

## ◆ 生物科学 ◆

牟氏角毛藻生长相关影响因素的研究进展<sup>\*</sup>徐 艳<sup>1,2</sup>, 陈瑞芳<sup>1,2</sup>, 柯 珂<sup>1</sup>, 彭慧婧<sup>1,2</sup>, 姜发军<sup>1\*\*</sup>

(1. 广西科学院, 广西北部湾海洋研究中心, 广西近海海洋环境科学重点实验室, 广西南宁 530007; 2. 广西科学院, 广西海洋研究所有限责任公司, 广西北海 536000)

**摘要:**牟氏角毛藻(*Chaetoceros muelleri* Lemmermann)是一种小型的海洋浮游硅藻,细胞壁薄,多数为单个生活,具有适盐性广、耐高温、繁殖速度快、抗污染能力强等特点,通常用作水产养殖饲料。牟氏角毛藻的生长除了受到诸多非生物因素的影响之外,还受到生物因素、培养方式以及其他因素的综合影响。本文从非生物因素、生物因素以及大规模培养和采收3个层面概述牟氏角毛藻的生长影响因素,优化其培养条件,为今后开展牟氏角毛藻培养以及在水产养殖中的应用提供参考。

**关键词:**牟氏角毛藻 培养条件 非生物因素 生物因素 培养和采收

中图分类号: S963.21 文献标识码: A 文章编号: 1002-7378(2022)04-0371-08

DOI: 10.13657/j.cnki.gxkxyxb.20221209.005

牟氏角毛藻(*Chaetoceros muelleri* Lemmermann)隶属于硅藻门(Bacillariophyta)中心硅藻纲(Centricae)盒形藻目(Biddulphiales)角毛藻科(Chaetocerales)角毛藻属(*Chaetoceros*),是一种小型的海洋浮游硅藻,其细胞壁薄,藻体呈金黄色,通常单个或2-3个细胞相连成群体生活<sup>[1]</sup>。由于牟氏角毛藻含有大量的脂肪酸、蛋白质等营养物质,并且具有适盐性广、耐高温、繁殖速度快、抗污染能力强等特点,被广泛用于鱼类、贝类和虾等幼体的孵化<sup>[2-5]</sup>。

牟氏角毛藻被广泛应用于许多领域,例如水产养殖、生物能源和环境净化等,和其他海洋微藻一样,其

生产性培养存在诸多问题。当前在生产上培养微藻所采用的营养盐五花八门,加之培养设施多为开放式水泥池,存在易受污染、培养条件难以控制、生长周期受季节限制、培养环境不稳定等缺点,导致培养效率低、细胞密度小等问题。如何建立最优的培养体系,培养出充足的纯度高、密度大、细菌少、生长鲜嫩的藻类,显得尤为重要。

和其他浮游植物一样,牟氏角毛藻的生长与生活环境密切相关,除了受到温度、盐度、光照、营养盐等诸多非生物因素的影响,还受到生物因素、培养方式

收稿日期: 2022-04-25

修回日期: 2022-05-19

<sup>\*</sup> 广西创新驱动发展专项项目(桂科 AA18242047, 桂科 AA19254008)资助。

## 【作者简介】

徐 艳(1981-),女,副研究员,主要从事海洋生物资源开发与利用研究。

## 【\*\*通信作者】

姜发军(1976-),男,研究员,主要从事海洋生物资源开发与利用研究, E-mail: hunanjf@126.com。

## 【引用本文】

徐艳,陈瑞芳,柯珂,等.牟氏角毛藻生长相关影响因素的研究进展[J].广西科学院学报,2022,38(4):371-378.

XU Y, CHEN R F, KE K, et al. Research Progress on Factors Affecting the Growth of *Chaetoceros muelleri* Lemmermann [J]. Journal of Guangxi Academy of Sciences, 2022, 38(4): 371-378.

以及其他因素的综合影响<sup>[6-10]</sup>。研究微藻的生长、组成与基础生态因子的关系,是一项必需的基础性研究工作。目前国内外有很多关于藻类培养条件优化方面的研究,为了解各种影响因素对牟氏角毛藻生长和组成的影响规律,获得既能平衡生物量生长,又能诱导油脂积累的培养条件,本文分别从非生物因素、生物因素以及大规模培养和采收 3 个层面概述牟氏角毛藻的研究进展,为优化培养条件、增加生物量、促进油脂积累和提高  $\omega$ -3 不饱和脂肪酸含量提供理论依据,以为今后开展牟氏角毛藻的培养及其在水产养殖中的应用提供参考。

## 1 非生物因素的影响

### 1.1 环境因素

作为水产养殖中使用较多的硅藻之一,牟氏角毛藻为耐高温种类,适合夏季培养<sup>[11]</sup>。骆云慧等<sup>[12]</sup>认为硅藻门种群的变化主要与温度、盐度等密切相关,还受到各种环境因子交互作用的影响<sup>[13]</sup>,应根据藻的生长习性确定最适的水温、盐度等,并保持相对稳定。

