

DOI: 10.19663/j.issn2095-9869.20190923001

http://www.yykxjz.cn/

陈修报, 王安琪, 郑浩然, 刘洪波, 杨健. 背角无齿蚌幼蚌心率对镉暴露胁迫的响应及预警评估. 渔业科学进展, 2021, 42(1): 186–192

Chen XB, Wang AQ, Zheng HR, Liu HB, Yang J. Response of heart rates to cadmium-exposed stress and early warning capacity in *Anodonta woodiana* juveniles. Progress in Fishery Sciences, 2021, 42(1): 186–192

背角无齿蚌幼蚌心率对镉暴露胁迫的 响应及预警评估*

陈修报¹ 王安琪² 郑浩然² 刘洪波¹ 杨 健^{1,2①}

(1. 中国水产科学研究院淡水渔业研究中心 中国水产科学研究院长江中下游渔业生态环境评价和资源养护重点实验室 无锡 214081; 2. 南京农业大学无锡渔业学院 无锡 214081)

摘要 为探究“淡水贝类观察”研究体系专用指示生物“标准化”背角无齿蚌(*Anodonta woodiana*)幼蚌的心率对镉(Cd)暴露胁迫的响应及预警评估,在“非致死/非损伤”条件下,研究从心跳清晰可见至贝壳不再透明的典型生长阶段的早期幼蚌: EJ1 [25 日龄,壳长为(1.5±0.1) mm]、EJ2 [55 日龄,壳长为(10.5±0.6) mm]、EJ3 [70 日龄,壳长为(20.4±0.9) mm]和 EJ4 [85 日龄,壳长为(30.0±2.0) mm]的心率规律,进而探索 EJ4 心率对不同浓度 Cd²⁺ (0.0025、0.005、0.025、0.1 和 0.5 mg/L)的毒性响应特征。结果显示,早期幼蚌心率总体无显著日变化($P>0.05$);心率与日龄和壳长之间均呈显著的线性负相关($P<0.05$);心率和暴露时间仅在 0.0025 和 0.5 mg/L 的 Cd²⁺暴露组之间呈显著线性负相关($P<0.05$);所有暴露组的心率和暴露浓度之间均呈显著线性负相关($P<0.05$)。本研究表明,利用“标准化”背角无齿蚌幼蚌的心率对 Cd²⁺浓度的响应特征,有潜力开发出基于心率为指示的新型水质 Cd²⁺污染预警监测系统。

关键词 “标准化”背角无齿蚌;早期幼蚌;镉;心率;毒性响应;污染预警

中图分类号 X171.5 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2021)01-0186-07

重金属镉(Cd)具有来源广、积累性强、难以降解、易于沿食物链发生生物放大作用等特点,被列为对水生生物和人类危害最大的优先控制污染物之一(Campbell, 2006; 刘天红等, 2015)。需要高度关注的是,我国渔业生态环境 Cd 污染形势仍较为严峻(张聪等, 2018),其中,江河等天然重要渔业水域中的 Cd 超标率为 1.5%,国家级内陆水产种质资源保护区的

Cd 超标率达 2.7% (农业部等, 2015),而水产品中的 Cd 残留现象大量存在,如长三角地区池塘养殖水产品中 Cd 的超标率甚至高达 100% (和庆等, 2017)。因此,亟需对渔业水环境 Cd 污染动态进行早期预警和有效监测。

贝类因具有运动能力差、对污染物的高积累性和低代谢性等特点,被证实为评价水环境污染的理想指

* 中国水产科学研究院基本科研业务费(2019GH10)、国家自然科学基金(31502166)、江苏省自然科学基金(BK20161144)和中国水产科学研究院淡水渔业研究中心基本科研业务费(2019JBFM05)共同资助 [This work was supported by Central Public-Interest Scientific Institution Basal Research Fund of CAFS (2019GH10), National Natural Science Foundation of China (31502166), Natural Science Funds of Jiangsu Province (BK20161144), and Central Public-Interest Scientific Institution Basal Research Fund, Freshwater Fisheries Research Center, CAFS (2019JBFM05)]. 陈修报, E-mail: chenxb@ffrc.cn

