

镉和汞单独及联合胁迫对毛蚶心率的影响

邢辛冬¹, 梁健¹, 刘惠茹¹, 王晓宇¹, 王冬浩², 李天宝², 高丽³, 郭永军^{1*}, 梁爽^{1*}

¹天津农学院水产学院, 天津

²天津市海升水产养殖有限公司, 天津

³山东省科学院海洋仪器仪表研究所, 山东 青岛

收稿日期: 2024年6月1日; 录用日期: 2024年6月21日; 发布日期: 2024年6月29日

摘要

动物的生存与发展密切依赖于健康的心脏机能, 现有重金属对动物心率影响的研究普遍聚焦于脊椎动物, 对双壳类软体动物心脏受重金属影响的毒性作用研究仍显薄弱。为填补此研究空白, 本研究采用5 mg/L及20 mg/L两种浓度的重金属(Cd²⁺与Hg²⁺), 在48小时的实验周期内, 细致考察了这些金属在单独及联合胁迫下对毛蚶心率的具体影响。研究发现, 这些金属的存在显著影响了毛蚶的心率: 正常情况下毛蚶平均心率为72.0次/分钟, 5 mg/L Cd²⁺与Hg²⁺单独作用时毛蚶心率降至51.5次/分钟与51.2次/分钟; 20 mg/L浓度下, 心率进一步降至33.7次/分钟与31.2次/分钟。当Cd²⁺与Hg²⁺以5 mg/L和20 mg/L浓度联合作用时, 心率分别降至41.3次/分钟与38.2次/分钟。结果表明, 随着重金属浓度的增加, 毛蚶的平均心率显著下降, 特别是在20 mg/L Cd²⁺的胁迫下, 心率降至0。此外, Cd²⁺与Hg²⁺在影响心率方面展现出一定的拮抗作用。本研究结果为揭示重金属对毛蚶心脏的毒性机制提供了重要的科学基础。

关键词

重金属胁迫, 毛蚶, 心脏, 心率

Effects of Single and Combined Stress of Cadmium and Mercury on Heart Rate in *Scapharca subcrenata*

Xindong Xing¹, Jian Liang¹, Huiru Liu¹, Xiaoyu Wang¹, Donghao Wang², Tianbao Li², Li Gao³, Yongjun Guo^{1*}, Shuang Liang^{1*}

¹Fisheries College, Tianjin University of Agriculture, Tianjin

²Tianjin Haisheng Aquaculture Limited Company, Tianjin

³Institute of Oceanographic Instruments and Meters, Shandong Academy of Sciences, Qingdao Shandong

*通讯作者。

文章引用: 邢辛冬, 梁健, 刘惠茹, 王晓宇, 王冬浩, 李天宝, 高丽, 郭永军, 梁爽. 镉和汞单独及联合胁迫对毛蚶心率的影响[J]. 水产研究, 2024, 11(2): 157-165. DOI: 10.12677/ojfr.2024.112019

Abstract

The survival and development of animals are closely dependent on the healthy functioning of the heart. While existing heavy metals on animal heart rate research mainly focus on vertebrates, studies on the toxic effects of heavy metals on the heart of bivalve mollusks remain scarce. To address this research gap, a preliminary study was designed to investigate the specific effects of cadmium (Cd^{2+}) and mercury (Hg^{2+}) at concentrations of 5 mg/L and 20 mg/L over a 48-hour experimental period on the heart rate of *S. subcrenata* under single and combined stress in detail. The study revealed that the presence of these metals affected the *S. subcrenata*'s heart rate: under normal conditions, the average *S. subcrenata* heart rate was 72.0 beats per minute, which decreased to 51.5 and 51.2 beats per minute when exposed to 5 mg/L of Cd^{2+} and Hg^{2+} individually, and further dropped to 33.7 and 31.2 beats per minute at a concentration of 20 mg/L. When Cd^{2+} and Hg^{2+} acted together at concentrations of 5 mg/L and 20 mg/L, the *S. subcrenata* heart rate decreased to 41.3 and 38.2 beats per minute, respectively. The results indicate that with increasing heavy metal concentrations, the average heart rate of scallops significantly decreased, especially dropping to 0 under the stress of 20 mg/L of Cd^{2+} . Additionally, Cd^{2+} and Hg^{2+} exhibited a certain antagonistic affecting heart rate. This study provides an important scientific basis for understanding the toxic mechanisms of heavy metals on the heart of *S. subcrenata*.

