

双齿围沙蚕对两种硒源的富集研究

郑江月^{1*}, 张美燕², 姜玉声^{1#}, 黄 姝¹, 张永和², 卢亚楠¹, 司永国³, 杨国军¹, 刘心怡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和布克赛尔蒙古自治县宏达盐业有限责任公司, 新疆 塔城

³福建省东方利洋苗种繁育有限公司, 福建 漳州

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

硒具有促进水生动物生长, 提高抗氧化能力的功效。双齿围沙蚕为典型的底栖生物, 富集微量元素的能力强, 且是重要的生物饵料, 作为水产富硒载体优势明显。本实验以25、50、75 mg/L浓度纳米硒和蛋白硒对双齿围沙蚕进行浸泡处理, 测定分析了48 h内沙蚕体内硒的富集量、活力及总氮、亚硝酸氮等水质参数的变化, 进一步探究了鲜活与冷冻沙蚕对两种硒源的富集效果。结果显示: (1) 50 mg/L纳米硒浸泡沙蚕4 h时, 其体内硒含量最高(26.28 mg/kg), 75 mg/L蛋白硒浸泡沙蚕8 h后, 体内硒含量达峰值(11.93 mg/kg)。纳米硒在鲜活沙蚕中的富集量高于冷冻沙蚕, 而蛋白硒富集情况则相反; (2) 25和50 mg/L纳米硒浸泡4和8 h时, 沙蚕硒含量显著高于同浓度蛋白硒组, 而75 mg/L蛋白硒组在浸泡8 h时的硒含量显著高于纳米硒组; (3) 50和75 mg/L蛋白硒浸泡沙蚕16 h后出现死亡, 而纳米硒各浓度组及25 mg/L蛋白硒组沙蚕的活力维持在24 h时无显著变化; (4) 添加纳米硒和蛋白硒两种硒源后沙蚕养殖水体中亚硝酸氮浓度下降, 而总氮浓度在8 h以内先降低, 而后升高。

关键词

双齿围沙蚕, 硒, 生物富集, 水质

A Study on Bioaccumulation of Two Types of Selenium in the Sandworm *Perinereis aibuhitensis*

Jiangyue Zheng^{1*}, Meiyang Zhang², Yusheng Jiang^{1#}, Shu Huang¹, Yonghe Zhang², Yanan Lu¹, Yongguo Si³, Guojun Yang¹, Xinyi Liu¹

¹Dalian Key Laboratory of Breeding, Reproduction and Aquaculture of Crustaceans, Dalian Ocean University, Dalian Liaoning

²Hebukeaser Mongolian Autonomous County Hongda Salt Industry Co., Ltd., Tacheng Xinjiang

³Fujian Dongfang Liyang Seedling Breeding Co., Ltd., Zhangzhou Fujian

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 郑江月, 张美燕, 姜玉声, 黄姝, 张永和, 卢亚楠, 司永国, 杨国军, 刘心怡. 双齿围沙蚕对两种硒源的富集研究[J]. 海洋科学前沿, 2025, 12(2): 126-136. DOI: 10.12677/ams.2025.122013

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

Abstract

Selenium (Se) has the effect of promoting the growth of aquatic animals and enhancing their anti-oxidant capacity. As a typical benthic organism with exceptional trace elemental bioaccumulation capacity and significant value as live feed, the sandworm *Perinereis aibuhitensis* demonstrates prominent potential as a selenium Bioaccumulated carriers for aquaculture. In this experiment, sandworms were immersed in nano selenium (Nano-Se) and protein selenium (Pro-Se) at concentrations of 25, 50, and 75 mg/L. Temporal variations in selenium accumulation, sandworm vitality, water quality parameters, such as total ammonia nitrogen and nitrite nitrogen, were measured and analyzed over 48 h. Further exploration was conducted on the bioaccumulation effect of fresh and frozen sandworm for two selenium sources. Results showed that: (1) The highest selenium bioaccumulation (26.28 mg/kg) in sandworms was observed after 4 h of immersion in 50 mg/L Nano-Se. The highest selenium bioaccumulation (11.93 mg/kg) occurred after 8 h of immersion in 75 mg/L Pro-Se. The selenium bioaccumulation of Nano-se in live sandworm was higher than that in frozen counterparts, whereas the bioaccumulation of Pro-Se exhibited the opposite trend. (2) When immersed in 25 and 50 mg/L Nano-Se for 4 and 8 h, the selenium content in sandworms was significantly higher than that in the same concentrations of Pro-Se groups. However, the selenium content in the 75 mg/L Pro-Se group was significantly higher than that in the nano-Se group after immersing for 8 h, and the bioaccumulation rate of Nano-Se was higher than that of Pro-Se. (3) Mortality was observed in sandworms exposed to 50 and 75 mg/L of Pro-Se after 16 h of immersion, whereas sandworms in all concentration Nano-Se and 25 mg/L of Pro-Se groups showed no significant changes in vitality after 24 h. (4) After the addition of Nano-Se and Pro-Se sources to the sandworms culture water, the concentration of nitrite nitrogen decreased, while the total ammonia nitrogen concentration declined within the first 8 h but subsequently increased.