① 通讯作者: 杨 健, 研究员, E-mail: jiany@ffrc.cn

收稿日期: 2019-09-23, 收修改稿日期: 2019-11-11

示生物(崔正国等, 2015; Farrington *et al.*, 2016)。背角无齿蚌(*Anodonta woodiana*)作为“淡水贝类观察”研究体系的专用指示生物(Yang *et al.*, 2008), 已成功预警和监测 Cd 等污染状况(Liu *et al.*, 2010; Chen *et al.*, 2019)。利用贝类对水环境 Cd 污染的预警监测, 可分为“致死性”(如分离出整个软组织, 并测定其中 Cd 含量)和“非致死性”(如分析心率等生理指示的响应特征) 2 类方法(Liu *et al.*, 2016; 孙珊等, 2017), 而后者越来越受到重视(Liu *et al.*, 2016; Bakhmet *et al.*, 2019)。值得注意的是, 前人基于贝类心率对 Cd 污染监测多集中于应用成体(贝壳不透明), 需要在贝壳上靠近心脏部位钻一个洞(开一个“窗口”)才能观察到心脏跳动(Cândido *et al.*, 2006; Liu *et al.*, 2016), 这会对贝类产生应激影响并导致污染物从“窗口”渗透进入软组织, 进而影响到贝类真实的心跳规律。本研究发现, 背角无齿蚌早期幼蚌对 Cd 的胁迫非常敏感(陈修报等, 2017), 且贝壳为透明或半透明状态, 能够在非致死或非损伤条件下清晰观察到心率(Chen *et al.*, 2015)。

本研究尝试利用自主开发的相关研究专用“标准化”背角无齿蚌(陈修报等, 2017)的早期幼蚌(即从心跳清晰可见直至贝壳不再透明发育期的个体)为模式生物, 研究其正常的心率规律, 并探索其对水环境 Cd 毒性的应答特征, 以期从新角度开发基于淡水贝类的早期生物预警和监测技术提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 早期幼蚌采集与心率检测

在“标准化”背角无齿蚌的人工繁育过程中(Chen *et al.*, 2015), 连续采集从心跳清晰可见直至贝壳不再透明的典型生长阶段的早期幼蚌(图 1): EJ1 [25 日龄, 壳长为(1.5±0.1) mm, 平均值±标准差, 下同, $n=30$]、EJ2 [55 日龄, 壳长为(10.5±0.6) mm, $n=30$]、EJ3 [70 日龄, 壳长为(20.4±0.9) mm, $n=30$]和 EJ4 [85 日龄,

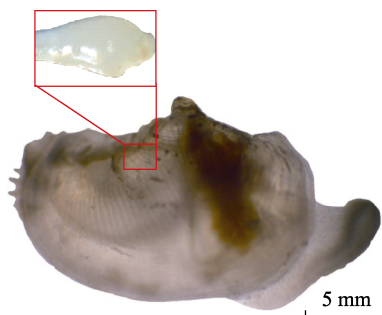


图 1 “标准化”背角无齿蚌的早期幼蚌(□示心脏)
Fig.1 The early juvenile of “standardized” *A. woodiana*
(the square shows the heart)

壳长为(30.0±2.0) mm, $n=30$]。人工繁育方法及水体理化指标参见 Chen 等(2015)。

鉴于背角无齿蚌的活动强度存在一定的昼夜节律变化(早晨最低, 傍晚最大)(吴庆龙等, 2005), 为了确认早期幼蚌的心率是否具有日间分时变化差异, 分别在 09:00~10:00 和 16:00~17:00 采集同一批次的早期幼蚌($n=30$), 依据 Pandolfo 等(2009)对淡水贝类幼蚌心率的观察方法, 用解剖镜直接观察不同生长阶段早期幼蚌的心率。根据 Liu 等(2016)的统计方法, 心率定义为 1 min 观察到的心跳次数。

1.2 Cd 暴露实验

根据淡水贝类毒理学实验规范(ASTM, 2006; 陈修报等, 2017), 参考我国《渔业水质标准》(GB11607-89)规定的 Cd 限量(0.005 mg/L)和作者前期研究获得的 Cd²⁺对背角无齿蚌幼蚌的安全浓度(0.45 mg/L)(陈修报等, 2017), 用人工配制软水(ASTM, 2006)和 CdCl₂ (分析纯, 国药集团化学试剂有限公司)配制 5 个 Cd²⁺理论浓度梯度: 0 (对照组)、0.0025、0.005、0.025、0.1 和 0.5 mg/L; 实测 Cd²⁺浓度分别为 0、0.0026、0.005、0.026、0.11 和 0.55 mg/L。Cd²⁺实测浓度和理论浓度的偏差均<10%, 本研究采用理论浓度对结果进行分析和讨论。对照组和暴露组各设置 3 个平行。