Keywords

Heavy Metal Stress, Oyster, Heart, Heart Rate

Copyright © 2024 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

毛蚶(*Scapharca subcrenata*)是一种分布于我国渤海湾海域的重要渔业经济物种,属于软体动物门(Mollusca)、瓣鳃纲(Lamellibranchia)、蚶目(Arcoida)、蚶科(Arcidae)、毛蚶属(*Scapharca*),是营埋栖生活的广温广盐性生物[1]。在天津地区,毛蚶作为食用价值高的海产经济贝类,市场需求量愈来愈高。然而,由于海洋环境污染和破坏等因素的影响,近年毛蚶资源储量急剧减少[2]。

镉(Cd)、汞(Hg)等重金属能够在水体及沉积物中富集,并且能够显著富集在贝类生物体内[3]-[6]。重金属对生物污染的特性包括其易于扩散、难以降解,以及能够通过食物链进行传递;以离子形式存在于水体中的重金属易于通过附着于有机或无机颗粒物的方式进入贝类体内并进行富集[7]。海洋贝类对重金属有显著的富集特性;重金属的富集不仅对贝类生长、繁殖和生理机能产生负面影响,而且对人类的食品安全和海洋生态环境的健康构成了潜在的危害[8] [9] [10]。毛蚶作为双壳贝类,由于其滤食性及活动性较差的特征,表现出较高的重金属富集能力。探究毛蚶与重金属污染之间的相互作用关系,具有重大意义。

与脊椎动物相比,作为无脊椎动物的毛蚶,由于其循环系统的特点,开放性循环和心脏内缺乏内皮细胞,可能更易受到重金属污染的影响[11]-[18]。先前的研究成果已经证实了重金属汞和镉对毛蚶的鳃、

肝胰腺、肾脏等器官产生了显著的生理影响[19] [20] [21]。然而，对于心脏这一循环中枢，相关研究相对匮乏。自 1999 年起，研究人员开始利用红外探测技术监测甲壳类和贝类的心跳[22]。对海洋软体动物(例如帽贝)的心脏性能进行了广泛研究[23] [24] [25]，包括贻贝和蛤[26] [27]，心率可作为反映机体对危险胁迫的呼吸反应的敏感且准确的指标。通过捕获红外信号的方式，可以高效稳定、无损伤地获取贝心率。心率监测作为一种反映蛤仔对重金属胁迫即时生理反应的指标，相较于传统的耗氧率和滤水率等指标，能够在较短时间内揭示出生理变化，因此适宜作为短期生物学实验的评估工具[28]。然而据我们所知，目前对重金属对双壳类动物的心脏毒性知之甚少。因此本研究从心率出发，研究汞和镉两种重金属对毛蚶心率的影响，研究结果可为了解重金属对毛蚶的毒性机制奠定基础。

2. 材料与方法

2.1. 试验毛蚶

本研究选取的毛蚶样本采自天津市滨海新区大神堂海域，所选毛蚶健康、体型较大且规格一致(平均壳长 42 ± 3 mm，平均壳宽 24 ± 3 mm)，外观色泽正常。采集后，擦去毛蚶表面沙土，置于含海水的水槽内，并转运至天津农学院。在实验室条件下，毛蚶进行了为期一周的暂养，期间每日更新海水，保持连续曝气，维持暂养环境温度约 20°C ，盐度为 33，pH 值控制在 8.1 左右。

2.2. 重金属试剂

实验采用分析纯的 CdCl_2 、 HgCl_2 (国药集团，中国)，用双蒸水配成分别含 Cd^{2+} 、 Hg^{2+} 为 200 mg/L 和 4000 mg/L 的母液，实验时稀释成所需要的浓度。

2.3. 实验仪器

信号放大器(AMP03, Newshift, 葡萄牙)采集并放毛蚶心率信号，数据采集硬件(Powerlab, ADInstruments, 美国)进行滤波和记录。最终数据在 LabChart 软件(LabChart 8.0, ADInstruments, America)中可视化为心跳波形，然后使用该软件进行心跳识别和心率计数。

2.4. 实验方法

2.4.1. 重金属胁迫

在 5 升容量的养殖网箱中，注入盐度为 29 的人工配制海水，体积为 4.5 升。将经过 24 小时饥饿预处理的健康且活跃的毛蚶 8 只随机放入箱中，实施静态水体养殖并持续曝气。实验过程中不投饵。据预实验设定实验的重金属浓度，每种重金属配置了两个不同浓度的处理组，每个处理组设有两个重复样本。令设置一个不添加重金属的空白对照组。实验设计包括了镉(Cd^{2+})和汞(Hg^{2+})的单一及联合急性毒性实验，持续时间为 48 小时。如表 1 所示，试验设置了 1 个对照组和 6 个实验组，实验组浓度分别为 5 mg/L Cd^{2+} 、5 mg/L Hg^{2+} 、5 mg/L $\text{Cd}^{2+} + \text{Hg}^{2+}$ 、20 mg/L Cd^{2+} 、20 mg/L Hg^{2+} 、20 mg/L $\text{Cd}^{2+} + \text{Hg}^{2+}$ 。在实验开始前，将配好浓度的重金属倒入海水中，通入氧气，将毛蚶放入，在网箱上方盖上塑料膜。

Table 1. Experimental Setup for Cd^{2+} and Hg^{2+} Stress Treatments

表 1. Cd^{2+} 和 Hg^{2+} 胁迫实验组设置

实验组	浓度	24 h	48 h
1	5 mg/L Cd^{2+}	8 只毛蚶	8 只毛蚶
2	5 mg/L Hg^{2+}	8 只毛蚶	8 只毛蚶
3	5 mg/L $\text{Cd}^{2+} + \text{Hg}^{2+}$	8 只毛蚶	8 只毛蚶