Keywords

Perinereis aibuhitensis, Selenium, Bioaccumulation, Water Quality

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

双齿围沙蚕(*Perinereis aibuhitensis*), 环节动物门, 多毛纲, 游走目, 沙蚕科, 围沙蚕属, 广泛分布于海洋、河口及潮间带等不同环境[1]。双齿围沙蚕作为一种优质的生物饵料, 不仅富含蛋白质、脂肪和维生素, 还含有多种微量元素和生物活性物质[2][3], 这些成分对动物尤其是水生动物的生长、免疫和繁殖均有显著促进作用[4]-[6], 常被用于水产亲体促熟的优质饵料。作为典型底栖生物, 双齿围沙蚕的生物富集能力显著, 其通常是海区重金属的主要生物载体[7][8]。研究表明, 沙蚕对硒的富集效率可达环境浓度10~100倍[9]。任可欣等[10]发现多齿围沙蚕在镉暴露14 d时, 其富集系数可达569~12,241。

硒(Selenium, Se)已公认为人类等生物必需的微量元素[11][12], 在抗氧化防御、免疫调节等生理过程中发挥重要作用[13][14]。自然界的硒通常以无机态或有机态存在, 前者在过量时对生物体具有毒性作用, 因此存在形态与浓度决定了其生物学功能。作为重要的饲料添加元素, 硒的添加多以无机硒、有机硒和纳米硒形式为主, 其中纳米硒因其高生物活性和低毒性被广泛应用于医药与农业领域[15][16], 而蛋白硒作为天

然有机硒形态，广泛存在于水体与底泥中，前者颗粒微小可能增强其生物渗透性[17]，而后者缓释特性可能延长其生态暴露周期。不同硒源已广泛应用于水产配合饲料，在富硒水产品的生产中也有报道[18]。然而，通过沙蚕等生物饵料对硒元素进行富集或将无机硒转化为有机硒，再投喂养殖对象的研究则少有报道。

本研究以双齿围沙蚕为研究对象，通过不同浓度纳米硒与蛋白硒的浸泡实验，测定分析了沙蚕体内硒的富集量、活力及总氨氮、亚硝酸氮等水质参数的变化，探讨了沙蚕对两种硒源的富集特征，旨在为沙蚕等底栖生物富硒机理研究及其应用提供参考。

2. 材料与方法

2.1. 材料

实验所需的双齿围沙蚕购于浙江省台州辰诺沙蚕养殖基地，个体重为 1.88 ± 0.25 g。实验用纳米硒购自山东安为生物科技有限公司(硒含量为 2569.52 mg/kg)，蛋白硒由海洋微生物酶资源与硒工程课题组提供(硒含量为 6500.00 mg/kg)。

2.2. 方法

2.2.1. 两种硒源在双齿围沙蚕中的富集研究

将双齿围沙蚕暂养于白色水槽中 2 d，其中加入 3 L 盐度为 30 的过滤海水，室温 30℃，每隔 24 h 换水一次。正式实验用 1.5 L 的塑料盒，加入 1 L 海水。设置纳米硒和蛋白硒两种硒源的添加浓度为 0 (对照组)、25、50 和 75 mg/L，每组设置 3 个平行，每个平行放入 13 尾健康、活力良好的双齿围沙蚕。实验期间不换水，持续充气，整个过程不投喂。分别在 0、4、8 和 16 h 取双齿围沙蚕样本，收集至 10 mL 离心管内，置于-40℃冰箱保存。

另外，为探究冷冻和鲜活双齿围沙蚕对不同硒源的富集规律，分别以 25 和 75 mg/L 浓度的硒源进行浸泡实验，并于 1.5 h 和 4.5 h 取样，置于-40℃冰箱保存。冻存的样品寄往北京清析技术研究院参照 GB5009.93-2017 中电感耦合等离子体质谱法进行测定。

2.2.2. 两种硒源对双齿围沙蚕活力的影响

实验方法同上，分别在 0 h、4 h、8 h、16 h、24 h 和 48 h 观察双齿围沙蚕活力，参照以下标准(表 1)进行评价。

Table 1. Evaluation criteria on vitality of *P. aibuhitensis*
表 1. 双齿围沙蚕活力的评价标准

活力等级 Vitality level	双齿围沙蚕状态 The state of <i>P. aibuhitensis</i>
5	双齿围沙蚕活力好，对刺激反应迅速，在海水中受到较轻刺激身体呈“s”状游泳，干露时受到刺激身体卷曲跳跃。
4	双齿围沙蚕活力较好，对刺激反应较迅速，在海水中受到较轻刺激身体呈“s”状游泳，干露时受到较重刺激身体呈卷曲形跳跃。
3	双齿围沙蚕活力一般，对刺激反应一般，在海水中受到较重刺激身体呈“s”状游泳，干露时受到较重刺激身体呈卷曲形跳跃。
2	双齿围沙蚕活力差，对刺激反应迟缓，在海水中受到较重刺激身体呈扭动状，干露时受到较重刺激仅爬行。
1	双齿围沙蚕活力非常差，对刺激反应非常迟缓，在海水中受到较重刺激身体呈轻微扭动状，干露时受到较重刺激有微弱反应。

2.2.3. 添加两种硒源后双齿围沙蚕养殖水质的变化

实验方法同上, 分别在 0 h、4 h、8 h、16 h、24 h 和 48 h 取水样。采用 YSI 多参数水质分析仪(Professional Plus Model 550A, Yellow Springs, USA)测定水样的盐度、水温, 使用便携 pH 计(Model PB-10, Sartorius, Germany)测定水样的 pH, 采用次溴酸钠氧化法测定 TAN [19], 采用重氮-偶氮光度法测定 $\text{NO}_2\text{-N}$ [20]。

2.3. 数据处理

所有实验数据均以平均值 $\pm$ 标准差(mean $\pm$ S.D.)表示, 采用 SPSS 25 软件进行统计分析。硒富集量、活力及水质数据采用单因素方差分析(One-way ANOVA), 确定同一时间不同处理组之间是否存在差异, 当发现总体差异时, 确定平均值之间的差异, 并通过 Duncan 检验进行显著性差异比较。采用独立样本 T 检验分析了活和冷冻双齿围沙蚕中硒富集量。显著性水平设为 0.05。采用 Graph Pad 10 软件绘图。