综合考虑不同生长阶段早期幼蚌在自然水环境中的存活率及监测适宜规格, 本研究选取 EJ4 阶段的早期幼蚌作为暴露对象。用 500 ml 玻璃培养皿作实验容器, 溶液 200 ml, 每个培养皿加入 5 个幼蚌, 每 24 h 全部更换溶液以保持 Cd²⁺浓度稳定, 实验期间不投饵。实验于贝类重金属暴露系统(上海海圣水族设备厂)中进行, 水温保持在(20±1)°C, 16 h 光照: 8 h 黑暗, 光照强度为 1000 lx。实验持续 96 h, 并于 24、48、72 和 96 h 取样, 观察心率。心率的观察和统计方法同 1.1。

1.3 统计分析

所得数据运用 SPSS 22.0 统计软件分析。应用 Paired *t*-test 比较不同生长阶段早期幼蚌的心率差异性, 以及 Cd 暴露期间的早期幼蚌心率差异水平。应用 Pearson 等级相关系数分析心率与壳长、日龄及 Cd 暴露浓度、暴露时间之间的相关性, 并用回归分析变量之间的关系。 $P<0.05$ 表示差异水平或相关性显著。

2 结果

2.1 早期幼蚌的心率

不同生长阶段的“标准化”背角无齿蚌早期幼蚌

的心率见表 1。EJ1、EJ3 和 EJ4 的心率在 09:00~10:00 和 16:00~17:00 之间保持一致($P>0.05$), 只有 EJ2 在前期的心率略高于下午($P<0.05$)。随着日龄的增加或壳长的增长, 早期幼蚌的心率逐渐降低(表 1), 心率(H)与日龄(D)和壳长(L)之间均呈显著线性负相关($P<0.05$; 图 2)。

2.2 Cd 对早期幼蚌心率的影响

如图 3 所示, 暴露期间, 对照组(0)、0.025 和 0.1 mg/L Cd^{2+} 暴露组的“标准化”背角无齿蚌早期幼蚌(EJ4)的心率总体保持一致($P>0.05$); 0.0025 mg/L Cd^{2+} 暴露组的心率在 72 和 96 h 出现显著降低($P<0.05$); 0.005 mg/L Cd^{2+} 暴露组的心率在 72 h 出现显著降低($P<0.05$); 0.5 mg/L Cd^{2+} 暴露组的心率在 96 h 出现显著降低($P<0.05$)。心率(H)和暴露时间(T)仅在 0.0025 和 0.5 mg/L Cd^{2+} 暴露组间呈显著线性负相关($P<0.05$)。

表 1 “标准化”背角无齿蚌早期幼蚌的心率 (次/min; Mean±SD; n=30)

Tab.1 Heart rates of early juveniles of “standardized” *A. woodiana* (beats/min; Mean±SD; n=30)

观察时间 Observing time	EJ1	EJ2	EJ3	EJ4
09:00~10:00	100±15 ^a	89±12 ^{a,A}	49±7 ^b	21±6 ^c
16:00~17:00	96±9 ^a	75±8 ^{b,B}	49±8 ^c	23±3 ^d

注: 同行中标注不同的小写字母表示差异水平显著, 同列中标注不同的大写字母表示差异水平显著。早期幼蚌: EJ1: 25 日龄, 壳长为(1.5±0.1) mm; EJ2: 55 日龄, 壳长为(10.5±0.6) mm; EJ3: 70 日龄, 壳长为(20.4±0.9) mm; EJ4: 85 日龄, 壳长为(30.0±2.0) mm

Note: Data with different lowercase in the same row are significantly different ($P<0.05$). Data with different uppercase in the same column are significantly different ($P<0.05$). Early juveniles: EJ1: 25 d, shell length is (1.5±0.1) mm; EJ2: 55 d, shell length is (10.5±0.6) mm; EJ3: 70 d, shell length is (20.4±0.9) mm; EJ4: 85 d, shell length is (30.0±2.0) mm

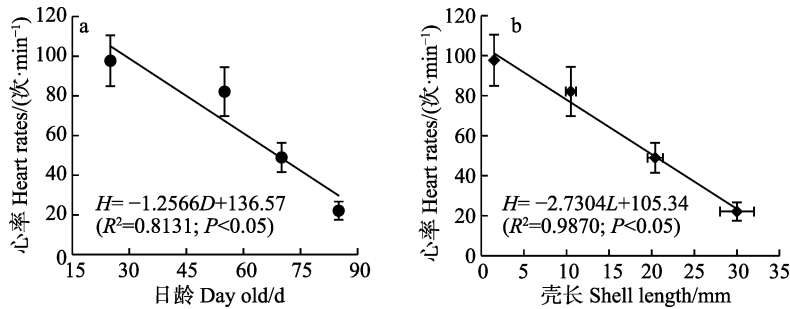


图 2 “标准化”背角无齿蚌早期幼蚌心率与日龄(a)和壳长(b)之间的关系(n=60)
Fig.2 Relationships between heart rates and day old (a) as well as shell length (b) of early juveniles of “standardized” *A. woodiana* (n=60)