续表

4	20 mg/L Cd ²⁺	8 只毛蚶	8 只毛蚶
5	20 mg/L Hg ²⁺	8 只毛蚶	8 只毛蚶
6	20 mg/L Cd ²⁺ + Hg ²⁺	8 只毛蚶	8 只毛蚶

2.4.2. 心率测定

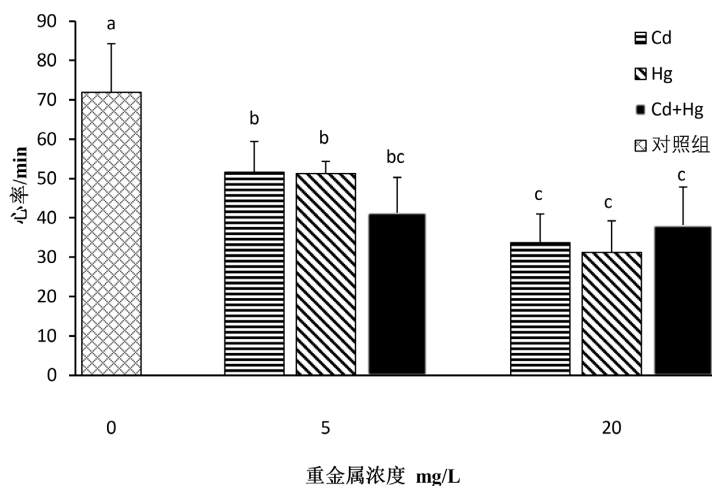
毛蚶的心电信号进行无创测量[29]：实验前清理毛蚶壳表面的附着物，擦去水分。将红外传感器探头固定在每只毛蚶心脏上方的外壳上；利用红外信号放大器(AMP03, Newshift, Leiria, 葡萄牙)和数据采集硬件 Powerlab 8/35 (ADInstruments, 美国)对红外心跳信号的变化进行放大、滤波和记录。同时观察 LabChart 8.0 (ADInstruments, 美国)软件中检测到的心跳波形状态，微调探头位置使心跳波形规律、清晰。待心率稳定后将毛蚶放入已加入重金属的海水养殖箱，观察并记录 48 h 内毛蚶连续的心波、心率计数，每 24 h 查看毛蚶死亡情况并将死亡毛蚶捞出。毛蚶死亡判定标准：双壳持续张开，斧足异常伸出体外且对刺激无反应，外套膜萎缩。心跳信号采集结束后利用 LabChart 8.0 统计数据，采用 SPSS 17.0 软件进行方差分析。

3. 结果与分析

由图 1 可知，随 Cd²⁺胁迫浓度增加，毛蚶心率显著下降，Cd²⁺浓度和毛蚶心率呈负相关关系，当 Cd²⁺浓度分别为 0、5 和 20 mg/L，毛蚶的平均心率分别为：72.0、51.5、33.7 次/分钟。

图 2(A)和图 2(B)为 Cd²⁺胁迫后毛蚶的心率模式图，可以看到，重金属胁迫后的毛蚶心率与对照组相较，呈心率降低的趋势。当 5 mg/L 的 Cd²⁺加入后，毛蚶心率断崖式下跌(图 2(A))。随时间增加心率慢慢回升，但在此过程中，心率出现震荡式上扬，而当 Cd²⁺浓度增加为 20 mg/L，毛蚶心率也出现断崖式下跌，并维持在比低浓度水平心率更低的状态；进一步地，37 小时毛蚶心率升高后降低至零(图 2(B))。

