

亚硒酸钠对微拟球藻生长、抗氧化酶活性及硒含量的影响

刘亚男^{1*}, 卢亚楠^{1#}, 张美玲², 姜玉声¹, 李欣宇¹, 宋子康¹, 吕家鹏¹, 刘 闯¹

¹大连海洋大学大连市虾蟹繁育与健康养殖重点实验室, 辽宁 大连

²盘锦市农业农村局盘锦市现代农业发展中心, 辽宁 盘锦

收稿日期: 2025年4月29日; 录用日期: 2025年6月5日; 发布日期: 2025年6月16日

摘 要

为探究不同质量浓度的亚硒酸钠对微拟球藻(*Nannochloropsis oceanica*)生长、抗氧化酶活性及硒含量的影响, 试验设计0(对照)、3、6、12、24 mg/L共5个处理组, 分别为A、B、C、D和E组, 每组设3个平行, 定期检测各组微拟球藻的藻细胞密度、相对生长速率、抗氧化酶活性(过氧化氢酶CAT、谷胱甘肽过氧化物酶GSH-Px和超氧化物歧化酶SOD)及硒含量的变化, 藻初始接种密度为 5×10^6 cells/mL。试验结果表明: C组从第3天开始藻细胞密度显著高于其他组($P < 0.05$), 且这一优势持续至培养结束, E组结果与C组刚好相反; C组的相对生长速率显著高于对照组、D和E组($P < 0.05$), 与B组无显著性差异($P > 0.05$); 从培养第3天至结束, C组微拟球藻细胞密度显著高于对照组和其他浓度组($P < 0.05$), 而E组微拟球藻细胞密度显著低于对照组和其他浓度组($P < 0.05$); C组微拟球藻的相对生长速率显著高于对照组、D和E组($P < 0.05$); 添加亚硒酸钠能够显著提高微拟球藻抗氧化酶活性($P < 0.05$), 在培养至第5天时, C组微拟球藻的CAT和GSH-Px酶活性最高, 而E组微拟球藻的SOD酶活性最高, 在培养至第10天时, 各组的抗氧化酶活性均较第5天时有所降低; 微拟球藻细胞内硒含量随着添加亚硒酸钠质量浓度增加而增加, 但浓度过高微拟球藻的富集能力也会有所下降。研究表明, 添加低浓度的亚硒酸钠能够促进微拟球藻的生长和抗氧化酶活性并有效富集硒, 本试验条件下, 微拟球藻培养的适宜亚硒酸钠添加浓度为6 mg/L。

关键词

亚硒酸钠, 微拟球藻, 生长, 抗氧化

The Impact of Sodium Selenite on the Growth, Antioxidant Enzyme Activity and Selenium Content of *Nannochloropsis oceanica*

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 刘亚男, 卢亚楠, 张美玲, 姜玉声, 李欣宇, 宋子康, 吕家鹏, 刘闯. 亚硒酸钠对微拟球藻生长、抗氧化酶活性及硒含量的影响[J]. 海洋科学前沿, 2025, 12(2): 137-145. DOI: 10.12677/ams.2025.122014

Yanan Liu^{1*}, Yanan Lu^{1#}, Meiling Zhang², Yusheng Jiang¹, Xinyu Li¹, Zikang Song¹, Jiapeng Lyu¹, Chuang Liu¹

¹Key Laboratory of Shrimp and Crab Breeding and Healthy Aquaculture in Dalian City, Dalian Ocean University, Dalian Liaoning

²Panjin Municipal Bureau of Agriculture and Rural Affairs, The Modern Agricultural Development Center of Panjin City, Panjin Liaoning

Received: Apr. 29th, 2025; accepted: Jun. 5th, 2025; published: Jun. 16th, 2025

Abstract

To investigate the effects of different concentrations of sodium selenite on the growth, antioxidant enzyme activities, and selenium content of *Nannochloropsis oceanica*, the experiment was designed with five treatment groups: 0 (A, control), 3 (B), 6 (C), 12 (D), and 24 mg/L (E), each with three replicates. The cell density, relative growth rate, antioxidant enzyme activities (catalase, CAT; glutathione peroxidase, GSH-Px; and (superoxide dismutase, SOD), and selenium content of *N. oceanica* were measured periodically. The results showed that when the initial inoculation cell density of *N. oceanica* was 5×10^6 cells/mL, from the third day of cultivation until the end, the cell density in the group C was significantly higher than that in the other groups ($P < 0.05$), while the cell density in the group E was significantly lower than that in the other groups ($P < 0.05$). The relative growth rate of *N. oceanica* in the group C was significantly higher than that in the groups A, D, and E ($P < 0.05$). The addition of sodium selenite significantly increased the antioxidant enzyme activities of *N. oceanica* ($P < 0.05$). On the fifth day of cultivation, the CAT and GSH-Px activities in the group C were the highest, while the SOD activity in the group E was the highest. By the tenth day of cultivation, the antioxidant enzyme activities in all groups had decreased compared to the fifth day. The intracellular selenium content of *N. oceanica* increased with the increasing concentration of sodium selenite, but the selenium accumulation capacity decreased when the concentration was too high. The study indicates that adding a low concentration of sodium selenite can promote the growth and antioxidant enzyme activities of *N. oceanica* and effectively enhance selenium accumulation. Under the experimental conditions, the optimal concentration of sodium selenite for *N. oceanica* cultivation was found to be 6 mg/L.