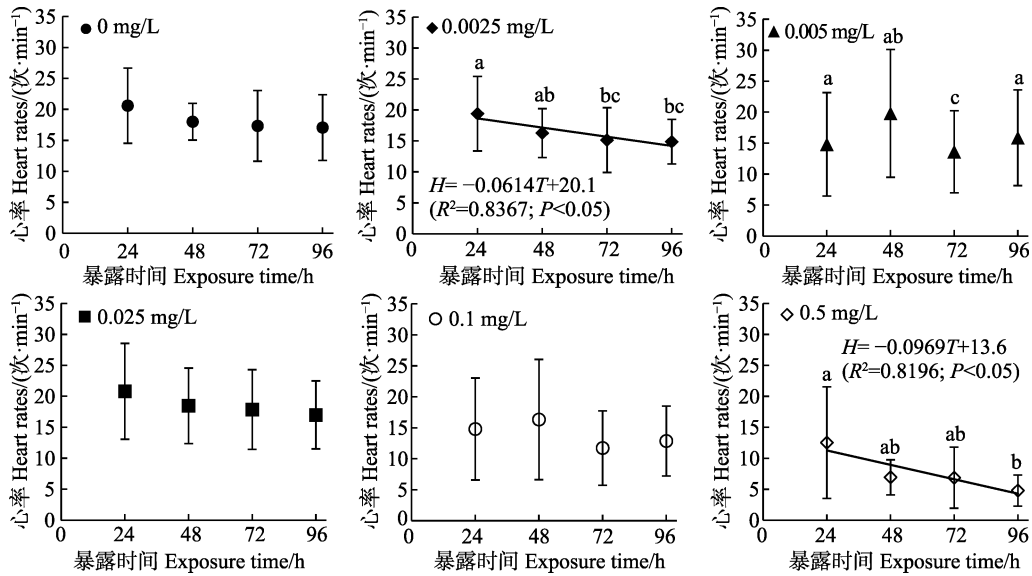


图 3 “标准化”背角无齿蚌早期幼蚌心率(n=15)与 Cd 暴露时间的关系
Fig.3 The relationship between heart rates of early juveniles of “standardized” *A. woodiana* (n=15) and Cd exposure time

不同字母代表差异显著($P<0.05$), 下同。Different letters represent significant difference ($P<0.05$), the same as below

不同暴露时间下, 各组别早期幼蚌(EJ4)的心率变化见图 4。其中, 暴露 24 h 的 0.005、0.1 和 0.5 mg/L Cd^{2+} 暴露组的心率显著低于对照组($P<0.05$); 暴露 48 h 的 0.5 mg/L Cd^{2+} 暴露组的心率显著低于对照组和其他暴露组($P<0.05$); 暴露 72 h 的 0.1 mg/L Cd^{2+} 暴露组的心率显著低于对照组($P<0.05$), 0.5 mg/L Cd^{2+} 暴露组的心率显著低于对照组和其他暴露组($P<0.05$); 暴露 96 h 的 0.5 mg/L Cd^{2+} 暴露组的心率显著低于对照组

和其他暴露组($P<0.05$)。贝类对 Cd^{2+} 暴露的响应较为敏感, 容易引起同一组别中心率变幅较大(Liu *et al.*, 2016)。尽管如此, Paired *t*-test 检验结果显示, 随着 Cd^{2+} 暴露浓度的增加, 6 个组别 EJ4 的心率($n=15$)仍表现为降低趋势(图 4), 且 Pearson 等级相关系数和回归分析显示, 6 个组别 EJ4 的心率(H ; $n=15$)和 Cd^{2+} 暴露浓度(C)之间呈显著的线性负相关($P<0.05$; 图 4)。