3. 结果与分析

3.1. 两种硒源在双齿围沙蚕中的富集研究

不同浓度两种硒源在双齿围沙蚕体内的富集量如图 1 所示, 可见纳米硒组沙蚕体内的硒富集量随浸泡时间呈现先上升后下降的趋势, 其中 50 mg/L 纳米硒组沙蚕在浸泡 4 h 后, 硒富集量达到最大值, 为 26.28 mg/kg, 显著高于其他各组($p < 0.05$)。之后, 随着时间的延长逐渐下降, 至 16 h 时, 硒富集量降至 5.45 mg/kg。75 mg/L 组沙蚕硒富集量在 4 h 时达到最大值, 为 8.11 mg/kg, 但之后下降明显, 至 16 h 时, 硒富集量降至 0.72 mg/kg。25 mg/L 组沙蚕硒富集量在 8 h 时达到最大值, 为 2.78 mg/kg, 但显著低于其他各浓度组($p < 0.05$)。25 mg/L 组沙蚕硒富集量在 8 h 时达到最大值, 为 2.78 mg/kg, 但显著低于其他各浓度组($p < 0.05$)。

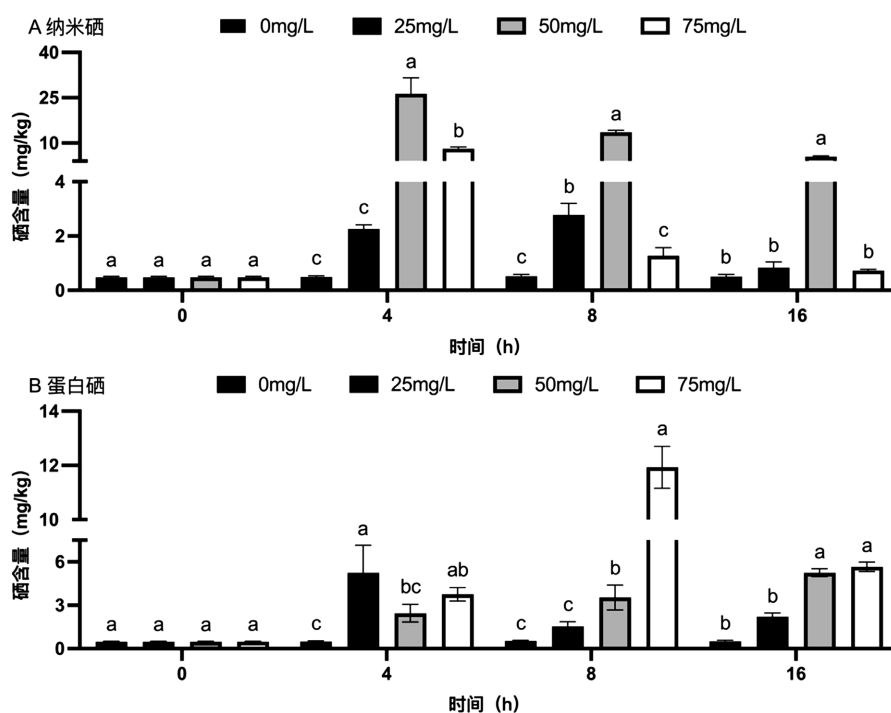


Figure 1. Bioaccumulation of different concentrations of Nano-Se (A) and Pro-Se (B) in *P. aibuhitensis*. Note: Different letters at the same time indicate significant differences between the groups ($p < 0.05$), while the same letter at the same time indicates no significant differences between the groups ($p > 0.05$), et sequentia

图 1. 不同浓度纳米硒(A)和蛋白硒(B)在双齿围沙蚕中的富集。注: 标有不同字母表示相同时间组间有显著差异($p < 0.05$), 标有相同字母表示相同时间组间无显著差异($p > 0.05$), 下同

添加 75 mg/L 蛋白硒组沙蚕在浸泡 8 h 后, 硒富集量达到最大值, 为 11.93 mg/kg, 显著高于其他各组($p < 0.05$)。之后, 随着时间的延长逐渐下降, 至 16 h 时, 硒富集量降至 5.66 mg/kg。50 mg/L 组沙蚕硒富集量随浸泡时间呈现上升趋势, 在 16 h 时达到最大值 5.25 mg/kg。25 mg/L 组沙蚕在浸泡 4 h 后, 硒富集量达到最大值, 为 5.25 mg/kg, 至 8 h 时, 硒富集量降至 1.54 mg/kg, 随后开始小幅度上升, 至 16 h 时, 硒富集量上升至 2.21 mg/kg。

相同浓度的两种硒源在双齿围沙蚕中的富集的比较如图 2 所示。以浓度为 25 mg/L 时, 浸泡 4 和 16 h 蛋白硒组沙蚕富集硒的量显著高于其他组($p < 0.05$)。以浓度为 50 mg/L 的两种硒源处理沙蚕时, 浸泡 4 和 8 h 纳米硒组双齿围沙蚕中硒的富集量显著高于其他组($p < 0.05$)。以浓度为 75 mg/L 的两种硒源处理沙蚕时, 浸泡 8 h 和 16 h 沙蚕中硒的富集量显著高于其他组($p < 0.05$)。