Keywords

Sodium Selenite, *Nannochloropsis oceanica*, Growth, Antioxidant

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

硒(Se)是谷胱甘肽过氧化物酶和超氧化物歧化酶的活性中心,是诸多生命体所必需的微量元素之一[1],具有促进生长[2]、增强抗氧化性[3]、提高免疫力[4]、抗癌[5][6]、防治心脑血管疾病[7]和降低毒性[8]等生物学功能。

水生生态系统中,微量元素在水生食物网中的积累与传递早已有迹可循。微量元素倾向于在食物网的基础上进行生物积累,如从水体或沉积物到水生植物再到水生无脊椎动物。硒在水环境中的形态可分

为无机硒和有机硒,其中硒酸盐和亚硒酸盐是水环境中主要的存在形式,有机硒仅占一小部分[9]。在水生生态系统中,藻类是硒从水中传递到滤食性动物和其他高级消费者的主要载体,它们从水环境中积累硒,并将其转化为有机硒[10]。

微拟球藻(*Nannochloropsis oceanica*)广泛分布于全球海洋环境,尤其在温带和热带海域中占据重要生态位。其光合作用效率高,主要依赖叶绿素 a 进行光能捕获,缺乏叶绿素 b 和 c,但可积累大量二十碳五烯酸(EPA)等长链多不饱和脂肪酸,是鱼类幼体和轮虫的优质饵料[11]。作为初级生产者,微拟球藻可以通过食物链将自身中的微量元素转移到高营养级生物体内(如常用作鱼虾贝类开口饵料的轮虫、卤虫、枝角类和桡足类等),使高营养级生物通过更加安全、便捷的方式补充微量元素。已有研究证明,微拟球藻具有富集硒的能力[12],但对于微拟球藻适宜的亚硒酸钠培养浓度至今仍没有太多研究数据。本研究中,在养殖水体中添加不同浓度的亚硒酸钠,检测其对微拟球藻的生长和抗氧化活性的影响,探究微拟球藻的最适硒添加浓度,以期水产养殖提供优质的生物饵料。

2. 材料与方法

2.1. 材料

试验用微拟球藻由盘锦光合蟹业有限公司研发中心提供;亚硒酸钠($\text{Na}_2\text{SeO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)购自上海阿拉丁生化科技股份有限公司;试验用海水经过滤、沉淀、消毒、煮沸,再曝气 24 h 后使用。

2.2. 方法

2.2.1. 微拟球藻的培养

采用分析纯五水合亚硒酸钠($\text{Na}_2\text{SeO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, 分子量 263.01)作为硒源。准确称取(45.00 ± 0.05) mg $\text{Na}_2\text{SeO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 晶体,溶解于 45 mL 超纯水中,配制得到 1 g/L 的亚硒酸钠储备液,储备液经 0.22 μm 微孔滤膜过滤除菌后,避光保存于 4 $^{\circ}\text{C}$ 冰箱备用。

以 BG11 基础培养基(pH 7.00 \pm 0.02)为基质,通过储备液梯度稀释法配制含硒浓度分别为 0 (A 组,对照组)、3 (B 组)、6 (C 组)、12 (D 组)和 24 mg/L (E 组)的实验培养基。各浓度梯度设置 3 个平行。将配制好的培养基分装于 1 L 锥形瓶中,121 $^{\circ}\text{C}$ 高压蒸汽灭菌 20 min 后冷却待用。

选取处于指数生长期(培养第 5 天)的微拟球藻作为接种材料。接种前采用血球计数板测定藻细胞密度,用无菌培养基调整至初始接种浓度为(5.0 ± 0.2) $\times 10^6$ cells/mL,控制培养条件为:温度(25.0 ± 0.5) $^{\circ}\text{C}$ 、光照强度(1000 ± 50) lx,光暗周期:12 h:12 h。每日于 8:00、14:00 和 20:00 定时摇瓶三次以保证充分混匀。整个培养周期持续 10 d,期间每日 10:00 定时取样进行生长指标测定。

