 6 天达到峰值，且峰值显著高于其余各组 ($P < 0.05$)。

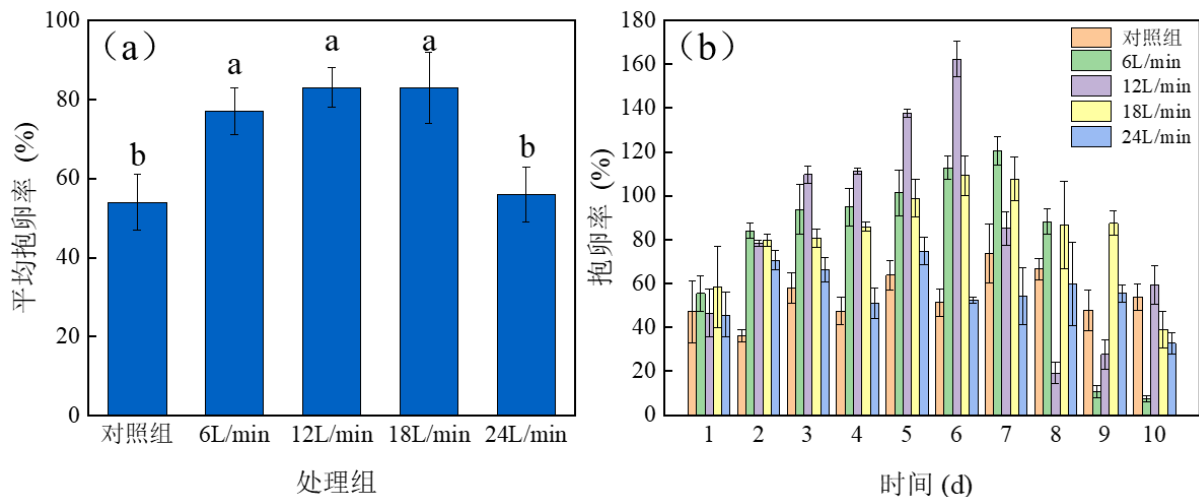


图 3-4 不同充气量对轮虫抱卵率的影响

Figure. 3-4 Effects of different aeration on egg retention of *B. calyciflorus*

注：不同处理组之间不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)，相同字母表示差异不显著 ($P > 0.05$)

实验期间萼花臂尾轮虫平均密度如图 3-5 (a) 所示，对照组平均轮虫密度为 4.82

ind./mL, 显著低于各充气处理组 ($P<0.05$)。种群密度动态变化如图 3-5 (b) 所示。随着实验的进行, 除对照组与 24 L/min 组种群密度持续上升外, 其余各组轮虫的种群密度均呈现出先增长后下降的趋势, 但不同充气量下各组种群密度差异明显。实验前 3 天, 各组种群密度相近, 没有显著差异 ($P>0.05$), 4-8 天内, 对照组轮虫密度显著低于各充气处理组 ($P<0.05$)。各组种群密度峰值及出现时间见表 3.1。对照组种群密度峰值为 23 ind./mL, 6 L/min、12 L/min、18 L/min 和 24 L/min 四组种群密度峰值分别为 39、56、38 和 29 ind./mL, 除 24 L/min 组与对照组无显著差异外 ($P>0.05$), 其余各充气组均显著高于对照组 ($P<0.05$)。其中, 12 L/min 组显著高于其余所有实验组 ($P<0.05$), 且与对照组的差异极显著 ($P<0.01$)。不同处理组达到峰值时间不同, 其中 12 L/min 组在第 8 天达到峰值, 6 L/min、18 L/min 组在第 9 天达到峰值, 而对照组与 24 L/min 组则在第 10 天达到峰值。总体而言, 12 L/min 组培养效果最好, 能在最短时间内达到最高的种群密度。