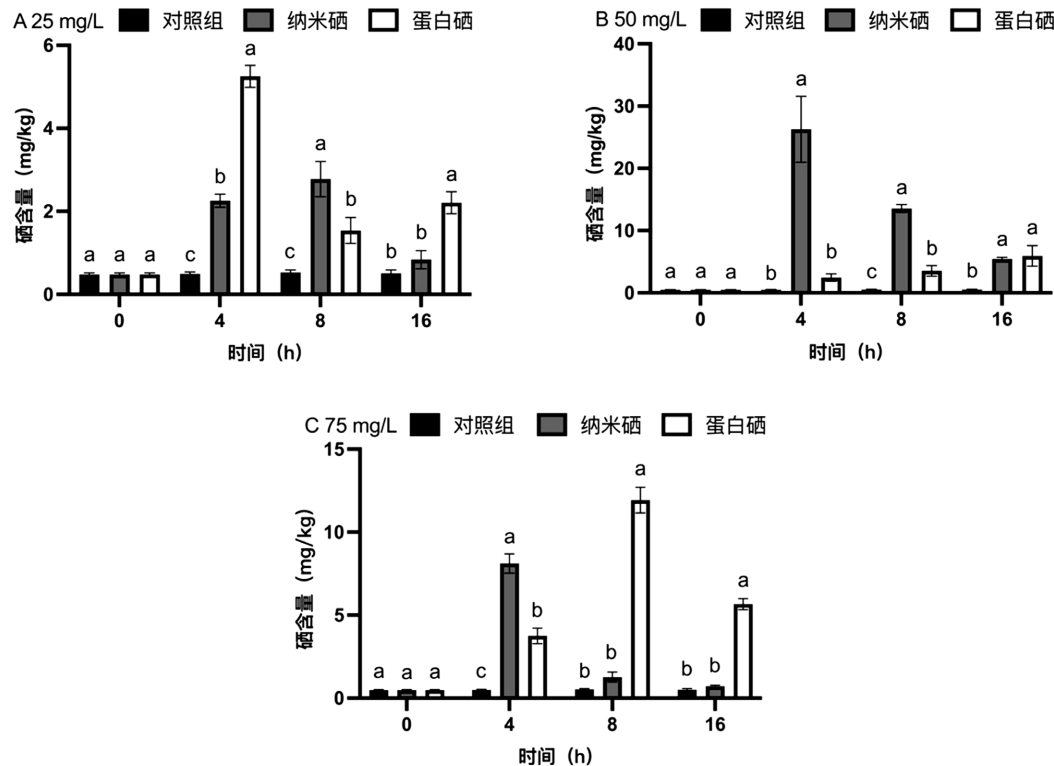


Figure 2. Bioaccumulation of two types of selenium at the same concentration in *P. aibuhitensis*
图 2. 相同浓度两种硒源在双齿围沙蚕中的富集

以不同浓度两种硒源处理鲜活和冷冻双齿围沙蚕, 分析其在鲜活和冷冻沙蚕中富集情况。由图 3 可见, 各时间点两种硒源在双齿围沙蚕中的富集量随硒浓度的增加而升高。不同浓度纳米硒浸泡 1.5 h 和 4.5 h 后, 其在鲜活沙蚕中的富集量显著高于冷冻沙蚕($p < 0.05$); 而不同浓度蛋白硒浸泡处理后, 其在鲜活沙蚕中的富集量显著低于冷冻沙蚕($p < 0.05$)。

3.2. 两种硒源对双齿围沙蚕活力的影响

两种硒源不同浓度处理组的双齿围沙蚕活力评价如表 2 所示。对照组在各时间点均表现出良好的状态。蛋白硒 50 和 75 mg/L 组沙蚕在 16 h 时出现活力下降的现象, 至 48 h 时活力非常差甚至死亡。蛋白硒 25 mg/L 组沙蚕在 24 h 时活力开始下降, 至 48 h 时活力较差。纳米硒各组沙蚕在 48 h 时才出现活力下降的现象, 且浓度越高活力越差, 但均优于同时间蛋白硒组。

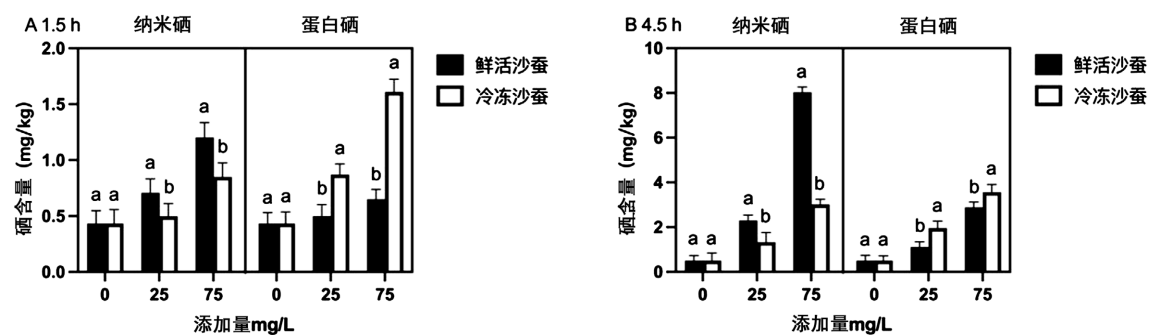


Figure 3. Bioaccumulation changes of two types of selenium sources with different concentrations in fresh and frozen *P. aibuhitensis*

图 3. 不同浓度两种硒源在鲜活和冷冻双齿围沙蚕中的富集变化

Table 2. Effects of different concentrations of nano selenium and protein selenium on the activity level of *P. aibuhitensis*

表 2. 不同浓度纳米硒和蛋白硒对双齿围沙蚕活力等级的影响

添加浓度/(mg/L) Fortified concentration/(mg/L)		时间/(h) Time/(h)					
		0	4	8	16	24	48
蛋白硒 Protein selenium	0	5	5	5	5	5	5
	25	5	5	5	5	5	2
	50	5	5	5	4	3	1
	75	5	5	5	3	2	死亡
	25	5	5	5	5	5	4
纳米硒 Nano selenium	50	5	5	5	5	5	3
	75	5	5	5	5	5	2

3.3. 添加两种硒源后双齿围沙蚕养殖水质的变化

分别向养殖水体中加入不同浓度的纳米硒和蛋白硒，水中总氨氮(TAN)随时间的变化如图 4 所示。可见各组水体中 TAN 呈现下降趋势。除 0 h 外，各时间点两种硒源 0 mg/L 组 TAN 显著高于其他各组 ($p < 0.05$)。