#### 1.1.1 温度

温度是影响海洋微藻生长和繁殖最重要的生态因子之一,其对酶的活性、营养物的吸收及细胞分裂周期等均产生较大影响,温度波动频率和幅度越大对牟氏角毛藻的生长速率和藻细胞密度的增加越不利<sup>[14]</sup>。牟氏角毛藻属于耐高温的海洋微藻<sup>[15,16]</sup>,在 25–34℃ 均能正常生长繁殖,其适宜的生长温度为 28–31℃,最适生长温度是 31℃<sup>[5]</sup>。类似地, Minggat 等<sup>[5]</sup>的研究结果也表明,牟氏角毛藻生物量生产的最适温度为 30℃,但在 20–35℃ 可以保持至少 66% 的最高产量。在适宜温度范围外的低温(25℃)下,牟氏角毛藻呈现缓慢生长状态,但有利于胞内短链脂肪酸的积累<sup>[17,18]</sup>,而当温度升至适宜温度时随即迅速恢复生长,推测可能是低温对牟氏角毛藻生长产生了短暂的抑制效应<sup>[14,19]</sup>。

#### 1.1.2 盐度

盐度变化对海洋微藻的生长和生理反应产生较大影响<sup>[14]</sup>。牟氏角毛藻在 5–40 的盐度条件下均能生长,但中盐度(20–30)是牟氏角毛藻稳定培养的适宜盐度范围,在 21–26 的盐度条件下藻细胞生长速度较快,其中最适盐度为(20±1),此时总脂产率最高<sup>[14,20,21]</sup>。不同的海域会导致牟氏角毛藻的最适盐度存在一定差异<sup>[5]</sup>。

#### 1.1.3 光照条件

光照作为影响微藻生长的重要生态因子,主要从光照强度和光质等方面来影响其生长<sup>[22-24]</sup>。多数海洋微藻对光能有相同的适应生理,对光照强度有一个光饱和点,低于光饱和点时,随着光照强度增加生长速率增加;高于光饱和点时生长速率减慢<sup>[14,25]</sup>。研究表明,硅藻最适的光照强度一般在 2 000–10 000 lx,不同硅藻生长和积累脂肪的最适光照强度不同,而同一种藻的最适光照强度也存在差异,这可能与所处的海区气候、水质环境和培养密度有极大关联,为环境因子间的交互作用导致<sup>[5,14-16]</sup>。

不同的光质对牟氏角毛藻的生长有不同的作用。顾颖慧<sup>[26]</sup>在单色绿光条件下,采用不同梯度的光照强度,研究了绿光对牟氏角毛藻生长的影响,结果表明绿光能促进牟氏角毛藻的繁殖,但所需光照强度不高,适宜的光照强度是 30–130 lx,牟氏角毛藻在 70 lx 达到最大生长速率。关万春等<sup>[27]</sup>研究发现,紫外辐射(Ultra Violet Radiation, UVR)可以抑制藻类的生长、光合固碳和游动性(有鞭毛的种类),并损伤细胞色素和遗传物质 DNA。Liang 等<sup>[28]</sup>研究了紫外线辐射对牟氏角毛藻生长、光合作用以及脂肪酸组成的影响,结果表明所有主要脂肪酸均随采收期和紫外线辐射而变化,在光合有效辐射加紫外辐射处理下,单不饱和脂肪酸的百分比增加,而二十碳五烯酸(EPA)等多不饱和脂肪酸降低。Iwasaki 等<sup>[24]</sup>通过将不同的光质调整为相等的光合可利用辐射,研究了光质对牟氏角毛藻大分子组成的影响,发现在白光、蓝光和绿光下牟氏角毛藻的生长速率和光合产氧量没有变化,但在红光下较低,蓝光提高了生物量、总蛋白质、总脂质、总碳水化合物和脂肪酸生产的能源投资回报率,可用于水产养殖饲料生产。

#### 1.1.4 通气状况

CO<sub>2</sub> 对微藻光合作用及固碳效率的影响已有广泛的研究,高浓度的 CO<sub>2</sub> 能促进脂肪酸的合成,但对于不饱和脂肪酸的定向积累则仍是值得研究的问题。胡晗华等<sup>[29]</sup>的研究结果显示,大气中 CO<sub>2</sub> 浓度加倍(700 μL·L<sup>-1</sup>)可促进牟氏角毛藻的生长。邹宁等<sup>[30]</sup>的研究表明,牟氏角毛藻细胞悬浮培养达到一定密度之后,CO<sub>2</sub> 的供应可以有效地提高生长速度和细胞密度,并且不同的 CO<sub>2</sub> 通入方式,产生的效果不同,其中以空气和纯 CO<sub>2</sub> 混合后通入效果最好。Wang 等<sup>[31]</sup>认为,在高 CO<sub>2</sub> 通气水平(10%–20%)下,牟氏角毛藻生长良好,在 10% CO<sub>2</sub> 曝气条件下,