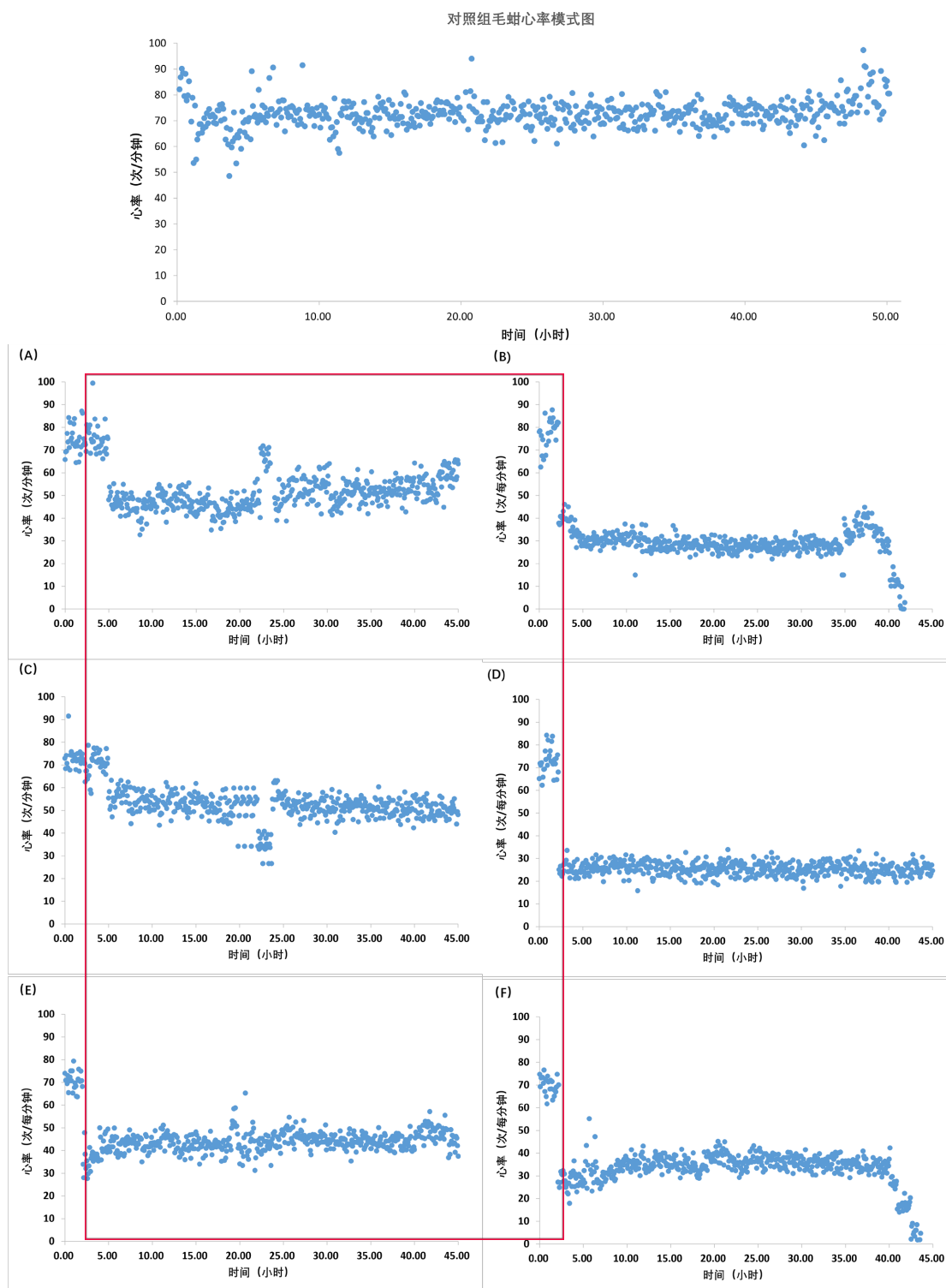
由图 1 可知，随 Hg²⁺胁迫浓度增加，毛蚶心率下降，Hg²⁺浓度和毛蚶心率的关系同 Cd²⁺胁迫毛蚶，呈负相关关系。当 Hg²⁺浓度分别为 0、5 和 20 mg/L，毛蚶的平均心率分别为：72.0、51.2、31.2 次/分钟。



(注：字母不同表现为显著性差异)

Figure 1. The heart rate changes of *Scapharca subcrenata* under different concentrations of Cd²⁺ stress, Hg²⁺ stress, Cd²⁺ and Hg²⁺ combined stress.

图 1. 不同浓度 Cd²⁺胁迫、Hg²⁺胁迫、Cd²⁺和 Hg²⁺联合胁迫下毛蚶心率变化



A、B：分别为5 mg/L Cd^{2+} 和20 mg/L Cd^{2+} 胁迫下毛蚶心率变化模式图；C、D：分别为5 mg/L Hg^{2+} 和20 mg/L Hg^{2+} 胁迫下毛蚶心率变化模式图；E、F：分别为5 mg/L Cd^{2+} Hg^{2+} 联合和20 mg/L Cd^{2+} Hg^{2+} 胁迫下毛蚶心率变化模式图。注：红线为重金属添加时

Figure 2. Heart rate pattern of *Scapharca subcrenata* under heavy metal stress
图 2. 重金属胁迫状态下毛蚶心率模式图

图 2(C)和图 2(D)为 Hg^{2+} 胁迫后毛蚶的心率模式图, 当 5 mg/L 的 Hg^{2+} 胁迫后, 毛蚶心率断崖式下跌(图 2(C))而当 Hg^{2+} 浓度增加至 20 mg/L, 毛蚶心率也出现断崖式下跌, 并维持在比低浓度水平心率更低的状态; 但在 48 小时内, 毛蚶心率不再变化(图 2(D))。

由图 1, 当 Hg 和 Cd 联合胁迫毛蚶时, 毛蚶心率在联合胁迫低浓度下与对照组相比, 断崖式下跌, 但浓度增加为 20 mg/L 时, 毛蚶心率并未随联合胁迫浓度增加而显著变化。 Cd^{2+} 和 Hg^{2+} 浓度和毛蚶心率呈负相关关系, 当联合重金属浓度分别为 0、5 和 20 mg/L, 毛蚶的平均心率分别为: 72.0、41.3、38.2 次/分钟。