分别向养殖水体中加入不同浓度的纳米硒和蛋白硒后，水中 NO_2^- -N 随时间的变化如图 5 所示。对照组海水中 NO_2^- -N 随时间呈缓慢上升趋势，其他各添加组随时间呈先下降后上升趋势。两种硒源 4 h 和 8 h 对照组海水中 NO_2^- -N 显著高于其他组 ($p < 0.05$)。16 h 和 24 h 添加浓度为 75 mg/L 组海水中 NO_2^- -N 显著高于其他组 ($p < 0.05$)。48 h 对照组和 75 mg/L 组海水中 NO_2^- -N 显著高于 25 和 50 mg/L 组 ($p < 0.05$)。

4. 讨论

4.1. 两种硒源在双齿围沙蚕中的富集研究

双齿围沙蚕对硒的富集及生理活力响应显著依赖于硒源的化学形态、浸泡浓度及时间，并与水体环境参数的动态变化密切相关[21]。有研究表明，沙蚕对硒的富集效率可达环境浓度 10~100 倍[9]。邓岳松等[22]通过硒对尼罗罗非鱼的急性毒性试验，表明亚硒酸钠的急性毒性约为纳米硒的 8 倍，蛋氨酸硒的急

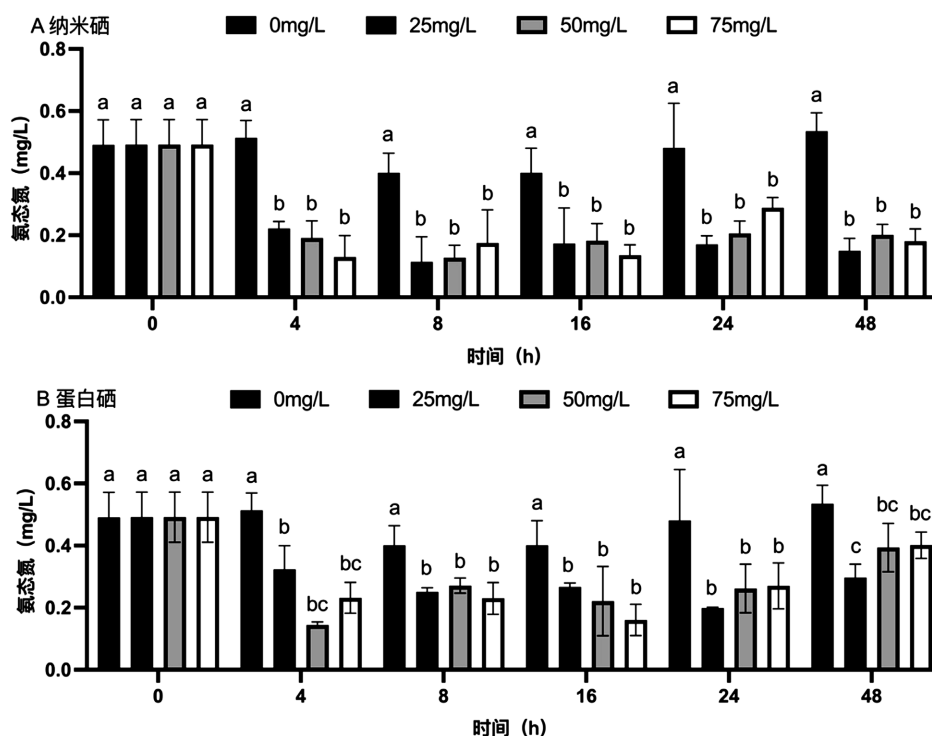


Figure 4. Changes in total ammonia nitrogen concentration in *P. aibuhitensis* culture water after treatment with Nano-Se (A) and Pro-Se (B)

图 4. 纳米硒(A)和蛋白硒(B)处理后双齿围沙蚕养殖水体总氨氮浓度的变化

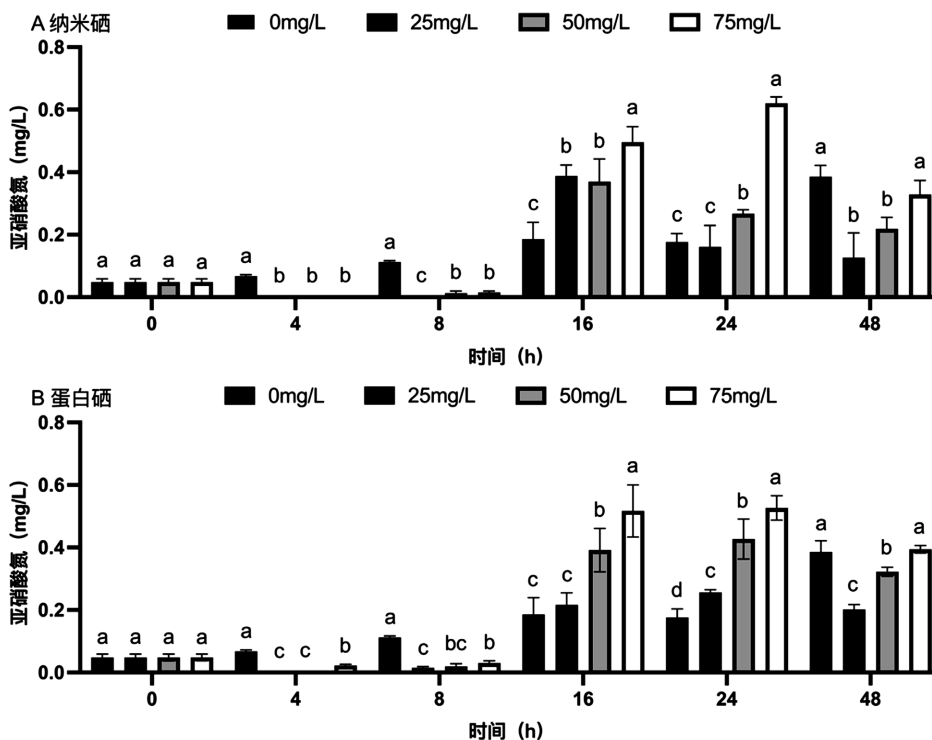


Figure 5. Changes in nitrite nitrogen concentration in *P. aibuhitensis* culture water after treatment with Nano-Se (A) and Pro-Se (B)