各指标均达到最高值。王蒙等<sup>[32,33]</sup>指出,  $\text{CO}_2/\text{空气} = 1/15$  (约 6.7%) 的混合气体最适合牟氏角毛藻的生长以及粗脂肪的积累;  $\text{CO}_2/\text{空气} = 1/25$  (4.0%) 最适合牟氏角毛藻不饱和脂肪酸的积累。

## 1.2 营养盐

为了获得最佳的营养盐配方, 许多学者研究了营养盐对牟氏角毛藻生长和组成的影响。目前, 关于单因子营养盐对硅藻生长影响的报道较多, 而多因子组合对硅藻生长影响的报道较少。

### 1.2.1 营养盐的来源

硅藻生长所需的营养元素主要包括氮、磷、硅、铁等, 不同的硅藻生长所需的营养盐来源不同, 在不同的培养期影响也不同, 不同来源的营养盐会导致牟氏角毛藻的生化特征发生变化<sup>[34]</sup>。朱昔恩等<sup>[35]</sup>和张国庆等<sup>[36]</sup>认为牟氏角毛藻的最适氮源为硝酸钠, 尿素和碳酸氢铵在高浓度 ( $>75 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) 下对其生长有明显抑制作用; 而班剑娇等<sup>[21]</sup>则认为最佳氮源为尿素, 硝酸钠次之, 氯化铵较差。除此以外, 在磷酸二氢钾和磷酸二氢钠 2 种磷源中, 用磷酸二氢钾培养牟氏角毛藻效果最佳; 有机碳源 ( $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ ) 的促长效果优于无机碳源 ( $\text{NaHCO}_3$ ); 以硅酸钠为硅源最佳; 维生素  $\text{B}_1$  和  $\text{B}_{12}$  联用效果显著优于分别单独添加 ( $P < 0.05$ ); 在硫酸亚铁和柠檬酸铁 2 种铁源中, 用柠檬酸铁培养牟氏角毛藻效果最佳<sup>[35-37]</sup>。

### 1.2.2 营养盐的浓度和比例

营养盐在适宜浓度下能显著促进微藻的生长, 进而提高规模化培养的产量和稳定性, 但在高浓度下均对藻的生长速度和藻细胞浓度产生明显的抑制作用<sup>[38]</sup>。另外, 营养盐的浓度和比例对微藻油脂含量和百分比组成有很大影响, 其中以氮、磷、硅的影响最为显著, 而营养盐胁迫则有利于藻细胞脂肪尤其是甘油三酯的积累<sup>[39-41]</sup>。McGinnis 等<sup>[2]</sup>研究发现, 在氮缺乏时, 牟氏角毛藻的脂肪积累明显提高, 为对照的 5 倍多。

微藻的生长不仅与营养盐的浓度有关, 当营养盐达到一定水平时, 还受营养盐比例的影响, 比例过高或过低均不利于微藻的生长<sup>[42]</sup>。曲克明等<sup>[43]</sup>研究了氮、磷及其比例对浮游硅藻组成的影响, 认为氮、磷浓度越高, 氮磷比 (N/P) 离 Redfield 比 (16:1) 越远, 硅藻种类越少, 且硅藻在高氮磷比条件下生长较好。

文献报道的牟氏角毛藻营养盐的最适浓度和比例差异不大, 且在较高的 N/P 时具有更好的适应性<sup>[44]</sup>。有研究者认为, 氮与磷的质量浓度比为 (23 -

28):1 时, 牟氏角毛藻生长最快<sup>[41,45,46]</sup>; 而王扬才<sup>[47]</sup>认为培养牟氏角毛藻的氮、磷、铁质量浓度的理想比例为 30:3:0.1; 张国庆等<sup>[36]</sup>则认为最佳氮、磷、铁质量浓度比例为 30:0.5:0.2。以上差异可能是不同营养因子间的相互作用以及培养条件不同造成的。王蒙等<sup>[32,48]</sup>报道了不同碳氮比 (C/N, 1:1、2:1、3:1、4:1、5:1) 培养液对牟氏角毛藻生长及总脂含量的影响, 综合比较表明, C/N 比为 2:1 时, 最适合牟氏角毛藻的生长及总脂肪积累。

杨彦豪等<sup>[49]</sup>和曲克明等<sup>[50]</sup>研究了铜、锌离子对牟氏角毛藻生长的生态效应, 结果表明, 铜离子活度低于  $10^{-7.80} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  时, 角毛藻生长繁殖良好, 铜离子活度  $\geq 10^{-7.80} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  时产生毒性; 锌离子并非为牟氏角毛藻所必需, 锌离子活度  $> 10^{-7.00} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  时不利于牟氏角毛藻生长繁殖; 与锌离子相比, 牟氏角毛藻对铜离子的毒性更为敏感。

## 1.3 其他环境因素

据报道, 在适宜超声波频率条件下, 采用低功率、短时间、多次间歇超声辐射, 牟氏角毛藻的生长速率常数、脂肪酸不饱和度和主要不饱和脂肪酸百分比均有不同程度的提高, 其中, 生长的最佳超声辐射条件为 20 kHz、6 W、10 s、3 次; 提高脂肪酸不饱和度和主要不饱和脂肪酸百分比的最佳超声辐射条件为 30 kHz、4 W、10 s、3 次<sup>[51]</sup>。