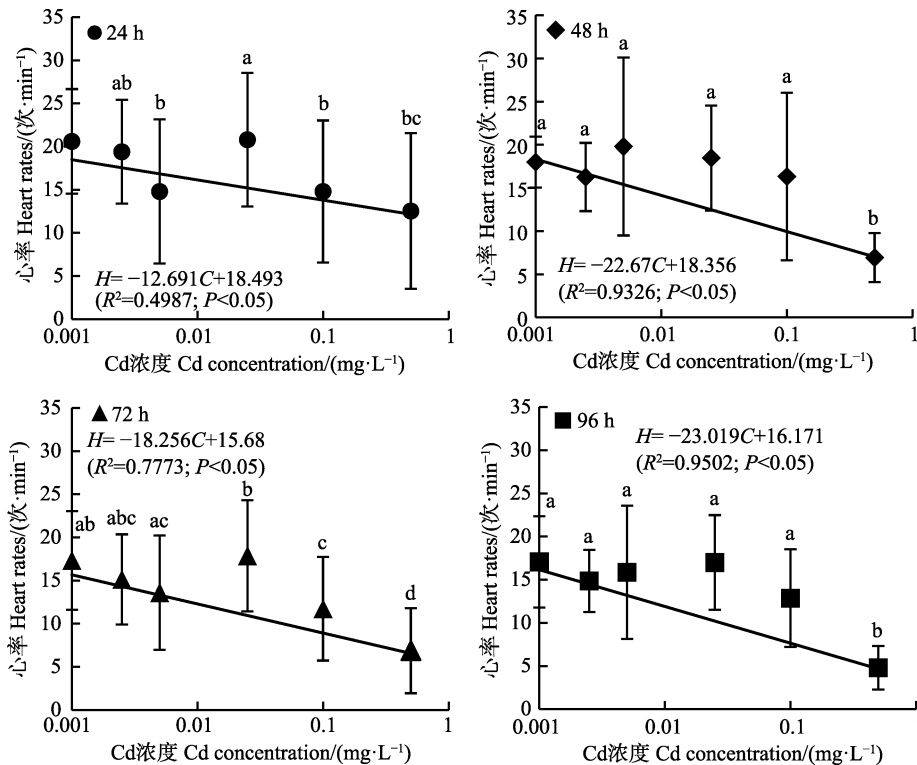


图 4 “标准化”背角无齿蚌早期幼蚌心率($n=15$)与 Cd 浓度之间的关系
Fig.4 The relationship between heart rates of early juveniles of “standardized”
A. woodiana ($n=15$) and Cd concentrations

3 讨论

3.1 早期幼蚌心率规律

贝类心率是反映新陈代谢强度的重要指标(Liu *et al.*, 2016; Bakhmet *et al.*, 2019)。心率变化与生物自身因素(如年龄、规格、昼夜变化)和外界环境因素(如水体理化因子、藻类丰富度)紧密相关(Bakhmet *et al.*, 2005、2019; Liu *et al.*, 2016)。本研究在观察不同生长阶段早期幼蚌的心率规律时, 所采集的样本来源相同、所处的外界环境因素一致, 因此, 心率的差异应归因于生物自身因素不同。

本研究为背角无齿蚌相关心率重金属胁迫应答方面的首次探索。结果发现, 早期幼蚌的心率总体无明显的日变化(表1), 表明其新陈代谢强度总体保持一

致。然而, 早期幼蚌心率与日龄、壳长之间均呈显著的线性负相关(图2), 这与紫贻贝(*Mytilus edulis*)的心率变化趋势相似(Sukhotin *et al.*, 2017)。日龄和壳长小的幼蚌比日龄和规格大的幼蚌的心率快, 这可能与前者的新陈代谢(如生长速率、滤水率)较强有关。Chen 等(2015)研究发现, 30~60日龄(壳长为1.9~9.1 mm)背角无齿蚌的相对生长率是60~90日龄(壳长为9.1~28.7 mm)的1.4倍, 证实日龄和壳长小的幼蚌的代谢强度明显高于日龄和规格大的幼蚌。贝类等水生生物的滤水率与心率总体呈正相关(Grace *et al.*, 1987; 郭鹤飞等, 2018)。背角无齿蚌的滤水率随规格的增大而逐渐降低(彭建华等, 2004), 也支持了本研究的上述观点。随着日龄和规格的增加, 贝类中膜磷脂的不饱和程度降低, 从而降低膜的离子通透性, 促使新陈代谢效率

提高,因而导致心率降低(Sukhotin *et al.*, 2017)。

3.2 早期幼蚌心率对 Cd 毒性的响应及预警评估

贝类通过摄食和滤水作用主动或被动的吸收水环境中的 Cd (Farris *et al.*, 2007; Pernice *et al.*, 2009)。之后,经过易化扩散、主动运输或内吞作用, Cd 在有机体内进一步转运和分配(Farris *et al.*, 2007)。心脏作为贝类循环系统的最重要器官,是 Cd 毒性作用的关键“靶器官”之一(Bakhmet *et al.*, 2012)。