2.2.2. 微拟球藻生长指标的测定

取 1 mL 藻液,在显微镜下计数每天的藻细胞数,使用紫外可见分光光度计在波长为 685 nm 下测定藻的 OD 值,以培养时间对吸光度作图,绘制微拟球藻生长曲线。根据 OD 值计算其相对生长速率(R_{GR}),计算公式[13]为 $R_{GR} = \ln(N_t/N_0)/t$ 。

其中: N_0 为藻初始 OD 值; N_t 为培养 t 天时藻的 OD 值。使用总蛋白(TP)测定试剂盒(带标准:考马斯亮蓝法)(南京建成生物工程研究所)测定微拟球藻总蛋白浓度。

2.2.3. 微拟球藻抗氧化酶活性测定

培养至第 10 天的微拟球藻细胞经真空抽滤(0.45 μm 微孔滤膜)收集后,采用预冷的去离子水(4 $^{\circ}\text{C}$)反复冲洗藻泥 3~5 次,直至电导率检测(<5 $\mu\text{S}/\text{cm}$)确认培养基残留物完全去除。随后,将藻体重新悬浮于预冷的磷酸盐缓冲液(PBS, 0.1 M, pH 7.3 \pm 0.1)中,置于冰浴中待用。采用超声破碎法(JY92-IIN 型超声波细

胞粉碎机, 功率 300 W, 工作时间 3 s/间隔 5 s, 总时长 5 min)在冰浴条件下裂解藻细胞。破碎后的匀浆液于 4℃、10,000 rpm/min 离心 30 min, 收集上清液作为粗酶提取物, 分装后暂存于-80℃超低温冰箱备用, 避免反复冻融。

所有酶活性测定均采用南京建成生物工程研究所提供的试剂盒, 严格遵循制造商说明书进行操作, 并设置空白对照与标准曲线校正。

2.3. 数据处理

试验数据均以平均值 \pm 标准差(mean \pm S.D.)表示, 采用 SPSS 27.0 软件对试验结果进行单因素方差分析(ANOVA), 用邓肯法进行组间多重比较, 显著性水平设为 0.05。

3. 结果与分析

3.1. 添加不同浓度的亚硒酸钠对微拟球藻生长的影响

从图 1 可见: 各组微拟球藻细胞密度总体呈上升趋势, 随着培养时间的延长, 上升趋势趋于平缓; C 组微拟球藻生长最为迅速, 培养 3 d 后, 各培养时间点的微拟球藻细胞密度显著高于对照组和其他硒浓度组($P < 0.05$), E 组微拟球藻生长最为缓慢, 各培养时间点的微拟球藻细胞密度显著低于对照组和其他硒浓度组($P < 0.05$); 而 B 和 D 组微拟球藻的生长与对照组相近($P > 0.05$), 无明显的促生长效果。

从图 2 可见: 随亚硒酸钠浓度的增大, 微拟球藻细胞的相对生长速率呈先升高后降低的趋势; C 组微拟球藻的相对生长速率最高, 且显著高于 A、B、D 和 E 组($P < 0.05$), 而 E 组微拟球藻的相对生长速率最低, 且显著低于对照组和其他浓度组($P < 0.05$)。这表明, 添加 6 mg/L 的亚硒酸钠能够显著提高微拟球藻细胞的相对生长速率。

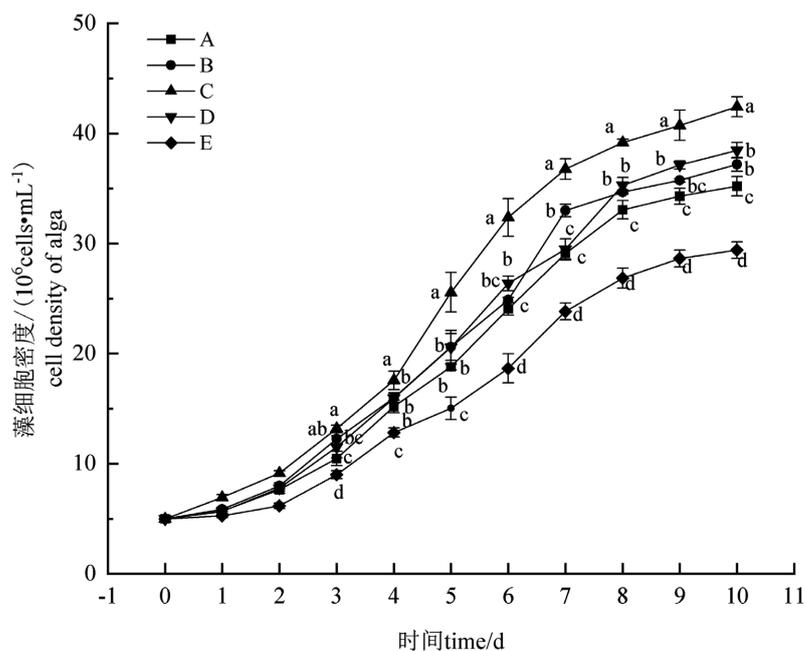


Figure 1. The cell density of *Nannochloropsis oceanica* at different culture times. Note: Different letters indicate significant differences among different concentration groups at the same time point ($P < 0.05$), while the same letters indicate no significant differences among groups ($P > 0.05$). The same applies below