虽然天然海水中稀土元素属超痕量水平, 但是稀土对植物光合作用也有明显的促进作用。曲克明等<sup>[52]</sup>研究了混合稀土对牟氏角毛藻生长繁殖的影响, 发现稀土对牟氏角毛藻的生长繁殖有明显的促进作用, 其机理可能是稀土元素离子通过与某些酶结合, 激活了酶的活性, 从而使单胞藻的光合作用加快。另外, 幸福言等<sup>[53]</sup>研究了稀土络合物镧-脯氨酸和镧-苯丙氨酸对牟氏角毛藻的影响, 发现这两种络合物对藻细胞的繁殖和叶绿素的合成均有明显的促进作用, 镧的氨基酸络合物与镧对藻的作用效果是等同的, 但最佳浓度明显降低。

## 2 生物因素的影响

### 2.1 共培养微藻

据邵波等<sup>[54]</sup>的报道, 牟氏角毛藻与青岛大扁藻 (*Platymonas helgolandica*) 共培养时, 角毛藻/扁藻的接种比例为 2:1 左右比较合适, 该比例既能保证牟氏角毛藻的生产, 又能维持一定的青岛大扁藻数量。胡一丞等<sup>[55]</sup>研究了牟氏角毛藻与微拟球藻

(*Nannochloropsis* sp.)的混合培养技术,结果表明,角毛藻/微拟球藻的接种比例为5:1左右比较合适,该比例既能保证牟氏角毛藻的生产,又能维持一定的微拟球藻数量。另外,Long<sup>[56]</sup>研究了牟氏角毛藻与微小亚历山大藻(*Alexandrium minutum*)的化感作用,结果显示,微小亚历山大藻的化感物质在几分钟内就破坏了牟氏角毛藻的膜功能,引起膜的通透性改变、光合作用的抑制、活性氧的产生以及膜生化组成的改变,并且此化感物质的化学效价可由环境参数显著调节。

## 2.2 水生细菌和病毒

水生细菌与微藻有着密切的关系,一方面,它们吸收微藻产生的有机物质,为藻的生长提供必要的营养和生长因子,调节藻的生长环境;另一方面,它们也可以抑制藻细胞的生长,甚至裂解藻细胞<sup>[57]</sup>。乔洪金等<sup>[58]</sup>发现了一株牟氏角毛藻伴生菌(*Marinobacter* sp.),属于化能异养的革兰氏阴性菌,其在分解微藻胞外产物为微藻提供无机营养盐、分泌促生长因子和促进微藻的生长等方面可能发挥着重要作用。王媛媛<sup>[59]</sup>从浙江宁波象山港海域水样中,分离得到一种对牟氏角毛藻具有溶藻效果的细菌,该菌是一种混合菌,至少有两种不同的形态,溶藻方式为竞争性溶藻。吴庆喜等<sup>[60]</sup>新发现了一株能裂解牟氏角毛藻的病毒,命名为牟氏角毛藻病毒,该病毒具有很强的感染力和严格的宿主专一性。

藻际微环境中聚集着大量细菌<sup>[61]</sup>,通过藻菌间的相互作用及双向选择,可以形成以藻为基础的、特定的、具有独特作用的、与藻共存的细菌群落(藻际细菌)<sup>[62]</sup>,这种藻-菌共生系统可以促进微藻的生长,并对外来影响因素具有明显的排他性和复原性特点。据林伟等<sup>[61-63]</sup>的报道,饵料微藻培育系统能抑制弧菌,但是这种抑制作用需要微藻及与藻际细菌相互配合、协同作用,而且在数量上需要达到一定水平。姚雪梅等<sup>[64]</sup>研究了不同接种密度的牟氏角毛藻培育系统对副溶血弧菌(*Vibrio parahaemolyticus*)和溶藻弧菌(*V. alginolyticus*)的抑制效果及其相关性,结果表明,牟氏角毛藻培育系统能够抑制2种弧菌的生长,但弧菌并没有促进或抑制牟氏角毛藻的生长,其作用仅表现在竞争生态空间上,所以,牟氏角毛藻是理想的生物饵料,更为重要的是,它不仅不能被弧菌裂解,还能拮抗弧菌。

## 3 其他影响因素

### 3.1 大规模培养

微藻的大规模培养主要有两种模式:开放池培养和光合密闭培养<sup>[1]</sup>。开放池培养可以利用自然水源或大的浅水池、水槽、圆形池和跑道式池塘,所需设备简单、投资少、成本低,但易受气候条件的影响,需要大面积的场地,易受微生物的污染且微藻易被浮游生物捕食,因此采用开放池培养时,藻的生长速度比较慢,生物量也较低。光合密闭培养可以利用跑道式、板式、管状等生物反应器,虽然生物反应器密闭培养模式存在设备成本高、灭菌困难等缺点,但它将是微藻大规模生产的发展方向<sup>[1]</sup>。