图 2(E)和图 2(F)为 Cd^{2+} 和 Hg^{2+} 联合胁迫后毛蚶的心率模式图, 当 5 mg/L 的 Cd^{2+} 和 Hg^{2+} 联合胁迫后, 毛蚶心率断崖式下跌(图 2(E))。随时间增加心率保持稳定。而当浓度增加至 20 mg/L, 毛蚶心率比低浓度水平更低的状态; 进一步地, 毛蚶心率在 40 小时开始逐渐下降, 直至为零(图 2(F))。

并且总的来说, 低浓度胁迫下心率更加震荡, 高浓度胁迫下心率整体水平要比低浓度低, 高浓度 Cd^{2+} 的添加会使毛蚶心率在 48 h 内降低为 0。在浓度为 5 mg/L 时, 单一重金属胁迫比联合重金属胁迫平均心率高, 当浓度增加为 20 mg/L 时, 当 Cd 和 Hg 联合胁迫时, 毛蚶平均心率高于 Cd 和 Hg 单一胁迫时。

4. 讨论

滤食性双壳贝类由于其滤食性及活动性较差的生理特点, 生存易受到海洋金属污染的影响[13]。本研究旨在通过系统分析 Cd^{2+} 和 Hg^{2+} 对毛蚶心脏的单一及联合胁迫, 进而深入探讨其毒性效应。研究发现, 重金属通过影响心肌动力和破坏心脏组织结构, 使心率降低。心率与暴露浓度之间的负相关性表明, 随着暴露浓度的增加, 心率呈现下降趋势。无论是 Cd 还是 Hg, 其胁迫都会导致毛蚶心率显著降低, 且胁迫效应随浓度增加而加剧。特别是在高浓度胁迫下, 镉的影响更为明显, 可在 48 小时内导致心率降至零, 而汞的影响相对较弱。而单一比联合胁迫在 20 mg/L 的浓度下的心率低, 且联合胁迫中镉和汞浓度的增加并未使毛蚶心率显著降低, 镉和汞在高浓度下对毛蚶心率的影响呈拮抗关系。

当前在双壳贝类中, 针对贝对重金属的胁迫响应研究主要集中在肝胰腺、鳃和肌肉等传统目标组织, 而对毛蚶心脏的关注还非常有限[19] [20] [21]。事实上, 作为为血液提供动力的中枢器官心脏, 研究毛蚶在受到重金属压力时, 其心率变化和心脏在响应重金属离子转运过程中的作用很有必要。我们观察到暴露于汞和镉重金属后, 毛蚶会闭合其壳阀。从一开始, 在暴露于铜的贻贝中也观察到这种行为[30]。在汞和镉浓度高的情况下, 这一反应可能是为了补偿长时间关闭阀门造成的缺氧, 同时尽量减少与重金属的直接接触。在低浓度下, 快速开启和关闭壳阀可以减少中间属的影响, 而不会产生完全隔离的代谢缺点。但是在低浓度重金属胁迫下的毛蚶仍然表现出心动过缓和心律不规律。排除了瓣膜关闭的可能性, 很有可能是汞和镉影响了心脏的神经控制系统。

而 Hg^{2+} 对两种淡水鱼的会严重损害心肌细胞的细胞内钙动力学、心肌收缩力和心脏的电传导, 所有这些都可能与心输出量减少和推定心力衰竭有关[13], 这些作用也可能是金属对鱼心脏施加影响的方式, 在肌细胞的几个部位起作用。据 Vornanen 等人的研究, 鱼类心肌细胞 E-C 偶联是一个非常可变和灵活的过程, 使鱼类具有适当的的心脏范围, 以利用各种环境。同样的, 毛蚶心脏的效率严重依赖于心肌收缩力, 而心肌收缩力又依赖于细胞内 Ca^{2+} 稳态[31]。心率高意味着血液循环量比较大, 新陈代谢比较旺盛[32]。重金属暴露后, 心脏由于汞诱导的心肌收缩功能障碍, 这可能汞胁迫下心率随着剂量的增加会明显降低的原因。有研究表明而 Hg^{2+} 对两种淡水鱼造成的心肌细胞损伤, 影响了细胞内钙动力学、心肌收缩力及心脏电传导, 这可能与心输出量减少和心力衰竭相关[33]。