图 1. 不同培养时间微拟球藻细胞密度。注: 不同字母表示同一时间不同浓度组间有显著性差异($P < 0.05$), 相同字母表示组间无显著性差异($P > 0.05$), 下同

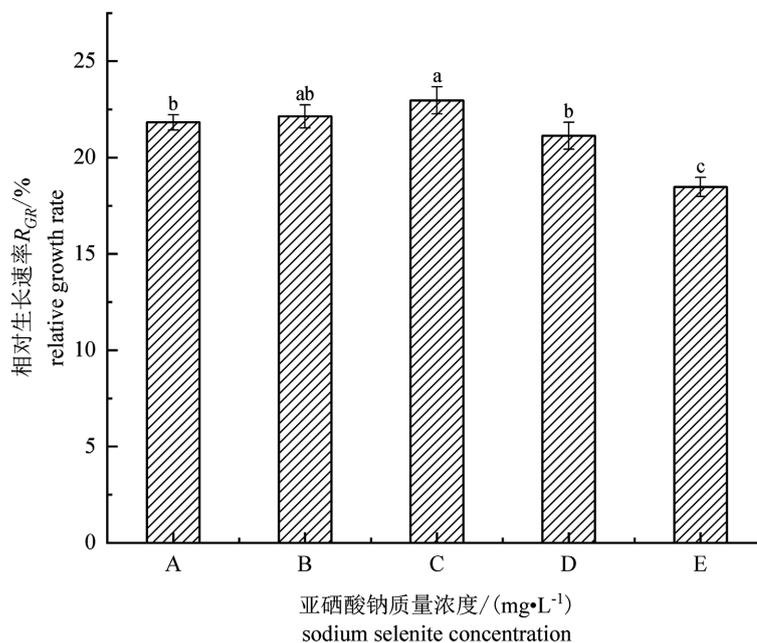


Figure 2. The relative growth rates of each group of *Nannochloropsis oceanica*
图 2. 各组微拟球藻的相对增长速率

3.2. 添加不同浓度的亚硒酸钠对微拟球藻抗氧化酶活性的影响

从图 3 可见：与不添加硒的对照组相比，添加一定浓度的硒均可以提高微拟球藻 CAT 酶活性，但酶活性与硒浓度不成正比；第 5 天时，与对照组相比，B 和 C 组显著提高了微拟球藻的 CAT 酶活性($P < 0.05$)，D 和 E 组 CAT 酶活性也高于对照组，但与对照组无显著性差异($P > 0.05$)；第 10 天时，5 组的 CAT 酶活性均较第 5 天时有所降低，其中 B、C、E 组的 CAT 酶活性显著高于对照组($P < 0.05$)。

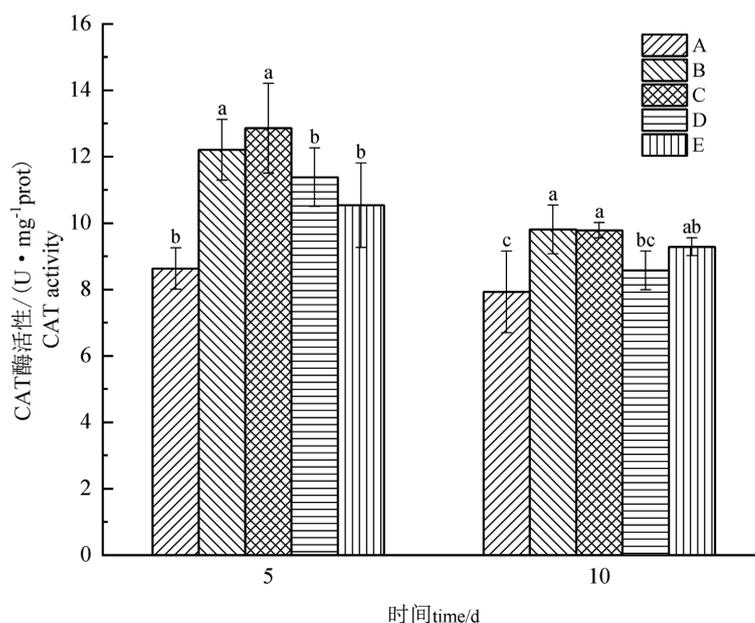


Figure 3. CAT activity of *Nannochloropsis oceanica* in each group
图 3. 各组微拟球藻过氧化氢酶活性