### 3.2 藻的采收

目前通常采用液体法培养牟氏角毛藻。可用于微藻采收的技术包括离心、过滤、混凝、空气浮选、超声处理和絮凝处理。考虑到运行经济、收获效率和技术可行性,絮凝处理是从大规模养殖中收获微藻的最佳方法。微藻的絮凝方式有自然絮凝、pH和壳聚糖诱导絮凝。被用于收获不同藻类的絮凝剂有无机金属离子和有机阳离子聚合物等。Kumaran等<sup>[6]</sup>将阳离子聚合物壳聚糖用于收获牟氏角毛藻,并比较了3种絮凝方式对藻生物量回收率的影响。与此同时,Huo等<sup>[65]</sup>分析了牟氏角毛藻的碱性絮凝机理,发现藻细胞的粒径随着pH值的增加而线性增加,碱性絮凝主要归因于氢氧化镁的产生,而不是磷酸钙或氢氧化钙。

## 4 总结与展望

牟氏角毛藻的生长除了受到诸多非生物因素和生物因素的影响外,还受到培养方式的影响,并且随季节、地区和人为因素等多种因素的变化而变化<sup>[9,66]</sup>,任何一种因子的缺乏或过量都会导致胁迫的产生,从而对牟氏角毛藻的生长产生不同程度的影响。

温度、盐度、光照和氮、磷营养盐是影响牟氏角毛藻生长和繁殖的主要生态因子,其中温度对牟氏角毛藻的生长和发育有调节作用,对酶的活性、营养物质的吸收利用效率及细胞分裂周期等诸多方面都存在不同程度的影响;盐度在一定程度上影响牟氏角毛藻的渗透压、营养盐的吸收及其悬浮性;光照的强弱和时间的长短决定牟氏角毛藻的光合作用效率,对藻的生长速率也起着至关重要的作用<sup>[14]</sup>;氮、磷营养盐条

件不仅是决定牟氏角毛藻生长繁殖的主要因子,也是微藻种间竞争的关键因素之一。在理想环境条件下,牟氏角毛藻无须改变任何细胞内部的生理或生化功能,就能保持光合作用的能量供应和卡尔文循环的能量消耗之间的平衡,而这种能量平衡则反映在牟氏角毛藻适宜的生长率上<sup>[13]</sup>。

牟氏角毛藻是一种很有前途的生物量新来源,被广泛应用于虾、蟹、贝类幼体及海水仔鱼的人工育苗,以促进生长和降低死亡率<sup>[67]</sup>;同时还可以有效降低养殖水体的污染,去除水体残留抗生素<sup>[68]</sup>。在育苗和养殖生产中开展牟氏角毛藻培养条件的研究,以及培养条件间的交互作用对其重要营养物质含量影响的研究,摸清不同条件下牟氏角毛藻的生长规律,是深度开发牟氏角毛藻资源的重要工作<sup>[69,70]</sup>。然而,对于牟氏角毛藻的商业化应用,还需要在优化培养参数、优化可持续发酵系统和增强下游加工方面,应用战略性的新型生物技术方法进行探索<sup>[71,72]</sup>。

