

镉和酸化对水生动物的毒害及生理生态的影响

赵雪健, 陈春宇, 杨志刚*

(上海海洋大学 a. 农业部淡水水产种质资源重点实验室; b. 农业部鱼类营养与环境生态研究中心; c. 水产科学国家级
实验教学示范中心, 中国上海 201306)

摘要: 研究表明酸化和镉单独处理会对水生动物的生长发育产生影响。由于人类活动, 一些沿海和河口中的镉含量不断升高, 严重影响了水生动物的代谢。目前, 关于镉对水生动物的影响已有报道, 与此同时, 水体酸化与水体重金属含量增加可能同步发生。为了更加全面地预测水生动物对水体重金属变化的生理生化应答, 越来越多的学者开始致力于研究酸化和重金属的复合胁迫对水生动物的交互影响。为此, 本文从镉对水生动物的影响以及酸化与镉对水生动物的协同效应等几个方面综述了酸化和镉胁迫对水生动物毒害、生理生态影响的研究进展, 以期今后的水体酸化研究提供参考。

关键词: 镉; 酸化; 毒害; 生理生态; 水生动物

中图分类号: Q958.8

文献标识码: A

文章编号: 1007-7847(2021)04-0347-08

Toxic Effects of Cadmium and Acidification on Aquatic Animals and Their Eco-physiological Responses

ZHAO Xue-jian, CHEN Chun-yu, YANG Zhi-gang*

(a. Key Laboratory of Freshwater Aquatic Genetic Resources, Ministry of Agriculture; b. Centre for Research on Environmental Ecology and Fish Nutrition (CREEFN) of the Ministry of Agriculture; c. National Demonstration Center for Experimental Fisheries Science Education, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: Studies have shown that acidification and cadmium treatment alone will affect the growth and development of aquatic animals. Due to human activities, the content of cadmium in surface water and ground-water is increasing, which seriously affects the metabolism of aquatic animals. At present, the effects of cadmium on aquatic animals have been reported. It is also shown that the acidification of water bodies may occur simultaneously with increasing heavy metal content. To more accurately predict the physiological and biochemical responses of aquatic animals to heavy metal changes, more and more studies on the interaction between acidification and heavy metal stress on aquatic animals have been performed. Herein, the effects of acidification and cadmium stress on aquatic animals and their eco-physiological responses were reviewed, in the hope of providing references for water acidification research in the future.

Key words: cadmium; acidification; toxicity; eco-physiological response; aquatic animal

(*Life Science Research*, 2021, 25(4): 347~354)

重金属污染是全球最严重的环境问题之一。其因毒性、持久性、生物积累和在食物网内的生物放大作用而备受全世界的关注^[1]。重金属在自然

条件下不易分解, 长期输入会造成地表水和地下水的污染^[2-3]。镉(cadmium, Cd)是水环境中分布最广泛的重金属之一^[4-6]。近 50 年来, Cd 带来的生

收稿日期: 2020-07-23; 修回日期: 2020-11-23

基金项目: 国家重点研发项目(2018YFD0900603); 现代农业产业技术体系专项资金资助项目(CARS-48); 上海市科委工程技术中心能力提升项目(19DZ2284300); 黄河三角洲人才工程项目(DYRC20190210)。

作者简介: 赵雪健(1991—), 男, 河南商丘人, 硕士研究生, 主要从事河蟹养殖与生理研究, E-mail: xjzhao123@163.com; 赵雪健和陈春宇对本文的贡献相同, 为本文共同第一作者; *通信作者: 杨志刚(1973—), 男, 新疆石河子人, 博士, 教授, 主要从事环境胁迫或生理胁迫对中华绒螯蟹生存和生理的影响及响应机制研究, E-mail: zgyang@shou.edu.cn。