本研究显示,背角无齿蚌早期幼蚌(EJ4)的心率和 Cd²⁺暴露时间之间的“时间-效应”关系总体不明显(图3)。Martinović等(2015)将紫贻贝暴露于4.5 mg/L Cd²⁺(40 μmol/L CdCl₂)水体中,结果显示,经过24、48和72 h后,紫贻贝的心率未产生明显变化,与本研究结果相吻合。这可能是由于较大规格的背角无齿蚌(如EJ4)已形成完善的解毒机制,不仅能够通过紧闭双壳、减少滤水率和呼吸率以减少对 Cd²⁺的吸收(Farris *et al.*, 2007),还能够诱导金属硫蛋白(MT)的合成来络合 Cd²⁺进行解毒(Farris *et al.*, 2007)。例如, Li等(2015)发现, Cd²⁺暴露会引起背角无齿蚌鳃和外套膜中 MT 显著增加,且 MT 含量与 Cd 积累量呈线性正相关,从而在短时间内避免 Cd²⁺对心率的影响。

值得注意的是,早期幼蚌(EJ4)的心率和 Cd²⁺暴露浓度之间具有显著的“剂量-效应”关系(图4)。本研究中,心率和暴露浓度之间呈线性负相关(图4),这与牛蛙(*Rana catesbiana*)心率与水体中 Pb²⁺浓度呈负相关(高波等, 2015),罗纹贻贝(*Geukensia demissa*)心率与水体中多氯联苯(PCB)、多环芳烃(PAH)浓度呈负相关(Galloway *et al.*, 2002),香港巨牡蛎(*Crassostrea hongkongensis*)心率与水体中溶解性重金属(Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn)总浓度呈负相关的趋势(Liu *et al.*, 2016)一致。当 Cd²⁺的积累量超过贝类解毒能力时, Cd²⁺就会通过与蛋白质和钙基因互作并产生氧化损伤,对有机体(如心脏)产生毒性作用(Moulis, 2010),导致心率降低,研究背角无齿蚌早期幼蚌的心跳频率对 Cd²⁺浓度的毒性效应特征,有潜力应用于渔业水环境 Cd 污染的预警及监测。

综上所述,本研究首次探索和阐明了“标准化”背角无齿蚌早期幼蚌的心率规律及其对水环境 Cd²⁺暴露的响应特征。早期幼蚌的心率总体没有明显的日变化,心率与日龄、壳长之间呈显著的线性负相关。早期幼蚌的心率对 Cd²⁺较为敏感,虽然心率和 Cd²⁺暴露之间未表现出明显的“时间-效应”关系,但存在显著的“剂量-效应”关系。根据早期幼蚌心率对 Cd²⁺的响应特征,有潜力应用于渔业水环境 Cd 污染

的预警及监测。由于贝类心率可能会受到水温、pH、水体硬度等因子的影响,在今后的研究中还需要进一步较为系统地探究心率与水质因子之间的关联性。

参 考 文 献

- American Society for Testing and Materials (ASTM). Standard guide for conducting laboratory toxicity tests with freshwater mussels. 2006, E2455-06
- Bakhmet IN, Berger VJ, Khalaman VV. The effect of salinity change on the heart rate of *Mytilus edulis* specimens from different ecological zones. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2005, 318: 121-126
- Bakhmet IN, Kantserova NP, Lysenko LA, *et al.* 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: Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*, 2012, 47(11): 1528-1535
- Bakhmet IN, Sazhin A, Maximovich N, *et al.* In situ long-term monitoring of cardiac activity of two bivalve species from the White Sea, the blue mussel *Mytilus edulis* and horse mussel *Modiolus modiolus*. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 2019, 99(4): 833-840
- Campbell PGC. Cadmium—A priority pollutant. *Environmental Chemistry*, 2006, 3(6): 387-388
- Cândido LTS, Romero SMB. Heart rate and burrowing behavior in the mussel *Anodontites trapesialis* (Bivalvia: Mycetopodidae) from lotic and lentic sites. *Comparative Biochemistry and Physiology, Part A: Molecular and Integrative Physiology*, 2006, 145(1): 131-136
- Chen XB, Liu HB, Su YP, *et al.* Acute toxicity of cadmium and its effects on lipid peroxidation and DNA damage in “standardized” *Anodonta woodiana*. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2017, 36(10): 1960-1967 [陈修报, 刘洪波, 苏彦平, 等. 镉对“标准化”背角无齿蚌的急性毒性及脂质过氧化和 DNA 损伤的影响. *农业环境科学学报*, 2017, 36(10): 1960-1967]
- Chen XB, Liu HB, Su YP, *et al.* Morphological development and growth of the freshwater mussel *Anodonta woodiana* from early juvenile to adult. *Invertebrate Reproduction and Development*, 2015, 59(3): 131-140
- Chen XB, Su YP, Liu HB, *et al.* Active biomonitoring of metals with cultured *Anodonta woodiana*: A case study in the Taihu Lake, China. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2019, 102: 198-203
- Cui ZG, Yuan XZ, Cui Y, *et al.* Study on the accumulation and elimination of Pb and Cd in *Patinopecten yessoensis*. *Progress in Fishery Sciences*, 2015, 36(3): 116-124 [崔正国, 苑旭洲, 崔毅, 等. 虾夷扇贝(*Patinopecten yessoensis*)对铅和镉的生物富集与释放规律. *渔业科学进展*, 2015, 36(3): 116-124]