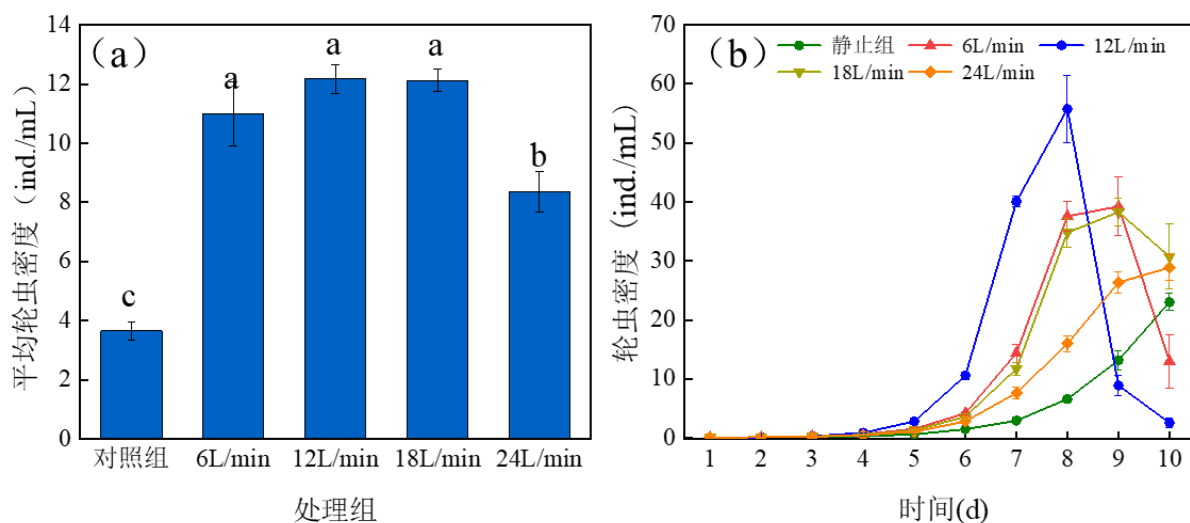


图 3-5 不同充气量对轮虫种群密度的影响

Figure. 3-5 Effect of different aeration on population density of *B. calyciflorus*

注: 不同处理组之间不同字母表示差异显著 ($P<0.05$), 相同字母表示差异不显著 ($P>0.05$)

实验期间萼花臂尾轮虫平均种群增长率如图 3-6 (a) 所示, 对照组平均种群增长率为 0.48 d^{-1} , 6 L/min、12 L/min、18 L/min 和 24 L/min 四组分别为 0.66、0.69、0.74 和 0.56 d^{-1} , 除 24 L/min 组外, 所有充气组轮虫平均增长率均明显高于对照组 ($P<0.05$)。种群增长率动态变化情况如图 3-6 (b) 所示, 在实验的 3-8 天内, 12 L/min 组轮虫增长率显著高于对照组 ($P<0.05$)。各组种群增长率峰值及出现时间见表 3.1。对照组种群增长率峰值出现在第 9 天, 峰值为 0.61 d^{-1} , 6 L/min、12 L/min、18 L/min 和 24 L/min 四组增长率峰值分别出现在第 8、7、8、8 天, 峰值分别为 0.82、0.94、0.81 和 0.70 d^{-1} 。可见, 不同充气量下轮虫种群增长率差异显著, 12 L/min 组种群增长率峰值出现时间早, 且峰值显著高于其余各组 ($P<0.05$)。