图 5. 纳米硒(A)和蛋白硒(B)处理后双齿围沙蚕养殖水体亚硝酸氮浓度的变化

性毒性约为纳米硒的 4 倍。施力光等[23]发现给羔羊投喂纳米硒和蛋氨酸硒都能有效地增加血液, 组织中硒的沉积, 但纳米硒形式更易于硒的吸收和沉积。本研究发现纳米硒与蛋白硒的富集特性存在差异。纳米硒出现高富集-低急性毒性现象, 在短期(4 h)内即可达到富集峰值(如 50 mg/L 组 26.28 mg/kg), 但其代谢速率快(4~16 h 下降约 84%)。这可能是通过氧化还原反应转化为低毒性单质硒(Se^0)或经外排蛋白主动排出[24][25], 减少体内活性硒的滞留。快速代谢特性解释了纳米硒组活力下降较晚的现象(25~75 mg/L 组活力从 24 h 开始下降), 说明其短期毒性压力可通过抗氧化防御系统, 如谷胱甘肽过氧化物酶活性上调清除过量活性氧(ROS)部分缓解[26]。50 mg/L 纳米硒组的高富集速率(4 h 达 26.28 mg/kg)可能通过食物链传递, 威胁高营养级生物[27]。相比之下, 蛋白硒的富集过程呈现缓释特征(如 75 mg/L 组 8 h 达 11.93 mg/kg), 其水解生成的活性硒(如 Se^{4+})通过 Fenton 反应产生 ROS 持续诱导线粒体膜电位崩溃及 DNA 氧化损伤[28][29], 导致高浓度组(50~75 mg/L)活力从 16 h 显著下降, 48 h 时 75 mg/L 组死亡。此外, 低浓度硒的代偿效应(如 25 mg/L 组活力维持至 24 h)可能与 Nrf2/ARE 通路激活上调抗氧化酶表达、甲基化或金属硫蛋白结合相关[30][31], 但蛋白硒的缓释特性仍使其在长期浸泡中具有较高生态风险。综上, 纳米硒在沙蚕体内的富集量显著高于蛋白硒, 可作为水产用生物饵料可选的硒源。

4.2. 双齿围沙蚕对两种硒源富集方式的研究

通过分析双齿围沙蚕在不同硒源(纳米硒与蛋白硒)及添加浓度下的硒富集行为, 揭示了硒进入生物体的途径依赖于其化学形态及生物体的代谢。在未添加硒的对照组中, 双齿围沙蚕的硒本底含量较低(1.5 h 为 0.43 mg/kg, 4.5 h 为 0.50 mg/kg), 表明其硒的富集主要来自外源浸泡。随着硒添加浓度的增加, 两种硒源的富集量均呈现剂量依赖性上升, 可能与硒的跨膜吸收及胞内转运过程相关。研究表明, 硒的吸收以无机硒(硒酸盐、亚硒酸盐)被动扩散和有机硒(硒代蛋氨酸为主)主动运输为主。硒在体内分为稳定库(储存硒代蛋氨酸)和动态库(直接利用), 骨骼肌和肝脏为主要储存器官[32]。

纳米硒在鲜活沙蚕中的富集量显著高于冷冻个体, 这一现象与其物理化学特性及代谢活性密切相关。纳米颗粒的小粒径(<100 nm)和高比表面积(约 50 m^2/g)使其更易通过胞吞作用进入细胞[33]。鲜活沙蚕的 ATP 供能与膜转运蛋白(如网格蛋白介导的胞吞途径)可促进纳米硒的跨膜转运[34], 而冷冻个体因细胞膜完整性破坏、代谢完全停滞及主动运输终止, 导致纳米颗粒的胞吞效率显著降低。尽管冷冻个体的被动扩散可能允许少量纳米硒进入细胞[35], 但其总富集量仍远低于鲜活个体, 表明纳米硒的吸收高度依赖生物体的能量代谢与活性转运。

蛋白硒的富集则呈现截然不同的模式: 鲜活沙蚕的硒富集量显著低于冷冻个体。蛋白硒需通过肠道蛋白酶水解或微生物代谢释放活性硒(如硒代蛋氨酸)[35][36], 随后经氨基酸转运体吸收[37]。鲜活沙蚕的代谢活性加速了硒代氨基酸的进一步代谢与排泄, 部分硒可能被转化为二甲基硒(DMSe)等挥发性化合物通过呼吸或排泄途径逸失[35], 或通过 ABC 转运体主动外排[24][25]。相反, 冷冻死亡沙蚕因酶系统失活、代谢功能完全终止, 蛋白硒无法有效水解, 且排泄途径受阻, 导致结合态硒在肠道或组织内大量滞留。这种“代谢停滞”状态使得死亡个体的表观硒富集量被显著高估, 而鲜活个体的动态代谢过程更真实地反映了硒的生物可利用性。

综上所述, 硒进入沙蚕的途径可归纳为两种模式, 其中纳米硒依赖物理渗透(如胞吞作用)与代谢活性驱动的跨膜转运, 而蛋白硒依赖酶解释放活性硒后的特异性吸收与代谢排泄。值得注意的是, 冷冻沙蚕的生理状态(如细胞膜破裂、离子通道失活)可能改变硒的跨膜机制, 纳米硒在死亡个体中可能通过被动扩散进入细胞[34], 但其效率远低于鲜活个体的主动胞吞; 蛋白硒则因无法水解而以大分子形式滞留于死亡个体的消化道内, 而非被有效吸收。这种形态-活性耦合机制解释了为何鲜活与冷冻沙蚕在不同硒源下呈现相反的富集趋势。未来研究可结合透射电镜与同位素标记技术, 原位观测硒颗粒在鲜活与死亡个体