- Farrington JW, Tripp BW, Tanabe S, *et al.* Edward D. Goldberg's proposal of "the Mussel Watch": Reflections after 40 years. *Marine Pollution Bulletin*, 2016, 110(1): 501–510
- Farris JL, Hassel JHV. Freshwater bivalve ecotoxicology. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 2007, 3(4): 568–569
- Galloway TS, Sanger RC, Smith KL, *et al.* Rapid assessment of marine pollution using multiple biomarkers and chemical immunoassays. *Environmental Science and Technology*, 2002, 36(10): 2219–2226
- Gao B, Li H, Xian SP, *et al.* Effect of heavy metal Pb^{2+} on physiological activity of *Rana catesbiana*. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2015, 28(4): 1834–1839 [高波, 李河, 鲜思萍, 等. 重金属 Pb^{2+} 对牛蛙生理活性的影响. *西南农业学报*, 2015, 28(4): 1834–1839]
- Grace AL, Gainey LF. The effects of copper on the heart rate and filtration rate of *Mytilus edulis*. *Marine Pollution Bulletin*, 1987, 18(2): 87–91
- Guo HF, Zhang XP, Sun C, *et al.* Effect of cadmium on heart rate and feeding behavior in *Daphnia magna*. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2018, 46(4): 568–571 [郭鹤飞, 张雪萍, 孙晨, 等. 镉对大型溞心率和摄食能力的影响. *山西农业科学*, 2018, 46(4): 568–571]
- He Q, Peng ZR, Zhang C, *et al.* Heavy metals content of pond aquaculture products in Yangtze River Delta and the health risk associated with human consumption. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2017, 36(6): 1070–1077 [和庆, 彭自然, 张晨, 等. 长三角地区池塘养殖水产品重金属含量及其健康风险评价. *农业环境科学学报*, 2017, 36(6): 1070–1077]
- Li YQ, Yang HZ, Liu N, *et al.* Cadmium accumulation and metallothionein biosynthesis in cadmium-treated freshwater mussel *Anodonta woodiana*. *PLoS ONE*, 2015, 10(2): e0117037
- Liu HB, Yang J, Gan JL. Trace element accumulation in bivalve mussels *Anodonta woodiana* from Taihu Lake, China. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2010, 59: 593–601
- Liu TH, Yu XQ, Liu GB, *et al.* The safety evaluation of the acute toxicological effects of inorganic-cadmium on *Scapharca broughtonii*. *Progress in Fishery Sciences*, 2015, 36(6): 88–94 [刘天红, 于晓清, 刘广斌, 等. 无机镉对魁蚶 (*Scapharca broughtonii*) 毒性效应及其安全性评价. *渔业科学进展*, 2015, 36(6): 88–94]
- Liu X, Wang WX. Physiological and cellular responses of oysters (*Crassostrea hongkongensis*) in a multimetal-contaminated estuary. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2016, 35(10): 2577–2586
- Martinović R, Kolarević S, Kračun-Kolarević M, *et al.* Genotoxic potential and heart rate disorders in the Mediterranean mussel *Mytilus galloprovincialis* exposed to Superdispersant-25 and dispersed diesel oil. *Marine Environmental Research*, 2015, 108: 83–90
- Ministry of Agriculture, Ministry of Environmental Protection. Report on the state of the fishery eco-environment in China. Beijing, 2015 [农业部, 环境保护部. 2015 年中国渔业生态环境状况公报. 北京, 2015]
- Moulis JM. Cellular mechanisms of cadmium toxicity related to the homeostasis of essential metals. *Biometals*, 2010, 23: 877–896
- Pandolfo TJ, Cope WG, Arellano C. Heart rate as a sublethal indicator of thermal stress in juvenile freshwater mussels. *Comparative Biochemistry and Physiology, Part A: Molecular and Integrative Physiology*, 2009, 154(3): 347–352
- Peng JH, Chen WX, Luan JG, *et al.* The effects of temperature and pH on the filtration rates of two species of freshwater mollusks. *Chinese Journal of Zoology*, 2004, 39(6): 2–6 [彭建华, 陈文祥, 栾建国, 等. 温度、pH 对二种淡水贝类滤水率的影响. *动物学杂志*, 2004, 39(6): 2–6]
- Pernice M, Boucher J, Boucher-Rodoni R, *et al.* Comparative bioaccumulation of trace elements between *Nautilus pompilius* and *Nautilus macromphalus* (Cephalopoda: Nautiloidea) from Vanuatu and New Caledonia. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2009, 72: 365–371
- Sukhotin A, Fokina N, Ruokolainen T, *et al.* Does the membrane pacemaker theory of metabolism explain the size dependence of metabolic rate in marine mussels? *Journal of Experimental Biology*, 2017, 220: 1423–1434
- Sun S, Zhao YT, Wang LM, *et al.* Status of heavy metal pollution in the shellfish culture area of Shangdong Province and the risk analysis of heavy metal elements in the shellfish. *Progress in Fishery Sciences*, 2017, 38(4): 118–125 [孙珊, 赵玉庭, 王立明, 等. 山东省主要贝类养殖区重金属环境状况及贝类安全风险. *渔业科学进展*, 2017, 38(4): 118–125]
- Wu QL, Chen YW, Liu ZW. Filtering capacity of *Anodonta woodiana* and its feeding selectivity on phytoplankton. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(12): 2423–2427 [吴庆龙, 陈宇炜, 刘正文. 背角无齿蚌对浮游藻类的滤食选择性与滤水率研究. *应用生态学报*, 2005, 16(12): 2423–2427]
- Yang J, Harino H, Liu HB, *et al.* Monitoring the organotin contamination in the Taihu Lake of China by bivalve mussel *Anodonta woodiana*. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2008, 81: 164–168
- Zhang C, Song C, Hu GD, *et al.* Hazard and elimination techniques of heavy metals in fishery water of China. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2018, 34(2): 141–145 [张聪, 宋超, 胡庚东, 等. 中国渔业水体重金属的污染现状及消除技术研究进展. *中国农学通报*, 2018, 34(2): 141–145]