#### 参考文献

- [1] 邱楚雯,王韩信. 饵料藻类的研究进展[J]. 水产科技情报, 2018, 45(3): 127-132.
- [2] MCGINNIS K M, DEMPSTER T A, SOMMERFELD M R, et al. Characterization of the growth and lipid content of the diatom *Chaetoceros muelleri* [J]. Journal of Applied Phycology, 1997, 9(1): 19-24.
- [3] LOVIO-FRAGOSO J P, HAYANO-KANASHIRO C, LÓPEZ-ELÍAS J A. Effect of different phosphorus concentrations on growth and biochemical composition of *Chaetoceros muelleri* [J]. Latin American Journal of Aquatic Research, 2019, 47(2): 361-366.
- [4] 王艳, 聂瑞, 李扬, 等. 广东沿海角毛藻 (*Chaetoceros*) 的种类多样性及其地理分布[J]. 海洋科学进展, 2010, 28(3): 342-352.
- [5] MINGGAT E, ROSELI W, TANAKA Y. Nutrient absorption and biomass production by the marine diatom *Chaetoceros muelleri*: Effects of temperature, salinity, photoperiod, and light intensity [J]. Journal of Ecological Engineering, 2021, 22(1): 231-240.
- [6] KUMARAN J, SINGH I S B, JOSEPH V. Effective biomass harvesting of marine diatom *Chaetoceros muelleri* by chitosan-induced flocculation, preservation of biomass, and recycling of culture medium for aquaculture feed application [J]. Journal of Applied Phycology, 2021, 33(3): 1605-1619.
- [7] GÖKSAN T, DURMAZ Y, GÖKPINAR Ş. Effects of light path lengths and initial culture density on the cultivation of *Chaetoceros muelleri* (Lemmermann, 1898) [J]. Aquaculture, 2003, 217(1/4): 431-436.
- [8] THORNTON D C O. Effect of low pH on carbohydrate production by a marine planktonic diatom (*Chaetoceros muelleri*) [J]. Research Letters in Ecology, 2009, 2009: 1-4.
- [9] FUJII S, NISHIMOTO N, NOTOYA A, et al. Growth and osmoregulation of *Chaetoceros muelleri* in relation to salinity [J]. Plant and Cell Physiology, 1995, 36(5): 759-764.
- [10] BOZARTH A, MAIER U G, ZAUNER S. Diatoms in biotechnology: Modern tools and applications [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2009, 82(2): 195-201.
- [11] LOCIO-FRAGOSO J P, JESÚS-CAMPOS D D, LÓPEZ-ELÍAS J A, et al. Biochemical and molecular aspects of phosphorus limitation in diatoms and their relationship with biomolecule accumulation [J]. Biology, 2021, 10(7): 565.
- [12] 骆云慧, 李来国, 赵淳朴, 等. 凡纳滨对虾-缃蛭生态循环养殖池塘中浮游植物群落结构与水质因子相关性研究[J]. 海洋与湖沼, 2020, 51(2): 378-387.
- [13] 曾蓓蓓, 黄旭雄, 危立坤, 等. 3种半咸水硅藻的适宜培养条件及其细胞生化成分[J]. 海洋渔业, 2014, 36(4): 320-328.
- [14] 朱昔恩, 林原有, 项桂德, 等. 盐度、温度和光照对广西沿海牟氏角毛藻生长的影响[J]. 广东农业科学, 2022, 49(1): 136-141.
- [15] 孟天. 温度和光照强度对5种海洋单胞藻类生长及类胡萝卜素类物质积累的影响[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015.
- [16] 郑忠明, 金春华, 冯坚. 牟氏角毛藻的生产性培养技术[J]. 水产科学, 2002(6): 20-21.
- [17] 侯旭光, 姜英辉, 李光友. 南极冰藻的总脂含量及脂肪酸组成与其低温适应性的关系[J]. 黄渤海海洋, 2002, 20(1): 47-53.
- [18] 曹春晖, 孙世春, 麦康森, 等. 温度对四株海洋绿藻总脂含量和脂肪酸组成的影响[J]. 海湖盐与化工, 2006, 35(3): 16-18.
- [19] 栾会妮, 梁亚, 杨磊, 等. 盐度、温度和光照对耐高温角毛藻藻株生长的影响[J]. 浙江海洋大学学报(自然科学版), 2019, 38(3): 217-223, 243.
- [20] 张平, 柯爱英, 黄振华, 等. 盐度对牟氏角毛藻生产性培养的影响[J]. 现代农业科技, 2008(12): 245, 247.
- [21] 班剑娇, 雷静静, 王志强, 等. 盐度对牟氏角毛藻生长及总脂含量的影响[J]. 安徽农业科学, 2013, 41(6): 2621-