从图4可见：第5天时，B、C、D和E组GSH-Px酶活性显著高于对照组($P < 0.05$)；第10天时，各组的GSH-Px酶活性较第5天时有所下降，但B和C组GSH-Px酶活性仍显著高于对照组、D、E组($P < 0.05$)。

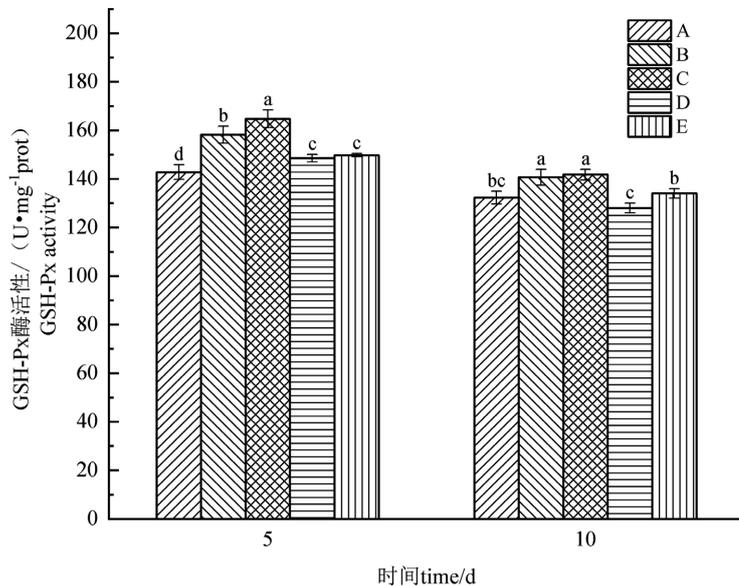


Figure 4. GSH-Px activity of *Nannochloropsis oceanica* in each group
图 4. 各组微拟球藻谷胱甘肽过氧化物酶活性

从图5可见：微拟球藻培养至第5天时，微拟球藻的SOD酶活性随着添加亚硒酸钠浓度的升高而升高，B、C、D和E组的SOD酶活性均显著高于对照组($P < 0.05$)；第10天时，各组微拟球藻的SOD酶活性均较第5天时有所下降，但4个亚硒酸钠处理组的SOD酶活性仍显著高于对照组($P < 0.05$)，E组的酶活性最高且显著高于其他组($P < 0.05$)。

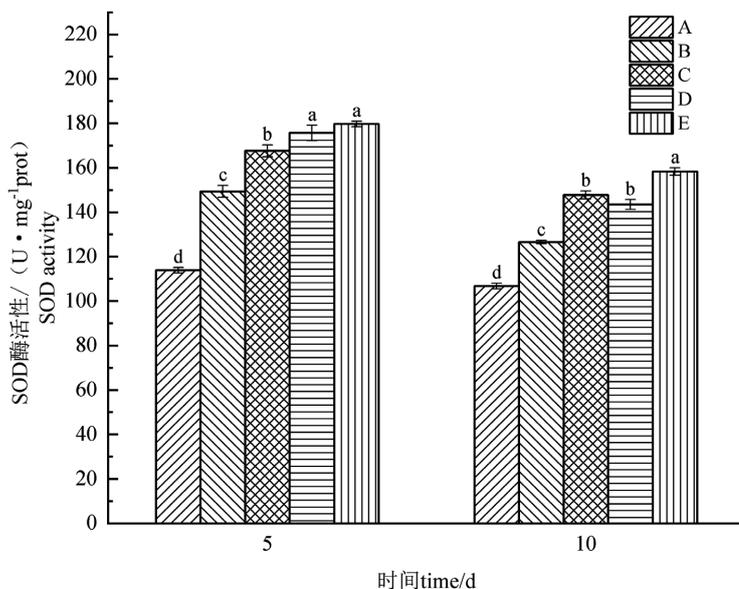


Figure 5. SOD activity of *Nannochloropsis oceanica* in each group
图 5. 各组微拟球藻超氧化物歧化酶活性

3.3. 硒在微拟球藻中的富集

从图 6 可见：随亚硒酸钠浓度的增大，微拟球藻中的总硒含量呈不断增加的趋势；B、C、D 和 E 组微拟球藻细胞内硒含量均显著高于对照组($P < 0.05$)；C 组硒含量为(8.77 ± 0.48) mg/kg，约为对照组的 58 倍；E 组硒含量为(21.03 ± 1.31) mg/kg，约为对照组的 131 倍，但增加趋势较 D 组(包括 12 mg/L)以下时有所缓减。