中的跨膜路径差异,或通过基因敲除技术验证特定转运蛋白(如 LAT1、ABCC2)在硒吸收中的作用,以进一步阐明分子机制。

4.3. 两种硒源对双齿围沙蚕养殖水质的影响

本试验中对照组 TAN 先下降,后缓慢升高,亚硝酸氮持续升高,可能是由于前期充氧导致氨氧化细菌功能增强,使得氨氮转化为亚硝酸氮,后期总氨氮缓慢上升可能是由于沙蚕本身排氨,促进氨氧化反应生成亚硝酸氮。实验所用蛋白硒的载体是麦麸,纳米硒是单质硒,无载体,但两种硒添加在短时间内显著降低了沙蚕养殖水体 TAN 和 $\text{NO}_2\text{-N}$ 浓度,降幅在 40%~60%之间,说明硒在降低 TAN 和 $\text{NO}_2\text{-N}$ 的过程中可能起到一定作用。比较两种硒源组的亚硝酸氮的变化,表明硒可能通过抑制氨氧化细菌的功能或促进亚硝酸氧化细菌的功能。实验后期,由于硒在底层堆积,使得底层缺氧,促进了异化硝酸盐还原反应。溶解氧(DO)水平可能影响硒的氧化还原状态,进而改变其生物可利用性。例如,低 DO 环境下 Se^{4+} 的还原可能生成毒性更强的 Se^{2-} 形态[38]。这也能解释 48 h 时 75 mg/L 蛋白硒组沙蚕死亡(表 1 和图 5),说明其在底栖生态系统中有高风险性。未来可结合转录组学阐明“毒性-缺氧”反馈循环的分子通路;开发基于硒形态调控的水体修复技术,抑制 Se^{4+} 向 Se^{2-} 的毒性转化。

5. 结论

本试验条件下,双齿围沙蚕对纳米硒的最大富集量和速率大于蛋白硒,蛋白硒富集量随时间的稳定性高于纳米硒。纳米硒浓度小于 25 mg/L,蛋白硒浓度小于 50 mg/L 时,双齿围沙蚕活力变化不明显。综上,以低成本的纳米硒强化沙蚕作为生物饵料具有良好的应用潜力。

项目基金

国家重点研发计划“政府间国际科技创新合作(2022YFE0117900)”项目;
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);
大连金石湾实验室项目(DIjswsf202402)。

参考文献

- [1] 王雅瑜. 不同地区不同体色养殖线围沙蚕(*Perinereis lineata*)的分类学与遗传多样性研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连海洋大学, 2022.
- [2] 胡园, 陈然, 胡利华, 等. 不同地区养殖与野生沙蚕营养成分分析与比较[J]. 水产科学, 2018, 37(1): 93-99.
- [3] 孙辉, 于静, 梁琨, 等. 3 种沙蚕中脂肪酸分析及 5 种不饱和脂肪酸测定[J]. 中成药, 2016, 38(6): 1298-1302.
- [4] 李丽娟, 朱国萍, 曹文红, 等. 双齿围沙蚕酶解产物对免疫抑制小鼠的免疫调节作用[J]. 大连海洋大学学报, 2025, 40(01): 76-85.
- [5] 赵琳. 饲料中添加维生素 E、双齿围沙蚕对刺参性腺发育的影响[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连海洋大学, 2020.
- [6] 陆畅. 饲料-沙蚕组合饲喂对日本囊对虾生长存活影响的研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连海洋大学, 2024.
- [7] 郑统. 黄河三角洲滨海湿地生态系统中重金属的迁移及其对黑嘴鸥繁殖成效的影响[D]: [硕士学位论文]. 曲阜: 曲阜师范大学, 2020.
- [8] Wang, W. (2012) Biodynamic Understanding of Mercury Accumulation in Marine and Freshwater Fish. *Advances in environmental research*, 1, 15-35. <https://doi.org/10.12989/aer.2012.1.1.015>
- [9] Luoma, S.N. and Rainbow, P.S. (2008) Metal Contamination in Aquatic Environments: Science and Lateral Management. Cambridge University Press.
- [10] 任可欣. Cd^{2+} 污染胁迫对多齿围沙蚕(*Perinereis nuntia*)的毒性效应[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2013.