作为贝类循环系统的核心组成部分, 心脏是镉离子(Cd^{2+})毒性作用的主要靶点之一[34]。本项研究观

察到,在高浓度镉暴露条件下,毛蚶的心率与暴露时间呈现出显著的“时间-效应”关联。这一现象可能源于贝类已演化出一套成熟的解毒机制。该机制不仅包括通过闭合壳体、降低滤水及呼吸频率以减少镉的吸收,还涉及诱导金属硫蛋白(Metallothionein, MT)的生成,以实现与 Cd^{2+} 的结合和解毒[35]。例如, Li 等的研究发现,在 Cd^{2+} 暴露下,背角无齿蚌的鳃和外套膜中 MT 的表达显著上升,且 MT 含量与镉的累积量之间存在正线性关系,这有助于短期内减轻 Cd^{2+} 对心率的影响[36]。所以毛蚶收到重金属镉的胁迫后和受到重金属汞相比,心率失常的并没有更加明显。但是当镉超过一定浓度时,心脏负担过重,和心脏停止跳动有直接关系。无机汞通过抑制关键的 ATP 酶,包括 Na^+/K^+ ATPase、SERCA 和肌球蛋白 ATP 酶,干扰哺乳动物心脏的兴奋-收缩耦联(E-C coupling),从而引起心脏损伤[37] [38]。毛蚶心脏的功能主要依赖于心肌的收缩力,而这一过程受细胞内 Ca^{2+} 浓度的精确调控。在生理平衡状态下,细胞内外 Ca^{2+} 浓度的梯度差由一系列转运机制维持,以保持细胞内低钙环境。重金属暴露引发的细胞内 Ca^{2+} 超载,可导致活性氧(ROS)的过量产生,进而触发膜脂质过氧化,损害细胞膜和线粒体的结构与功能。此外, Ca^{2+} 超载还能激活包括内源性核酸酶在内的多种酶类,促进核 DNA 降解,引发细胞凋亡,最终导致组织损伤和功能障碍[39] [40]。因此,重金属对毛蚶心脏功能的影响研究,对于评估其在环境压力下的适应性至关重要。

有文献报道,在镉所致动物心脏损伤方面,心率的改变也是一个重要的指标,心率的改变反映了心肌收缩力、收缩速率和舒张速率的改变[41]。毛蚶的重金属胁迫心率变化模式尚未被研究过。因此,有必要建立重金属应激下毛蚶的心脏性能,以帮助我们了解毛蚶重金属胁迫下应激的心脏反应。从本研究的结果中不难看出重金属在一定浓度下会对心率造成影响。

总体而言,对毛蚶心脏功能的深入研究将有助于系统性地揭示重金属对贝类生物的毒性效应,并进一步阐明其潜在的生理机制。通过这种研究,可以更全面地理解贝类在重金属胁迫下的生理响应,从而为相关领域的科学研究和实际应用提供理论基础和实践指导。

5. 结论

研究发现,重金属镉和汞的胁迫使毛蚶心率显著降低。心率与暴露浓度之间呈负相关关系。无论是 Cd 还是 Hg,其胁迫都会导致毛蚶心率显著降低,且胁迫效应随浓度增加而加剧。特别是在高浓度胁迫下,镉的影响更为明显,可在 48 小时内导致心率降至零,而汞的影响相对较弱。而单一比联合胁迫在 20 mg/L 的浓度下的心率低,且联合胁迫中镉和汞浓度的增加并未使毛蚶心率显著降低,镉和汞在高浓度下对毛蚶心率的影响呈拮抗关系。

致 谢

感谢我的导师梁爽老师的指导,感谢我的家人的陪伴,感谢我的朋友们的倾听,感谢我的母校培养。

基金项目

国家自然科学基金(项目编号: 31902369、31972814和42076121)、现代农业产业技术体系专项资金资助(项目编号: CARS-49)、天津市高校基本科研业务费(项目编号: 2019KJ041、2021KJ109和2022KJ020)、天津市渔业发展支持政策项目(项目编号: 12000023P82963110017B)、福建省海洋生物增养殖与高值化利用重点实验室开放课题(项目编号: 2021FJSCQ07)、天津市科技计划项目(项目编号: 23ZYCGSN00040和23YDTPJC00560)。

参考文献

- [1] 陈辰. 毛蚶群体遗传学研究[D]: [博士学位论文]. 青岛: 中国海洋大学, 2016.