- 2622.
- [22] 茅华,许海,刘兆普. 温度、光照、盐度及 pH 对旋链角毛藻生长的影响[J]. 生态科学,2007,26(5):432-436.
- [23] IWASAKI K,EVENHUIS C,TAMBURIC B,et al. Improving light and CO<sub>2</sub> availability to enhance the growth rate of the diatom, *Chaetoceros muelleri* [J]. Algal Research,2021,55:102234.
- [24] IWASAKI K,SZABÓ M,TAMBURIC B. Investigating the impact of light quality on macromolecular composition of *Chaetoceros muelleri* [J]. Functional Plant Biology,2022,49(6):554-564.
- [25] JACOBSEN A,GRAHL-NIELSEN O,MAGNESEN T. Effects of reduced diameter of bag cultures on content of essential fatty acids and cell density in a continuous algal production system [J]. Journal of Applied Phycology,2012,24(1):109-116.
- [26] 顾颖慧. 绿光对牟氏角毛藻生长的影响[J]. 中国园艺文摘,2015,31(5):219-221.
- [27] 关万春,高坤山. 阳光紫外辐射对两种微藻类光化学效率的影响[J]. 水生生物学报,2007,31(4):594-599.
- [28] LIANG Y,BEARDALL J,HERAUD P. Effects of nitrogen source and UV radiation on the growth, chlorophyll fluorescence and fatty acid composition of *Phaeodactylum tricoratum* and *Chaetoceros muelleri* (Bacillariophyceae) [J]. Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology,2006,82(3):161-172.
- [29] 胡晗华,高坤山. CO<sub>2</sub> 浓度倍增对牟氏角毛藻生长和光合作用的影响[J]. 水生生物学报,2001,25(6):636-639.
- [30] 邹宁,孙东红,韩亚香. CO<sub>2</sub> 对牟氏角毛藻高密度培养的影响[J]. 生物工程学报,2005,21(5):844-847.
- [31] WANG X W,LIANG J R,LUO C S,et al. Biomass, total lipid production, and fatty acid composition of the marine diatom *Chaetoceros muelleri* in response to different CO<sub>2</sub> levels [J]. Bioresource Technology,2014,161:124-130.
- [32] 王蒙,李纯厚,戴明,等. 不同因素对牟氏角毛藻生长和总脂含量的影响[J]. 贵州农业科学,2011,39(1):47-51.
- [33] 王蒙,李纯厚,戴明,等. CO<sub>2</sub>/空气比值对牟氏角毛藻生长和总脂含量的影响[J]. 湖南农业科学,2010(17):134-138.
- [34] PACHECO-VEGA J M,SÁNCHEZ-SAAVEDRA M D P. The biochemical composition of *Chaetoceros muelleri* (Lemmermann grown) with an agricultural fertilizer [J]. Journal of the World Aquaculture Society,2009,40(4):556-560.
- [35] 朱昔恩,黎大勇,熊建华,等. 接种密度、氮、磷、碳、硅、维生素对牟氏角毛藻生长的影响[J]. 普洱学院学报,2018,34(6):9-14.
- [36] 张国庆,邓湘云,李建保,等. 氮、磷、铁、硅营养盐对牟氏角毛藻生长的影响[J]. 河北渔业,2013(3):8-11.
- [37] GIRAULT M,ARAKAWA H,HASHIHAMA F. Phosphorus stress of microphytoplankton community in the western subtropical North Pacific [J]. Journal of Plankton Research,2013,35(1):146-157.
- [38] 牛明改. 水体富营养化藻类资源竞争与种群演替规律的初探[D]. 苏州:苏州大学,2003.
- [39] ILLMAN A M,SCRAGG A H,SHALES S W. Increase in *Chlorella* strains calorific values when grown in low nitrogen medium [J]. Enzyme and Microbial Technology,2000,27(8):631-635.
- [40] ZHILA N O,KALACHEVA G S,VOLOVA T G. Influence of nitrogen deficiency on biochemical composition of the green alga *Botryococcus* [J]. Journal of Applied Phycology,2005,17(4):309-315.
- [41] LIU Z Y,WANG G C,ZHOU B C. Effect of iron on growth and lipid accumulation in *Chlorella vulgaris* [J]. Bioresource Technology,2008,99(11):4717-4722.
- [42] STEINBERG C E W,HARTMANN H M. Planktonic bloom-forming *Cyanobacteria* and the eutrophication of lakes and rivers [J]. Freshwater Biology,1988,20(2):279-287.
- [43] 曲克明,陈碧鹃,袁有宪,等. 氮磷营养盐影响海水浮游硅藻种群组成的初步研究[J]. 应用生态学报,2000,11(3):445-448.
- [44] 梁伟峰,李卓佳,陈素文,等. 微藻群落在氮、磷比率与硅酸盐含量的生态位研究[J]. 农业环境科学学报,2008,27(2):773-777.
- [45] 于瑾,蒋霞敏,梁洪,等. 氮、磷、铁对牟氏角毛藻生长速率的影响[J]. 水产科学,2006,25(3):121-124.
- [46] AUSTIN A P,RIDLEY-THOMAS C I,LUCEY W P,et al. Effects of nutrient enrichment on marine periphyton: Implications for abalone culture [J]. Botanica Marina,1990,33(3):235-239.
- [47] 王扬才. 氮磷铁营养盐浓度对牟氏角毛藻生长的影响[J]. 海洋渔业,2006,28(2):173-176.
- [48] 王蒙,李纯厚,戴明,等. C/N 对牟氏角毛藻生长速率和总脂含量的影响[J]. 水产学报,2010,34(10):1518-1524.
- [49] 杨彦豪,罗帮,赵永贞,等. 3 种重金属离子对牟氏角毛藻生长的影响[J]. 大连海洋大学学报,2009,24(S1):69-72.
- [50] 曲克明,袁有宪. 海水中 Cu, Zn 离子对牟氏角毛藻生