Response of Heart Rates to Cadmium-Exposed Stress and Early Warning Capacity in *Anodonta woodiana* Juveniles

CHEN Xiubao¹, WANG Anqi², ZHENG Haoran², LIU Hongbo¹, YANG Jian^{1,2}①

(1. Key Laboratory of Fishery Eco-Environment Assessment and Resource Conservation in Middle and Lower Reaches of the Yangtze River, Freshwater Fisheries Research Center, Chinese Academy of Fishery Sciences, Wuxi 214081;

2. Wuxi Fisheries College, Nanjing Agricultural University, Wuxi 214081)

Abstract This study investigates the response of heart rates to cadmium-related stress and its early warning capacity among juveniles of “standardized” *Anodonta woodiana*, a unique bioindicator used in the “Freshwater Mussel Watch” project. Heart rates of early juvenile mussels at several typical growth stages, from heartbeat-clearly-observed to shells-no-longer-transparent, i.e., EJ1 [25 days old; shell length (1.5±0.1) mm], EJ2 [55 days old; shell length (10.5±0.6) mm], EJ3 [70 days old; shell length (20.4±0.9) mm], and EJ4 [85 days old; shell length (30.0±2.0) mm], were studied under non-lethal/non-injury conditions. The response of heart rates to different concentrations of Cd²⁺ (0.0025, 0.005, 0.025, 0.1, and 0.5 mg/L) in EJ4 were examined. The results show that heart rates of early juveniles generally differed little between ante meridiem and post meridiem ($P>0.05$) states. Heart rates were linearly and negatively correlated with age and shell length ($P<0.05$). Heart rates were linearly and negatively correlated with exposure time in the exposure groups of 0.0025 and 0.5 mg/L Cd²⁺ ($P<0.05$). However, heart rates were linearly and negatively correlated with Cd²⁺ concentrations in all exposure groups ($P<0.05$). These results indicate that a new early warning/monitoring system for Cd²⁺ contamination may be developed using responses characteristic of “standardized” *A. woodiana* to Cd²⁺ concentrations.

Key words “Standardized” *Anodonta woodiana*; Early juveniles; Cadmium; Heart rate; Toxic response; Contamination warning

① Corresponding author: YANG Jian, E-mail: jiany@ffrc.cn