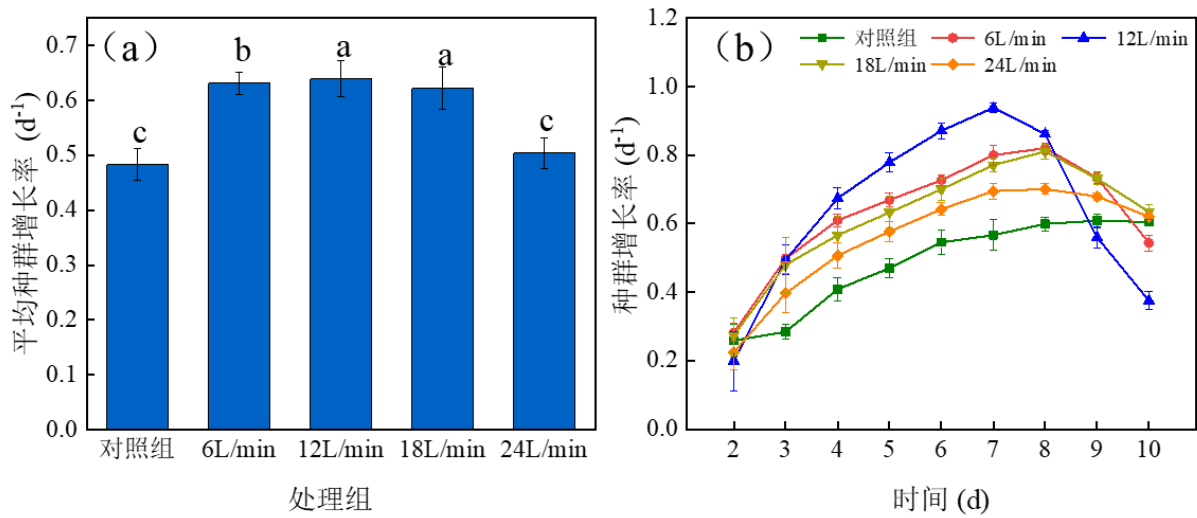


图 3-6 不同充气量对轮虫种群增长率的影响

Figure. 3-6 Effect of different aeration on population growth rate of *B. calyciflorus*

注：不同处理组之间不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)，相同字母表示差异不显著 ($P > 0.05$)

3.3.2 蛋白核小球藻联合造流扰动对轮虫种群动态及水体水质的影响

造流处理组实验期间培养水体溶解氧变化如图 3-7 (a) 所示。除对照组外，各造流处理组溶解氧水平均呈快速升高后缓慢下降最后再度升高的趋势。整个实验期间，对照组平均溶解氧水平为 3.97 mg/L，显著低于各造流处理组 ($P < 0.05$)，各造流组平均溶解氧水平为 4.89-5.30 mg/L，其中，20000 L/H 组溶解氧显著高于其它各组 ($P < 0.05$)。整个实验周期内，溶解氧最低水平出现在第 10 天对照组中，为 3.17 mg/L。

实验期间培养水体氨氮浓度变化如图 3-7 (b) 所示，各组氨氮浓度均呈缓慢下降后快速上升的趋势。实验前 5 天，各组氨氮浓度差异不明显 ($P > 0.05$)。实验结束时，对照组氨氮浓度为 2.10 mg/L，明显低于各造流处理组 ($P < 0.05$)，13000 L/H 组氨氮浓度最高，为 2.72 mg/L，显著高于对照组 ($P < 0.05$)，但与其它造流处理组差异不显著 ($P > 0.05$)。

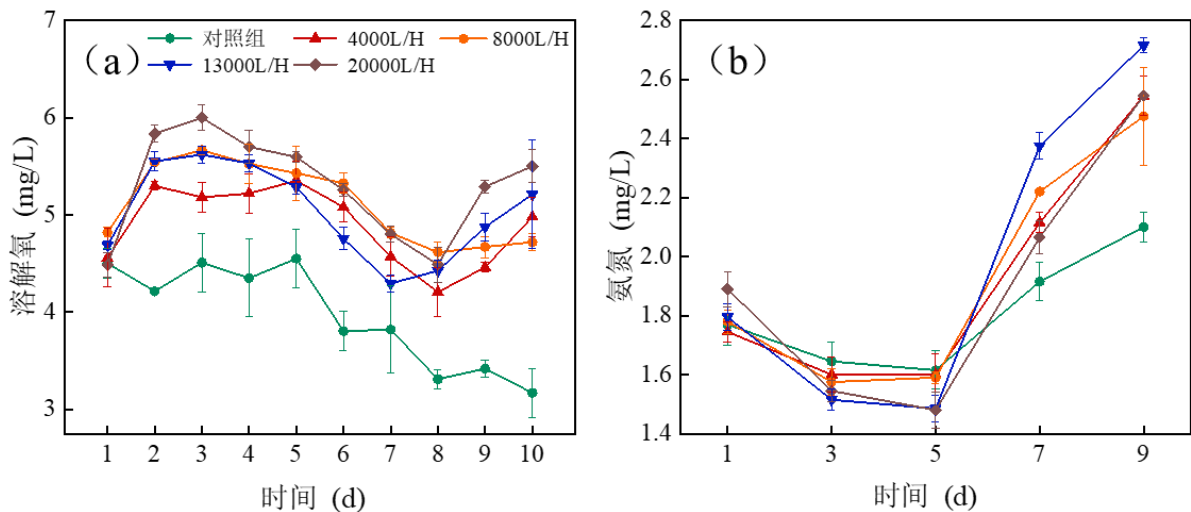


图 3-7 不同造流量组实验期间溶解氧 (a) 和氨氮浓度 (b) 随时间变化情况

Figure. 3-7 Concentration change of DO (a) and NH₄-N (b) in different fluidization groups

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/265044313240011113>