态、环境和公共卫生问题引起了人们的注意^[7-8]。Cd 通常被用于许多工业部门,如电池、金属电镀、颜料、铸铁和金属饰面,通过土壤径流、人为活动和工业废物排放等途径释放到水环境中^[9-10]。Cd 在水中具有高溶解度和流动性^[11-12],从而加剧了水生生态系统中 Cd 含量的升高。在水生生态系统中, Cd 首先在个体中积累,然后沿着营养金字塔生物富集^[13-15],这种方式威胁着各种水生生物,最终威胁到人类。同时, Cd 能够诱导机体产生高水平的自由基。过量的自由基会攻击质膜中的不饱和脂肪酸,导致膜脂质过氧化,引起细胞氧化损伤,最终导致细胞凋亡^[16]。几项研究表明, Cd 会损害水生生物(包括鱼类和甲壳类)的生长,增加它们的死亡率^[17-18]。Cd 在食物链中有显著的生物积累,在南海西沙群岛的鸟粪样本中达到 $(33.7 \pm 4.5) \text{ mg/g}$ ^[19]。因此, Cd 的不利影响正成为一个复杂的环境问题,对各种水生生物和生态系统造成损害。

至于水体酸化,受工业污染、生活垃圾、化石燃料和汽车尾气等的影响,到 20 世纪 80 年代我国已经成为继欧美之后的第三大酸雨区^[20]。《2011 年中国环境状况公报》显示,在全国 468 个进行酸雨监测的县市中出现酸雨的县市达到 227 个,酸雨进入江河湖库等水体,导致水体环境污染。在工厂集约化养殖过程中,由于养殖品种放养密度过大,水草种植稠密、残饵过多或者养殖期间用药的泛滥等都能造成水体 pH 值降低^[21-22]。

目前,有关 Cd 对水生动物生物学影响的研究主要涉及 Cd 这一单一因素对水生动物性腺发育、受精、存活、生长、代谢、免疫的影响,很少考虑 Cd 与其他关键环境因素的交互作用,比如 pH。本文总结了近年来 Cd 对水生动物繁殖、发育、免疫等方面的影响,并探讨了 pH 作为共存的一个环境因子,与 Cd 共存的复合胁迫对水生动物的影响。

1 重金属镉的污染及其毒性

我们通常把比重大于 5 g/cm^3 的金属统称为重金属,根据功能其又可以分为必需金属和非必需金属两大类^[23]。必需金属是指有机体自身无法合成但又是维持正常生命活动所必需的金属,如铁(Fe)、锌(Zn)、硒(Se)、铜(Cu)、镁(Mg)、锰(Mn)等,必需重金属在有机体内累积超过所需的浓度时也会对机体自身产生毒害作用。相对于必需重金属而言,微量的非必需重金属就能对有机体产生毒害

作用,如 Cd、铅(Pb)、汞(Hg)和铬(Cr)等^[24]。

天然存在的重金属是由火山爆发和岩石风化等一些自然现象产生的。而环境中的重金属污染主要通过电镀、颜料、铸造、化肥与农药等人为途径造成。20 世纪,日本富士县发生了“骨痛病”事件^[25],经研究发现该病是由水中的重金属污染物通过食物链长期在人体内积累引起的,此后,人们开始关注重金属对环境的污染。随着工农业的快速发展,人类过度开发和利用资源,环境中重金属污染的问题越来越严重,给自然环境和人类自己带来了严重的影响。

1.1 镉的性质及污染

Cd 是银白色有光泽的重金属,由德国化学家斯特罗迈尔于 1817 年从不纯的氧化镉中发现。因为新金属存在于镉中,所以后来人们就以含镉的菱锌矿的名称 calamine 命名它为 cadmium,元素符号定为 Cd^[26]。Cd 的原子序数为 48,相对原子质量为 112,在元素周期表中与锌处于同一主族,因此特质与锌很相似。Cd 是作为副产品从锌矿石或硫镉矿中提炼出来的,在稳定化合物中呈+2 价,所以能在生物体中的特定位置取代元素锌和硒,表现出毒性。Cd 是一种特别危险的环境重金属,在水系统和土壤中具有高溶解度和流动性^[11-12],且具有半衰期长、难降解、毒性高、易富集等特点,被美国毒理委员会列为致癌物,仅次于黄曲霉素和砷^[27]。近年来,由于工业、农业和燃烧等人为活动, Cd 在环境中变得无处不在,存在于空气、土壤和水中。特别是受工业活动的影响,水环境中 Cd 的污染日益严重,导致水系统中 Cd 的污染,包括河流、湖泊以及近海岸域。1935 年,全球 Cd 的年产量为 1 000 吨,而 2011 年的年产量有大约 21 000 吨,其中约 7 000 吨被直接排放到水中^[28]。在中国, Cd 污染已经在几条主要的淡水河流中被发现,比如长江。国家《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)规定,渔业水域中 Cd 的含量需小于 0.01 mg/L ,但是经检测发现,在一些山谷水域中, Cd 含量高达 $(12.05 \pm 1.47) \text{ mg/L}$,这对生态造成了很大的威胁^[29]。重金属 Cd 首先对生态系统造成环境污染,然后通过生物积累过程进入食物链,最终进入人体对人类健康造成极大的伤害。