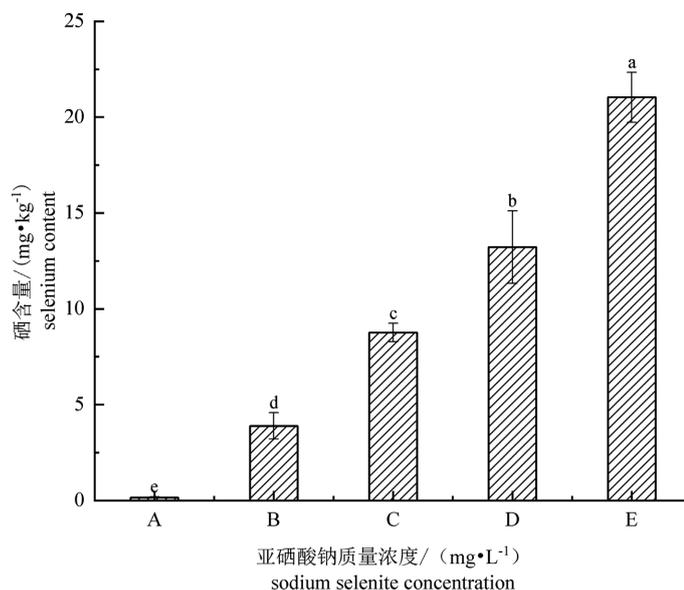


Figure 6. Selenium content with in cells of each group of *Nannochloropsis oceanica*
图 6. 各组微拟球藻细胞内的含硒量

4. 讨论

4.1. 亚硒酸钠对微拟球藻生长的影响

硒对藻类的生长既有促进又有毒害作用，添加低浓度硒时，对藻类生长有一定的促进作用，但当培养水体中硒浓度过高时，会抑制藻类的生长繁殖，甚至可直接杀死藻细胞。目前，关于硒对藻类生长影响的研究结果存在较大差异，主要原因在于不同研究采用的藻种类型、培养条件以及硒添加方式存在显著差异。已有研究中关于硒对藻类生长影响的研究结果差异较大，这主要是由于研究者使用的藻种、培养条件和硒添加方式的不同，所得出的研究结果也不尽相同。适宜的硒酸钠浓度可显著促进蛋白核小球藻的生物量积累，并提高其有机硒转化效率[13]。Guimaraes 等[12]研究发现，微拟球藻对亚硒酸盐比硒酸盐有更好的吸收效果，当亚硒酸盐浓度为 17.29 mg/L 时能促进微拟球藻的生长。倪婕等[14]在海水培养条件下，外加硒浓度为 2 μg/L 时蛋白核小球藻(*Chlorella pyrenoidosa*)的长势良好，无机硒转化为有机硒的效果较好。朱葆华等[15]采用添加硒的 Zarrmuk 培养基培养钝顶螺旋藻(*Arthrospira platensis*)时发现，添加较低浓度(1、10 mg/L)的无机硒($\text{Na}_2\text{SeO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)能促进钝顶螺旋藻藻细胞的生长。本研究中，添加 6 mg/L 的亚硒酸钠时，对微拟球藻的生长有明显的促进作用，而添加 24 mg/L 亚硒酸钠时，明显抑制了藻细胞的生长。可见，微拟球藻的生长情况与添加硒浓度关系密切。亚硒酸钠对微拟球藻的生长可能存在着毒性作用，因此在使用亚硒酸钠作为硒源培养微拟球藻时，需注意控制添加亚硒酸钠的质量浓度，以确保亚硒酸钠对微拟球藻未造成毒性。由于微拟球藻对亚硒酸钠的耐受性范围较大，因此后续研究中仍需继续探索适合微拟球藻生长的亚硒酸钠添加浓度，找出微拟球藻的最佳硒培养浓度。