- [11] Gu, Y., Qiu, Y., Wei, X., Li, Z., Hu, Z., Gu, Y., *et al.* (2020) Characterization of Selenium-Containing Polysaccharides Isolated from Selenium-Enriched Tea and Its Bioactivities. *Food Chemistry*, **316**, Article 126371. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126371>
- [12] Yin, Y., Zhang, P., Yue, X., Du, X., Li, W., Yin, Y., *et al.* (2018) Effect of Sub-Chronic Exposure to Lead (pb) and *Bacillus subtilis* on *Carassius auratus gibelio*: Bioaccumulation, Antioxidant Responses and Immune Responses. *Eco-toxicology and Environmental Safety*, **161**, 755-762. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.06.056>
- [13] 余秋然. 凡纳滨对虾硒营养生理研究[D]: [硕士学位论文]. 海口: 海南大学, 2021.
- [14] 王洁, 宋磊, 王欢, 等. 硒代蛋氨酸对青鳉亲本繁育和子代发育的影响[J]. 动物营养学报, 2023, 35(9): 5919-5930.
- [15] Saffari, S., Keyvanshokoo, S., Zakeri, M., Johari, S.A., Pasha-Zanoosi, H. and Mozanadeh, M.T. (2018) Effects of Dietary Organic, Inorganic, and Nanoparticulate Selenium Sources on Growth, Hemato-Immunological, and Serum Biochemical Parameters of Common Carp (*Cyprinus carpio*). *Fish Physiology and Biochemistry*, **44**, 1087-1097. <https://doi.org/10.1007/s10695-018-0496-y>
- [16] 何江波, 石雕, 沙小飞, 等. 不同硒源对蛋鸡血硒代谢规律研究[J]. 畜牧兽医杂志, 2019, 38(1): 1-3.
- [17] 方热军, 杨凯丽. 硒的抗氧化和免疫作用及其代谢调控途径[J]. 饲料工业, 2018, 39(23): 1-7.
- [18] 马恒甲, 徐梦谦, 张丽, 等. 硒在水产饲料中的研究进展[J]. 饲料研究, 2021, 44(3): 131-134.
- [19] 高凤鸣, 张淑华, 汪心源, 等. 用次溴酸钠氧化法测定海水中氨氮的研究[J]. 海洋湖沼通报, 1980(4): 45-51.
- [20] 雷衍之. 养殖水环境化学实验[M]. 北京: 中国农业出版社, 2006: 1-123.
- [21] Janz, D., DeForest, D., Brooks, M., Chapman, P., Gilron, G., Hoff, D., *et al.* (2010) Selenium Toxicity to Aquatic Organisms. In: Chapman, P.M., Adams, W.J., Brooks, M.L., Delos, C.G., Luoma, S.N., Maher, W.A., Ohlendorf, H.M., Presser, T.S. and Shaw, D.P., Eds., *Ecological Assessment of Selenium in the Aquatic Environment*, CRC Press, 141-231.
- [22] 邓岳松, 陈权军. 纳米硒对尼罗罗非鱼生长的影响[J]. 内陆水产, 2003(6): 28-30.
- [23] 施力光, 杨茹洁, 岳文斌, 等. 蛋氨酸硒和纳米硒对波尔山羊种公羔生长及血液、组织硒含量的比较[J]. 家畜生态学报, 2009, 30(1): 68-72.
- [24] 周毅峰. 超聚硒植物壶瓶碎米荠耐受转录组和蛋白组研究[D]: [博士学位论文]. 武汉: 华中农业大学, 2017.
- [25] Carew, M.W. and Leslie, E.M. (2010) Selenium-Dependent and -Independent Transport of Arsenic by the Human Multidrug Resistance Protein 2 (MRP2/ABCC2): Implications for the Mutual Detoxification of Arsenic and Selenium. *Carcinogenesis*, **31**, 1450-1455. <https://doi.org/10.1093/carcin/bgq125>
- [26] 刘冰贤, 曾绮雯, 陈汉明, 等. 纳米硒对氟化钠诱导小鼠肝组织细胞凋亡的影响[J]. 畜牧兽医学报, 2021, 52(5): 1424-1431.
- [27] 韩晓霞, 姚志文, 魏洪义. 硒的毒性生物学研究进展[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(12): 24-28.
- [28] Zhang, J., Zuo, T., Liang, X., Xu, Y., Yang, Y., Fang, T., *et al.* (2019) Fenton-Reaction-Stimulative Nanoparticles Decorated with a Reactive-Oxygen-Species (ROS)-Responsive Molecular Switch for ROS Amplification and Triple Negative Breast Cancer Therapy. *Journal of Materials Chemistry B*, **7**, 7141-7151. <https://doi.org/10.1039/c9tb01702j>
- [29] 左晓磊, 韩爱云. 微量元素硒的营养功能[J]. 今日畜牧兽医, 2005, 34(7): 36-39.
- [30] 李慧, 杨林. Nr2 抗氧化的分子调控机制[J]. 生物信息学, 2018, 16(1): 1-6.
- [31] 曹鼎鼎, 孟田田, 舒绪刚, 等. 硒元素在动物体内的吸收代谢研究进展[J]. 仲恺农业工程学院学报, 2017, 30(4): 66-70.
- [32] Yu, H., Zhang, C., Zhang, X., Wang, C., Li, P., Liu, G., *et al.* (2019) Dietary Nano-Selenium Enhances Antioxidant Capacity and Hypoxia Tolerance of Grass Carp *Ctenopharyngodon idella* Fed with High-Fat Diet. *Aquaculture Nutrition*, **26**, 545-557. <https://doi.org/10.1111/anu.13016>
- [33] 刘杰, 孙婧, 刘亚楠, 等. 可追踪超小型纳米硒的制备及其在阿尔兹海默症中的应用[P]. 中国专利, CN109911868B, 2020-06-11.
- [34] 方雪杨. 功能化纳米硒载药体系的制备及抗肿瘤活性研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 暨南大学, 2017.
- [35] Mechlaoui, M., Dominguez, D., Robaina, L., Geraert, P., Kaushik, S., Saleh, R., *et al.* (2019) Effects of Different Dietary Selenium Sources on Growth Performance, Liver and Muscle Composition, Antioxidant Status, Stress Response and Expression of Related Genes in Gilthead Seabream (*Sparus aurata*). *Aquaculture*, **507**, 251-259. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2019.04.037>
- [36] 王磊, 杜菲, 孙卉, 等. 人体硒代谢与硒营养研究进展[J]. 生物技术进展, 2015, 5(4): 285-290.
- [37] 林文业, 邓卫利, 黄文琦, 等. 食物中硒的生物功能及测定分析研究[J]. 大众科技, 2011, 13(4): 125-128.

- [38] Guo, Q., Ye, J., Zeng, J., Chen, L., Korpelainen, H. and Li, C. (2022) Selenium Species Transforming along Soil-Plant Continuum and Their Beneficial Roles for Horticultural Crops. *Horticulture Research*, **10**, 203-213.
<https://doi.org/10.1093/hr/uhac270>