1.2 镉在水生动物体内的累积与毒性

Cd 具有蓄积性,一旦进入生物体就会被累积,且较长的半衰期决定了其在生物体的持久毒性。美国毒物管理委员会(ATSRD)已经把 Cd 列入

危害人体健康主要污染物的名单,世界卫生组织(WTO)将Cd作为重点检测和控制的食品污染物。

植物能富集大量的Cd。Cd是农田中最主要的重金属污染元素。水稻是最易累积Cd的大田农作物。郑洪萍^[30]报道,当土壤含Cd量为2.211 mg/kg时,糙米中Cd的含量可达2.640 mg/kg,这大大超过了国家《食品中镉限量卫生标准》(GB 15201—94)中有关大米Cd的允许量0.2 mg/kg。日本的“骨痛病”就是因为人们长期食用被Cd污染的稻米和大豆。

水生动物体内也很容易富集Cd。Cd主要通过两种途径进入水生动物体内:一是溶解在水中的Cd经鳃吸收后通过血液输送到机体的各个部位,或积累在机体各组织的表面细胞之中;二是水体或残留在饵料中的Cd在动物摄食时通过消化道进入体内。研究表明,由于水生动物的生活习性不同,Cd在不同水生动物体内的平均含量也不尽相同,通常表现为:贝类>甲壳类>鱼类^[31]。相对于甲壳类和鱼类来说,贝类的混合氧化系统存在功能缺陷,导致体内污染物释放过慢,所以其对Cd具有较强的富集能力。贝类作为重要的经济海产品,其体内的Cd可以通过食物链进入人体,从而对人体健康构成严重的威胁。国内外学者对于贝类重金属Cd的污染问题十分关注,罗亚翠等^[32]测定到,我国台州近海养殖区贝类中重金属Cd的平均含量达到2.0 mg/kg;Franco等^[33]报道,西班牙巴斯克海岸牡蛎(*Ostrea gigas tnumb*)体中重金属Cd的平均含量高达2.91 mg/kg。甲壳类动物多为底栖生物,生活在表层沉积物中,以污染沉积物中的底栖生物为食,故对Cd也有较强的浓缩富集能力。甲壳类水产品中Cd超标的现象已经有报道:张鸟飞等^[34]对舟山螃蟹与虾蛄(*Mantis shrimp*)甲壳类海产品中的重金属残留进行了检测,结果显示存在Cd含量超标的现象;徐立新^[35]检测了638份甲壳类水产品,发现其中有将近70份样品出现了Cd含量超标;和庆等^[36]发现,湖北部分淡水小龙虾(*Procambarus clarkia*)体内的Cd含量超标。鱼类也是水体中的重要生活群体,处于水体食物链上端,对水体中的污染十分敏感。何佳璐^[37]在研究舟山市市售的32种海水鱼时发现,海鱼可食部分中Cd的检出率为100%。此外,针对胡子鲶(*Clarias batrachus*)、鲤(*Cyprinus carpio*)等鱼类体内Cd含量的调查显示,Cd大量累积在鱼体的组织中^[38-39]。

Cd对人体的危害多集中在肾脏,而且Cd所导致的肾损伤是不可逆的。进入人体的Cd,首先在肝脏中形成镉-金属硫蛋白复合物(Cd-MT),后者通过血液到达肾脏,经过肾小管中溶酶体的降解、分离,释放游离的Cd,从而对肾脏产生损害^[40]。Cd也可引起骨质疏松、软骨症和骨折^[40],同时通过对睾丸、生精过程中某些酶以及性腺分泌功能等产生影响,发挥生殖系统毒性作用^[41]。

2 镉对水生动物的毒害效应

过量的Cd进入机体后不仅能引起组织器官结构的变化,还能引起细胞内细胞器的形态变化。此外,Cd可与含巯基、羟基及氨基的蛋白质分子结合,占据酶的活性位点,抑制一些酶系统的活性,从而影响体内一些基因的表达^[42]。