- [2] 王庆志, 张明, 滕炜鸣, 等. 毛蚶养殖生物学研究进展[J]. 大连海洋大学学报, 2015, 30(4): 437-443.
- [3] Sun, C., Wei, Q., Ma, L., Li, L., Wu, G. and Pan, L. (2017) Trace Metal Pollution and Carbon and Nitrogen Isotope Tracing through the Yongdingxin River Estuary in Bohai Bay, Northern China. *Marine Pollution Bulletin*, **115**, 451-458. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.10.066>
- [4] Wu, G., Shang, J., Pan, L. and Wang, Z. (2014) Heavy Metals in Surface Sediments from Nine Estuaries along the Coast of Bohai Bay, Northern China. *Marine Pollution Bulletin*, **82**, 194-200. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.02.033>
- [5] 慕建东. 渤海重要渔业水域生态环境质量状况评价[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 中国海洋大学, 2009.
- [6] 张明强. 渤海湾海河大沽口表层沉积物及其近海海洋生物体内重金属的研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津师范大学, 2012.
- [7] 龚倩. 海水滩涂贝类中重金属镉的检测及富集规律的研究[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.
- [8] Boening, D.W. (1999) An Evaluation of Bivalves as Biomonitors of Heavy Metals Pollution in Marine Waters. *Environmental Monitoring and Assessment*, **55**, 459-470. <https://doi.org/10.1023/a:1005995217901>
- [9] 马建新, 张宜奎, 宋秀凯, 等. 重金属胁迫对海洋贝类毒性研究进展[J]. 海洋湖沼通报, 2011(2): 35-42.
- [10] 江璐. 我国海洋船舶污染现状及防治措施[J]. 化工管理, 2013(2): 46-47.
- [11] Nicholson, S. and Lam, P.K.S. (2005) Pollution Monitoring in Southeast Asia Using Biomarkers in the Mytilid Mussel *Perna viridis* (Mytilidae: Bivalvia). *Environment International*, **31**, 121-132. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2004.05.007>
- [12] Xing, Q., Zhang, L., Li, Y., Zhu, X., Li, Y., Guo, H., et al. (2019) Development of Novel Cardiac Indices and Assessment of Factors Affecting Cardiac Activity in a Bivalve Mollusc *Chlamys farreri*. *Frontiers in Physiology*, **10**, Article No. 293. <https://doi.org/10.3389/fphys.2019.00293>
- [13] Beyer, J., Green, N.W., Brooks, S., Allan, I.J., Ruus, A., Gomes, T., et al. (2017) Blue Mussels (*Mytilus edulis* spp.) as Sentinel Organisms in Coastal Pollution Monitoring: A Review. *Marine Environmental Research*, **130**, 338-365. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2017.07.024>
- [14] Zhao, X., Wang, S., Li, X., Liu, H. and Xu, S. (2021) Cadmium Exposure Induces TNF- α -Mediated Necroptosis via FPR2/TGF- β /NF- κ B Pathway in Swine Myocardium. *Toxicology*, **453**, Article ID: 152733. <https://doi.org/10.1016/j.tox.2021.152733>
- [15] Limaye, D.A. and Shaikh, Z.A. (1999) Cytotoxicity of Cadmium and Characteristics of Its Transport in Cardiomyocytes. *Toxicology and Applied Pharmacology*, **154**, 59-66. <https://doi.org/10.1006/taap.1998.8575>
- [16] Lei, W., Wang, L., Liu, D., Xu, T. and Luo, J. (2011) Histopathological and Biochemical Alterations of the Heart Induced by Acute Cadmium Exposure in the Freshwater Crab *Sinopotamon yangtsekiense*. *Chemosphere*, **84**, 689-694. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.03.023>
- [17] Ferramola, M.L., Antón, R.I., Anzulovich, A.C. and Giménez, M.S. (2011) Myocardial Oxidative Stress Following Sub-Chronic and Chronic Oral Cadmium Exposure in Rats. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, **32**, 17-26. <https://doi.org/10.1016/j.etap.2011.03.002>
- [18] Li, X., Zheng, Y., Zhang, G., Wang, R., Jiang, J. and Zhao, H. (2021) Cadmium Induced Cardiac Toxicology in Developing Japanese Quail (*Coturnix japonica*): Histopathological Damages, Oxidative Stress and Myocardial Muscle Fiber Formation Disorder. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology*, **250**, Article ID: 109168. <https://doi.org/10.1016/j.cbpc.2021.109168>
- [19] 王晓宇, 王清, 杨红生. 镉和汞两种重金属离子对四角蛤蜊的急性毒性[J]. 海洋科学, 2009(12): 24-29.
- [20] 魏爱泓, 矫新明, 毛成贵, 等. 重金属汞对海洋底栖动物毛蚶和紫贻贝毒性效应研究[J]. 生态毒理学报, 2018, 13(6): 352-359.
- [21] 赵艳芳, 吴继法, 翟毓秀, 等. 镉胁迫对不同镉富集能力海水养殖贝类抗氧化能力的影响——以扇贝和菲律宾蛤仔为例[J]. 生态毒理学报, 2014, 9(2): 224-232.
- [22] Handy, R.D. and Depledge, M.H. (1999) Physiological Responses: Their Measurement and Use as Environmental Biomarkers in Ecotoxicology. *Ecotoxicology*, **8**, 329-349. <https://doi.org/10.1023/a:1008930404461>
- [23] De Pirro, M., Santini, G. and Chelazzi, G. (1999) Cardiac Responses to Salinity Variations in Two Differently Zoned Mediterranean Limpets. *Journal of Comparative Physiology B: Biochemical, Systemic, and Environmental Physiology*, **169**, 501-506. <https://doi.org/10.1007/s003600050248>
- [24] Santini, G., Williams, G.A. and Chelazzi, G. (2000) Assessment of Factors Affecting Heart Rate of the Limpet *Patella vulgata* on the Natural Shore. *Marine Biology*, **137**, 291-296. <https://doi.org/10.1007/s002270000339>
- [25] Dong, Y. and Williams, G.A. (2011) Variations in Cardiac Performance and Heat Shock Protein Expression to Thermal Stress in Two Differently Zoned Limpets on a Tropical Rocky Shore. *Marine Biology*, **158**, 1223-1231.