4.2. 亚硒酸钠对微拟球藻抗氧化酶活性的影响

过氧化反应主要是在生物体内由活性氧自由基及其衍生物引起的纸质过氧化作用。微藻细胞能依靠自身的抗氧化防御体系阻断自由基反应,使体内活性氧自由基的生成与清除达到平衡状态。GSH-Px、SOD 和 CAT 是细胞内酶保护系统的主要成分,在细胞内主要负责清除氧自由基和还原氢过氧化物,减少细胞氧化损伤。已有大量研究证明,GSH-Px 和 SOD 对硒的敏感程度并不相同[16]。蛋白核小球藻在 2 mg/L 亚硒酸钠胁迫下未表现出细胞毒性,反而显著增强其体外抗氧化活性,并有效抑制红细胞的氧化损伤[17]。本研究中,添加一定浓度的亚硒酸钠能在一定程度上提高微拟球藻的抗氧化酶活性(CAT、GSH-Px 和 SOD),但酶活性并不随着添加亚硒酸钠浓度的升高而升高。覃宝利等[18]研究发现,不同抗氧化酶对硒的敏感度不同,添加不同浓度的亚硒酸钠后蛋白核小球藻的 GSH-Px、SOD 的酶活性表现并不相同。叶力伟[19]等研究表明,紫球藻(*Porphyridium cruentum*)的 SOD 和 GSH-Px 酶活性均随着外加硒浓度的增加而增加,表明添加一定浓度的硒能提高紫球藻的抗氧化能力。本试验中,添加亚硒酸钠组的 GSH-Px、CAT 和 SOD 酶活性显著高于未加硒组,说明添加适量的亚硒酸钠诱导了微拟球藻细胞内抗氧化酶活性的升高,提高了藻细胞的抗氧化能力。植物自身具备防御机制,当短时间和低浓度硒刺激时,微拟球藻细胞抗氧化酶活性增加,但由于胁迫时间的延长与硒浓度的增加,抗氧化酶活性会受到抑制而下降。培养后期培养水体中氮、磷等营养盐被大量消耗,可能会阻碍抗氧化酶的合成,与此同时,已存在的抗氧化酶已被逐渐降解,这两个因素可能是导致第 10 天时抗氧化酶活性降低的主要原因。

4.3. 亚硒酸钠对微拟球藻富硒能力的影响

硒对微藻的生长有促进作用也有抑制作用,但微藻对硒的生物富集能力与培养基中硒添加浓度呈非线性剂量效应关系。当添加硒的质量浓度较低时,微藻转化硒的能力随硒浓度增加而增强,但浓度较高时,微藻转化硒的能力会有所下降。覃宝利等[18]研究表明,当添加硒质量浓度 < 6 mg/L 时,蛋白核小球藻的富硒能力逐渐增加,当硒质量浓度 \geq 6 mg/L 时小球藻几乎停止生长甚至出现死亡的现象,对硒没有富集能力。姜晓玉[20]研究表明,随着培养液中硒浓度的增加,盐生杜氏藻(*Dunaliella salina*)总硒和有机硒含量均呈现先增高后降低的趋势。本试验中,当添加亚硒酸钠质量浓度为 3、6、12 mg/L 时,微拟球藻转化硒的能力逐渐增强,但当硒添加浓度为 24 mg/L 时,微拟球藻的转化能力明显下降,说明添加 24 mg/L 的亚硒酸钠可能已超过微拟球藻能富集硒的最佳浓度,导致微拟球藻富硒能力降低。微拟球藻具备将无机硒转化为有机硒的能力,后续研究中可以通过检测有机硒含量,分析有机硒含量与总硒含量关系,深入探讨微拟球藻的富硒机制。

5. 结论

1) 在不同浓度的亚硒酸钠处理条件下,微拟球藻的生长指标与抗氧化酶活性表现有较大差异,添加 6 mg/L 的亚硒酸钠能显著促进微拟球藻种群生长,而添加 24 mg/L 的亚硒酸钠对微拟球藻的生长有明显抑制作用。