- 长的生态效应[J]. 应用生态学报, 1996(S1): 88-92.
- [51] 李文权, 张元标, 陈清花, 等. 超声辐射对牟氏角毛藻的生物效应研究[J]. 海洋科学, 2001, 25(10): 39-42.
- [52] 曲克明, 袁有宪, 幸福言. 轻、中和重稀土元素对牟氏角毛藻的促生长作用[J]. 水产学报, 1998, 22(S1): 31-35.
- [53] 幸福言, 袁有宪, 曲克明. 铜-氨基酸络合物对牟氏角毛藻的影响[J]. 应用生态学报, 1998, 9(2): 206-208.
- [54] 邵波, 徐善良, 齐闯, 等. 氮磷对青岛大扁藻和牟氏角毛藻单养和共培养生长的影响[J]. 生物学杂志, 2013, 30(1): 43-46.
- [55] 胡一丞, 吴悦, 陆丰逸, 等. 牟氏角毛藻与微拟球藻、青岛大扁藻混合培养技术的初步研究[J]. 当代水产, 2016, 41(6): 77-78.
- [56] LONG M. Allelochemical interactions between the dinoflagellate *Alexandrium minutum* and the diatom *Chaetoceros muelleri* [D]. Brest, France: Université de Bretagne occidentale; Wollongong, Australia: University of Wollongong, 2018.
- [57] 李福东, 张诚, 邹景忠. 细菌在浮游植物生长过程中的作用[J]. 海洋科学, 1996(6): 30-33.
- [58] 乔洪金, 刘相全, 马晶晶, 等. 5株海洋微藻伴生细菌的分离鉴定与功能分析[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(29): 14421-14424.
- [59] 王媛媛. 二株海洋溶藻细菌的分离及其溶藻特性研究[D]. 武汉: 华中师范大学, 2011.
- [60] 吴庆喜, 程凯, 杨季芳, 等. 一株海洋牟勒氏角毛藻 (*Chaetoceros muelleri*) 病毒的分离与初步鉴定[J]. 海洋与湖沼, 2011, 42(3): 455-459.
- [61] 林伟, 陈明. 微藻与细菌相互关系研究在海水养殖中的重要意义[J]. 海洋科学, 1998(4): 34-37.
- [62] 林伟, 陈明, 刘秀云. 海洋微藻培育系统抗弧菌作用机理[J]. 海洋与湖沼, 2001, 32(1): 7-14.
- [63] 林伟, 陈明, 刘秀云. 饵料微藻培育系统内海洋弧菌生长特点[J]. 海洋与湖沼, 2000, 31(4): 398-403.
- [64] 姚雪梅, 王珺, 王思, 等. 人工培养牟氏角毛藻对弧菌抑制效果研究[J]. 南方水产, 2005, 19(4): 41-46.
- [65] HUO S H, WANG Z M, ZHU S N, et al. Process analysis of alkaline flocculation harvesting for *Chaetoceros muelleri* and *Scenedesmus quadricauda* [J]. Bioenergy Research, 2016, 9(2): 682-690.
- [66] LÓPEZ-ELÍAS J A, VOLOLINA D, ENRÍQUEZOC-ANÑ A F, et al. Indoor and outdoor mass production of the diatom *Chaetoceros muelleri* in a mexican commercial hatchery [J]. Aquacultural Engineering, 2005, 33(3): 181-191.
- [67] LIN Q, ZHUO W H, WANG X W, et al. Effects of fundamental nutrient stresses on the lipid accumulation profiles in two diatom species *Thalassiosira weissflogii* and *Chaetoceros muelleri* [J]. Bioprocess and Biosystems Engineering, 2018, 41(8): 1213-1224.
- [68] MOJIRI A, BAHARLOOEIAN M, ZAHED M A. The potential of *Chaetoceros muelleri* in bioremediation of antibiotics, Performance and optimization [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021, 18(3): 977.
- [69] 周率, 冉照收, 于珊珊, 等. 几种微藻饵料对缢蛏稚贝脂质营养组成的影响[J]. 生物学杂志, 2016, 33(3): 52-56.
- [70] 谢丽娟. 牟氏角毛藻培养特性及在对虾养殖尾水处理中的研究[D]. 福州: 福建师范大学, 2020.
- [71] MARELLA T K, BHATTACHARJYA R, TIWARI A. Impact of organic carbon acquisition on growth and functional biomolecule production in diatoms [J]. Microbial Cell Factories, 2021, 20(1): 135.
- [72] CHEN J W, HUANG Y F, SHU Y X, et al. Recent progress on systems and synthetic biology of diatoms for improving algal productivity [J]. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 2022, 10: 908804.

## Research Progress on Factors Affecting the Growth of *Chaetoceros muelleri* Lemmermann

XU Yan<sup>1,2</sup>, CHEN Ruifang<sup>1,2</sup>, KE Ke<sup>1</sup>, PENG Huijing<sup>1,2</sup>, JIANG Fajun<sup>1\* \*</sup>

(1. Guangxi Key Laboratory of Marine Environmental Science, Guangxi Beibu Gulf Marine Research Center, Guangxi Academy of Sciences, Nanning, Guangxi, 530007, China; 2. Guangxi Institute of Oceanology Company of Limited Liability, Guangxi Academy of Sciences, Beihai, Guangxi, 536000, China)

**Abstract:** *Chaetoceros muelleri* Lemmermann is a small marine planktonic diatom with thin cell wall, and most of them live alone. It has the characteristics of wide salt adaptability, high temperature resistance, fast reproduction speed and strong pollution resistance. It is usually used as aquaculture feed. The growth of *C. muelleri* Lemmermann is affected not only by many abiotic factors, but also by a combination of biological factors, culture methods and other factors. In this article, the factors affecting the growth of *C. muelleri* Lemmermann were summarized from three aspects; Abiotic factors, biological factors and large-scale culture and harvesting. The culture conditions were optimized to provide reference for the future culture of *C. muelleri* Lemmermann and its application in aquaculture.

**Key words:** *Chaetoceros muelleri* Lemmermann; culture conditions; abiotic factors; biological factors; culture and harvesting

责任编辑:梁 晓



微信公众号投稿更便捷

联系电话:0771-2503923

邮箱:gxxkxyxb@gxas.cn

投稿系统网址:<http://gxxk.ijournal.cn/gxxkxyxb/ch>