2.1 镉对机体组织形态学的影响

长期处在被Cd污染的水环境中,水生动物组织器官会出现病理学的改变,表现为膜系统的破坏和细胞形态的改变。Cd可以加快细胞脂质过氧化速率,导致脂质过氧化物的堆积,进而损伤膜结构,改变膜的通透性。研究发现,Cd暴露会导致罗非鱼(*Oreochromis mossambicus*)鳃细胞凋亡和坏死^[43]。Cd暴露后的长江华溪蟹(*Sinopotamon yangtsekiense*)心肌细胞发生改变:线粒体出现肿胀与空泡化直至解体;细胞核核膜破损;高尔基体变形;内质网扩张和膜结构受到损伤^[44]。韩小铮等^[45]证明,采用体外暴露Cd的方法处理长江华溪蟹后,其肌肉细胞超微结构发生明显变化,细胞核形状不规则,核膜破损,核物质外流;线粒体融合变形,嵴消失,膜破损,最后完全空泡化,如果上述变化超出细胞所能承受的阈值,就会使细胞产生不可逆的坏死现象。

2.2 镉对机体免疫系统的影响

Cd通过氧化损伤的方式对动物机体产生毒性效应。一方面,Cd通过刺激辅酶Q、复合物Ⅲ以及内质网中的电子传递链产生过量的活性氧(reactive oxygen species, ROS)^[46];另一方面,Cd直接作用于机体的抗氧化酶系统,使酶的活力降低或失活^[47]。

机体内的抗氧化机制涉及抗氧化酶和一些抗氧化非酶物质,这些抗氧化酶和抗氧化非酶物质可有效而快速地清除过量ROS,维持体内氧化-还原的平衡,保护机体免受氧化损伤。其中,抗氧化酶主要包括超氧化物歧化酶(superoxide dismu-

tase, SOD)、过氧化氢酶(catalase, CAT)、谷胱甘肽硫转移酶(glutathione S-transferase, GST)以及谷胱甘肽过氧化物酶(glutathione peroxidase, GPx)等^[48]。SOD把 $O_2\cdot^-$ 转化成 H_2O_2 和 O_2 , CAT把产生的 H_2O_2 进一步转化成 H_2O 和 O_2 , GPx则在GSH的作用下还原一些氢过氧化物。目前,关于Cd对动物抗氧化酶影响的研究多集中在陆生生物上,水生动物中的研究较少。研究报道,当Cd的质量浓度为7.25 mg/L、14.5 mg/L、29 mg/L、58 mg/L和116 mg/L时,长江华溪蟹肝胰腺和鳃中的GPx活力随着质量浓度和处理时间的增加先升后降;另外,肝胰腺中GST与谷胱甘肽还原酶(glutathione reductase, GR)的活力无显著变化,而鳃中的GST与GR活力则随着Cd质量浓度和处理时间的增加呈现下降的趋势^[49]。王丽丽等^[50]在研究Cd对虾夷扇贝(*Patinopecten yessoensis*)内脏中抗氧化酶活力的影响时发现,抗氧化酶活力呈现先升高后降低的趋势,表明低质量浓度的Cd可以诱导机体的抗氧化酶活力;相反,高质量浓度的Cd抑制抗氧化酶活力,从而对机体产生伤害。

抗氧化非酶物质包括:金属硫蛋白(metallothionein, MT)、类胡萝卜素、维生素C和维生素E等。其中,MT是一种低相对分子质量的金属结合蛋白,清除ROS的能力远远高于其他相关的酶,在降低由Cd引起的氧化损伤方面起着关键的作用^[51]。当 Cd^{2+} 质量浓度为1.45 mg/L时,河南华溪蟹(*Sinopotamon henanense*)肝胰腺的MT活力显著高于对照组(Cd^{2+} 质量浓度为0 mg/L)^[52];暴露在 Cd^{2+} 中的中华绒螯蟹(*Eriocheir sinensis*),其肝胰腺和鳃的MT活力均高于对照组(Cd^{2+} 质量浓度为0 mg/L)^[53],以上信息说明 Cd^{2+} 处理可增加蟹类肝胰腺和鳃的MT活力,以减少 Cd^{2+} 对机体的氧化损伤。