2) 添加亚硒酸钠能在一定程度上提高微拟球藻抗氧化酶活性,但抗氧化酶活性并不随着培养时间的增加而升高,培养至第 10 天时的酶活性较第 5 天时明显下降。

3) 微拟球藻的富硒能力与硒添加量不成正比,浓度过高会导致其富硒能力下降。

总之,微拟球藻的富硒培养浓度不宜过高,并且应控制培养时间,以免造成藻体中毒死亡,添加亚硒酸钠可显著提高微拟球藻抗氧化酶活性且有利于藻细胞内硒的积累。

基金项目

国家重点研发计划“政府间国际科技创新合作”项目(2022YFE0117900);国家自然科学基金面上项

目(42276145); 辽宁省科技重大专项种质创新工程(2024JH1/11700009); 辽宁省属本科高校基本科研业务费专项资金(20240075)。

参考文献

- [1] Mangiapane, E., Pessione, A. and Pessione, E. (2014) Selenium and Selenoproteins: An Overview on Different Biological Systems. *Current Protein & Peptide Science*, **15**, 598-607. <https://doi.org/10.2174/1389203715666140608151134>
- [2] 李欣泽, 石博文. 硒对肉鸡生长性能、羽毛生长及肉质的影响[J]. 北方牧业, 2020(5): 28.
- [3] 李若铭, 孔祎頔, 王桂芹. 微量元素硒的生物学功能及其对水产动物的影响的研究进展[J]. 饲料工业, 2021, 42(6): 9-14.
- [4] Liu, Z., Qu, Y., Wang, J. and Wu, R. (2016) Selenium Deficiency Attenuates Chicken Duodenal Mucosal Immunity via Activation of the NF- κ B Signaling Pathway. *Biological Trace Element Research*, **172**, 465-473. <https://doi.org/10.1007/s12011-015-0589-8>
- [5] Banikazemi, Z., Haji, H.A., Mohammadi, M., Taheripak, G., Iranifar, E., Poursadeghiyan, M., et al. (2017) Diet and Cancer Prevention: Dietary Compounds, Dietary Micrnas, and Dietary Exosomes. *Journal of Cellular Biochemistry*, **119**, 185-196. <https://doi.org/10.1002/jcb.26244>
- [6] Fernandes, A.P. and Gandin, V. (2015) Selenium Compounds as Therapeutic Agents in Cancer. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)—General Subjects*, **1850**, 1642-1660. <https://doi.org/10.1016/j.bbagen.2014.10.008>
- [7] Alehagen, U., Aaseth, J., Alexander, J. and Johansson, P. (2018) Still Reduced Cardiovascular Mortality 12 Years after Supplementation with Selenium and Coenzyme Q10 for Four Years: A Validation of Previous 10-Year Follow-Up Results of a Prospective Randomized Double-Blind Placebo-Controlled Trial in Elderly. *PLOS ONE*, **13**, e0193120. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0193120>
- [8] Harsij, M., Gholipour Kanani, H. and Adineh, H. (2020) Effects of Antioxidant Supplementation (Nano-Selenium, Vitamin C and E) on Growth Performance, Blood Biochemistry, Immune Status and Body Composition of Rainbow Trout (*Oncorhynchus mykiss*) under Sub-Lethal Ammonia Exposure. *Aquaculture*, **521**, Article ID: 734942. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.734942>
- [9] Xu, Z.N., Lin, Z.Q., Zhao, G.S. and Guo, Y.B. (2023) Biogeochemical Behavior of Selenium in Soil-Air-Water Environment and Its Effects on Human Health. *International Journal of Environmental Science and Technology*, **21**, 1159-1180. <https://doi.org/10.1007/s13762-023-05169-0>
- [10] 黄丽. 富硒螺旋藻的生物分布及其含硒蛋白的抗炎活性研究[D]: [硕士学位论文]. 南宁: 广西大学, 2020.
- [11] 张元博, 田娇娇, 叶凌志, 等. 几种环境因子对微拟球藻营养物质积累的影响[J]. 核农学报, 2022, 36(6): 1273-1283.
- [12] O. Guimarães, B., de Boer, K., Gremmen, P., Drinkwaard, A., Wieggers, R., H. Wijffels, R., et al. (2021) Selenium Enrichment in the Marine Microalga *Nannochloropsis oceanica*. *Algal Research*, **59**, Article ID: 102427. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2021.102427>
- [13] 赵现伟. 蛋白核小球藻硒营养强化特性研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中农业大学, 2024.
- [14] 倪婕, 余炼, 唐亚倩, 等. 亚硒酸钠对蛋白核小球藻生长及生物转化的影响[J]. 现代食品科技, 2019, 35(11): 176-181.
- [15] 朱葆华, 沈含, 朱召霞, 等. 硒对钝顶螺旋藻生长及固碳速率的影响[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2019, 49(11): 21-28.
- [16] Sun, X., Zhong, Y., Huang, Z. and Yang, Y. (2014) Selenium Accumulation in Unicellular Green Alga *Chlorella vulgaris* and Its Effects on Antioxidant Enzymes and Content of Photosynthetic Pigments. *PLOS ONE*, **9**, e112270. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0112270>
- [17] 邓雨萍, 倪婕, 张梦菲, 等. 富硒蛋白核小球藻体外抗氧化活性及其对红细胞氧化损伤的保护作用[J]. 食品科技, 2022, 47(12): 7-14.
- [18] 覃宝利, 王宣朋, 单金峰, 等. 亚硒酸钠对蛋白核小球藻生长及抗氧化酶活性的影响[J]. 大连海洋大学学报, 2020, 35(6): 838-846.
- [19] 叶力玮, 李锐龙, 赖俊翔, 等. 硒浓度对紫球藻的有机硒转化能力及生长的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(21): 7028-7034.
- [20] 姜晓玉. 硒对盐藻的生理影响及富硒盐藻蛋白提取初步研究[D]: [硕士学位论文]. 南宁: 广西大学, 2023.