- <https://doi.org/10.1007/s00227-011-1642-6>
- [26] Widdows, J. (1973) Effect of Temperature and Food on the Heart Beat, Ventilation Rate and Oxygen Uptake of *Mytilus edulis*. *Marine Biology*, **20**, 269-276. <https://doi.org/10.1007/bf00354270>
- [27] Bakhmet, I.N., Komendantov, A.J. and Smurov, A.O. (2011) Effect of Salinity Change on Cardiac Activity in *Hiatella arctica* and *Modiolus modiolus*, in the White Sea. *Polar Biology*, **35**, 143-148. <https://doi.org/10.1007/s00300-011-1033-y>
- [28] 张雯雯. 菲律宾蛤仔对急性海水酸化和重金属(Cu 和 Cd)胁迫的生理响应[J]. 渔业科学进展, 2021, 42(5): 97-104.
- [29] Chen, N., Luo, X., Gu, Y., Han, G., Dong, Y., You, W., *et al.* (2016) Assessment of the Thermal Tolerance of Abalone Based on Cardiac Performance in *Haliotis discus hannai*, *H. gigantea* and Their Interspecific Hybrid. *Aquaculture*, **465**, 258-264. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2016.09.004>
- [30] Curtis, T.M., Williamson, R. and Depledge, M.H. (2000) Simultaneous, Long-Term Monitoring of Valve and Cardiac Activity in the Blue Mussel *Mytilus edulis* Exposed to Copper. *Marine Biology*, **136**, 837-846. <https://doi.org/10.1007/s002270000297>
- [31] Duan, J., Yu, Y., Li, Y., Li, Y., Liu, H., Jing, L., *et al.* (2015) Low-Dose Exposure of Silica Nanoparticles Induces Cardiac Dysfunction via Neutrophil-Mediated Inflammation and Cardiac Contraction in Zebrafish Embryos. *Nanotoxicology*, **10**, 575-585. <https://doi.org/10.3109/17435390.2015.1102981>
- [32] Depledge, M.H. and Andersen, B.B. (1990) A Computer-Aided Physiological Monitoring System for Continuous, Long-Term Recording of Cardiac Activity in Selected Invertebrates. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Physiology*, **96**, 473-477. [https://doi.org/10.1016/0300-9629\(90\)90664-e](https://doi.org/10.1016/0300-9629(90)90664-e)
- [33] Monteiro, D.A., Taylor, E.W., Rantin, F.T. and Kalinin, A.L. (2017) Impact of Waterborne and Trophic Mercury Exposures on Cardiac Function of Two Ecologically Distinct Neotropical Freshwater Fish *Brycon amazonicus* and *Hoplias malabaricus*. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology*, **201**, 26-34. <https://doi.org/10.1016/j.cbpc.2017.09.004>
- [34] Bakhmet, I.N., Kantserova, N.P., Lysenko, L.A. and Nemova, N.N. (2012) Effect of Copper and Cadmium Ions on Heart Function and Calpain Activity in Blue Mussel *Mytilus edulis*. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, **47**, 1528-1535. <https://doi.org/10.1080/10934529.2012.680393>
- [35] Suter, G. (2007) Freshwater Bivalve Ecotoxicology. *Integrated Environmental Assessment and Management*, **3**, 568-569. <https://doi.org/10.1002/ieam.5630030418>
- [36] Li, Y., Yang, H., Liu, N., Luo, J., Wang, Q. and Wang, L. (2015) Cadmium Accumulation and Metallothionein Biosynthesis in Cadmium-Treated Freshwater Mussel *Anodonta woodiana*. *PLOS ONE*, **10**, e0117037. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0117037>
- [37] Moreira, C. (2003) Effects of Mercury on Myosin Atpase in the Ventricular Myocardium of the Rat. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology*, **135**, 269-275. [https://doi.org/10.1016/s1532-0456\(03\)00110-8](https://doi.org/10.1016/s1532-0456(03)00110-8)
- [38] Vornanen, M., Shiels, H.A. and Farrell, A.P. (2002) Plasticity of Excitation-Contraction Coupling in Fish Cardiac Myocytes. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*, **132**, 827-846. [https://doi.org/10.1016/s1095-6433\(02\)00051-x](https://doi.org/10.1016/s1095-6433(02)00051-x)
- [39] Nusier, M., Shah, A. and Dhalla, N. (2021) Structure-Function Relationships and Modifications of Cardiac Sarcoplasmic Reticulum Ca²⁺-Transport. *Physiological Research*, **70**, S443-S470. <https://doi.org/10.33549/physiolres.934805>
- [40] Arbi, S., Bester, M.J., Pretorius, L. and Oberholzer, H.M. (2021) Adverse Cardiovascular Effects of Exposure to Cadmium and Mercury Alone and in Combination on the Cardiac Tissue and Aorta of Sprague-Dawley Rats. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, **56**, 609-624. <https://doi.org/10.1080/10934529.2021.1899534>
- [41] 王来, 姚素梅, 王强. 镉的心脏毒性[J]. 环境与职业医学, 2006(5): 436-439.