2.3 镉对机体分子水平上的影响

Cd不仅能够导致水生动物生物大分子的损伤,还能影响其体内基因的表达。Cd能调控细胞内MT mRNA的表达,反过来MT的诱导又能降低Cd毒性^[54-55]。除此之外,Cd还会引起其他重要的相关基因表达,比如酚氧化酶原(*prophenoloxidase, proPO*)基因和溶菌酶(*lysozyme, LSZ*)基因。酚氧化酶和溶菌酶被诱导表达通常被认为是机体或细胞对Cd毒性的应答反应。研究显示,河南华溪蟹在0 mg/L、0.725 mg/L、1.450 mg/L、2.900 mg/L的Cd环境中暴露7 d、14 d和21 d后,其血细胞中*proPO*基因的表达水平下降,相反,*LSZ*基因的

表达水平有一定程度的上调^[48]。Sun等^[56]发现,Cd可引起螃蟹肝胰腺中*proPO*基因表达水平显著下调。另外,Li等^[57]在研究不同浓度Cd对稀有鲫(*Gobiocypris rarus*)幼体的影响时发现,Cd对稀有鲫幼体的下丘脑-垂体-甲状腺轴相关基因的表达产生了不同程度的影响。其中,*crh*、*slc5a5*、*tg*和*tshb*的表达水平显著增高,*trα*和*trβ*的表达水平显著降低。

3 酸化对镉的环境行为和毒性效应的影响

3.1 酸化对镉环境行为的影响

酸化对Cd环境行为的影响主要归结为两个方面:

(1) 酸化影响固相物质对Cd的富集。酸化条件下Cd极易由固相物质迁移到水体中,目前学者们对于该现象的解释分为两种:一种是当水环境pH降低时,水体中的 H^+ 浓度随之增高, H^+ 与固相物质中的 Cd^{2+} 发生置换反应,从而造成水环境中 Cd^{2+} 含量增加^[58];另一种是水体中 H^+ 浓度达到一定水平时,会破坏固相物质表面官能团与 Cd^{2+} 所形成的络合物,从而使吸附态Cd全部交换解吸到水体中^[59]。许中坚等^[60]在研究酸雨对土壤Cd释放的影响时发现,在pH 4.5的酸雨作用下,Cd的平均释放水平是对照组的1.6~1.7倍,当pH值降到3.5时,Cd的平均释放水平甚至是对照组的2.0~6.5倍。另有研究报道,当河水和底泥的pH值为2.0时,积累于底泥中的Cd能释放出相当一部分^[61]。综上可知,酸化对Cd释放的影响可增加水体中Cd的负荷,从而加重Cd对人类的直接或潜在危害。

(2) 酸化会影响水相中Cd的浓度。Cd在河流环境中的迁移形式和数量,不管是溶解态或吸附态,均随着环境pH的变化而变化。当水环境中的pH值大于8时, Cd^{2+} 以 $Cd(OH)^+$ 的形式存在,一旦pH值小于8时, $Cd(OH)^+$ 就会转变为氯络离子,从而提高镉化合物的溶解度,造成水体中 Cd^{2+} 含量增加^[61]。

3.2 酸化对镉生物毒性的影响

酸化可以将重金属转化为对生物毒性更强的形态,影响水生动物中金属的毒性和累积。pH控制着重金属的氢氧化物、碳酸盐和磷酸盐的溶解度,也影响着沉积物和有机物中重金属的水解^[62]。一般来说,在酸性条件下沉积物中Cd的迁移率会增加,更容易被释放到覆水中。已有研究表明,

低 pH 和 Cd 联合作用对光滑扇贝(*Flexopecten glaber*)的生物学毒性表现出协同效应,同时低 pH 条件下扇贝组织中 Cd 的生物累积增加^[63]。Zhang 等^[64]研究发现,沉积物中的 Cd 在酸性条件下更易被释放,尤其在 pH 值为 0~4 时, Cd 的释放量占沉积物中 Cd 总量的 50%以上。Riba 等^[65]研究了不同 pH (6.5、7.5 和 8.5)条件下沉积物中 Cd 对菲律宾帘蛤(*Ruditapes philippinarum*)的毒性,发现 Cd 从沉积物到水体的迁移率与系统 pH 值呈相反趋势,帘蛤的死亡率在 pH 6.5 时明显高于 pH 7.5 和 pH 8.5。这些研究表明, Cd 在较低的 pH 值下可能比在较高的 pH 值下更具生物利用性,因此可能对暴露的生物体更具毒性。但是也有研究报告,水生生物处于高 pH 环境时,某些毒性标志物反而变化显著。Ma 等^[66]报道,当铜锈环棱螺(*Belamya aeruginosa*)处于高 pH (9)环境中时, Cd 不仅对其 DNA 造成了明显的损伤,而且导致 Cd 的整体毒性增加。这可能是由于高 pH 条件降低了 H⁺和 Cd²⁺的胞外竞争,使得更多的 Cd 进入细胞,从而对 DNA 造成损伤。

4 镉和酸化复合胁迫对水生动物的影响

目前,有关水体酸化和重金属对水生动物生物学影响的研究多是单一因素的,而关于不同酸度条件对重金属环境生物效应所起的协同作用或拮抗作用的研究相对较少。但是,水体酸化和重金属复合污染已经成为当前重要的水体环境问题之一^[67-68],水体酸化和重金属已经对水生动物的繁殖、发育和生存产生影响,因此研究水体酸化和重金属的双重胁迫对水生动物生理生态的复合影响具有重要的意义。

4.1 镉和酸化对水生动物繁殖和发育的影响

酸化和 Cd 能够影响水生动物的繁殖与发育,但是有关研究仍处于初期阶段。韦晓慧^[69]研究发现,重金属 Cd 和酸化共同作用在日本虎斑猛水蚤(*Tigriopus japonicus*)时,其生理生态均受到影响。Cd 的质量浓度为 10 μg/L 时,日本虎斑猛水蚤无节幼体的发育时间在 pH 值为 7.7 和 7.3 时延长了 1 d。杨世超^[70]研究了重金属铜、Cd 及海水酸化对日本虎斑猛水蚤的毒性,结果表明:当日本虎斑猛水蚤暴露于 Cd 中,同时水环境的 pH 值为 6.0 时,其平均成熟时间比对照组(pH=7.88~8.05, Cd=0 mg/L)延长 2 d;而且,在 Cd 暴露的情况下,日本虎斑猛水蚤无节幼体数的产量受酸化的影响

非常明显,随着 pH 值的下降,无节幼体的数量逐渐减少。这些研究表明 Cd 污染和酸化的复合胁迫会对日本虎斑猛水蚤的发育时间和繁殖力产生影响,同时提示这种复合胁迫可能对其他水生动物的繁殖和生长也有影响。

4.2 镉和酸化对水生动物其他方面的影响

Cd 和酸化对水生动物的组织细胞具有消极影响。Cao 等^[71]研究了太平洋牡蛎(*Crassostrea gigas*)在海水酸化和 Cd 污染条件下的组织形态和细胞凋亡情况,其研究结果显示:鳃部和消化腺均发生损伤,鳃部表现为嗜酸性颗粒空泡化、肥大和胞浆内包涵体,消化道的组织病理学损伤要比鳃部严重得多,具体表现为脂褐素聚集、结缔组织细胞浸润、结缔组织坏死、小管变性、上皮组织紊乱和上皮细胞肥厚;在 pH 值为 7.6 时, Cd 暴露处理的损伤指数出现了最高值;在 pH 值为 7.8 和 7.6 时, Cd 暴露的鳃部和消化腺中可检测到大量的凋亡细胞。同时,该研究发现,暴露在高度 CO₂ 和高浓度 Cd 31 d 后,太平洋牡蛎的抗氧化酶活性明显下降。韦晓慧^[69]研究了酸化条件下 Cd 对日本虎斑猛水蚤中 SOD 活性的影响,发现中度 CO₂ 和高浓度 Cd 处理会降低日本虎斑猛水蚤细胞抗氧化酶的活性,但是 CO₂ 浓度升高又会诱导其活性。Cui 等^[72]研究了牙鲆(*Paralichthys olivaceus*)幼体在酸化和 Cd 复合胁迫作用下的生理反应,发现其抗氧化防御能力受到影响,而且酸化与 Cd 相互作用还能调节这些防御反应。这些研究结果表明,酸化加重了环境相关浓度的 Cd 对水生动物的毒性;同时,酸化和 Cd 均可诱导氧化应激,并且这两种因素在抗氧化反应方面具有协同作用,这就使得机体中抗氧化酶的活性和含量更加明显地被诱导或抑制,以应对由于双因素增强的氧化压力。

5 展望

近年来,酸化和 Cd 对水生动物的生存已经产生了不同程度的影响,同时也影响着水体的生态和水产养殖。目前,有关酸化和 Cd 对水生动物生理影响的研究多是单一因素的,关于 Cd 和酸化复合胁迫对水生动物影响的报道很少。同时,研究对象主要局限于几种动物,例如:日本虎斑猛水蚤、牙鲆、牡蛎等,在其他水生动物中展开的研究较少。此外,酸化和 Cd 对水生动物的生理影响过程尚不清楚,还有待进一步深入研究。

有关酸化和 Cd 对水生生物影响的研究是一个新领域,该领域有着丰富的内容等待我们去探索,例如:酸化和 Cd 对水体生态和渔业资源的影响过程及机理如何?面对酸化或 Cd,水生生物如何应对?当酸化和 Cd 共同作用时水生生物如何反应?酸化和 Cd 是怎样相互影响的?开展酸化和 Cd 的研究,不仅具有重要的科学价值,同时还具有显著的经济价值和社会价值。同时,研究水生动物对酸化和 Cd 胁迫的生理反应与适应性在环境科学、生态学以及水产养殖方面都具有重要意义。

参考文献(References):

- [1] LUO L Z. Metal accumulation and differentially expressed proteins in gill of oyster (*Crassostrea hongkongensis*) exposed to long-term heavy metal-contaminated estuary[J]. Fish & Shellfish Immunology, 2014, 38(2): 318–329.
- [2] BELHAJ D, JERBI B, MEDHIOUB M, et al. Impact of treated urban wastewater for reuse in agriculture on crop response and soil ecotoxicity[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, 23(16): 15877–15887.
- [3] SAHA N, RAHMAN M S, AHMED M B, et al. Industrial metal pollution in water and probabilistic assessment of human health risk[J]. Journal of Environmental Management, 2017, 185: 70–78.
- [4] 戴伟. 水生动物重金属污染生物标志物的研究进展[J]. 水生生态学杂志(DAI Wei. Advances in biomarkers of aquatic animals for monitoring heavy metal contamination[J]. Journal of Hydroecology), 2010, 31(6): 116–119.
- [5] NÚÑEZ-NOGUEIRA G, FERNÁNDEZ-BRINGAS L, ORDIAÑO-FLORES A, et al. Accumulation and regulation effects from the metal mixture of Zn, Pb, and Cd in the tropical shrimp *Penaeus vannamei*[J]. Biological Trace Element Research, 2012, 150: 208–213.
- [6] CHIODI BOUDET L N, POLIZZI P, ROMERO M S, et al. Histopathological and biochemical evidence of hepatopancreatic toxicity caused by cadmium in white shrimp, *Palaeomonetes argentinus*[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2015, 113: 231–240.
- [7] JI C L, WU H F, ZHOU M, et al. Multiple biomarkers of biological effects induced by cadmium in clam *Ruditapes philippinarum*[J]. Fish and Shellfish Immunology, 2015, 44(2): 430–435.
- [8] JÄRUP L, KESSON A. Current status of cadmium as an environmental health problem[J]. Toxicology and Applied Pharmacology, 2009, 238(3): 201–208.
- [9] SATARUG S, BAKER J R, URBENJAPOL S, et al. A global perspective on cadmium pollution and toxicity in non-occupationally exposed population[J]. Toxicology Letters, 2003, 137(1/2): 65–83.
- [10] GAO D, XU Z E, ZHANG X Y, et al. Molecular cloning, immunohistochemical localization, characterization and expression analysis of caspase-9 from the purple red common carp (*Cyprinus carpio*) exposed to cadmium[J]. Aquatic Toxicology, 2013, 142/143: 53–62.
- [11] PENA L B, BARCIA R A, AZPILICUETA C E, et al. Oxidative post translational modifications of proteins related to cell cycle are involved in cadmium toxicity in wheat seedlings[J]. Plant Science, 2012, 196: 1–7.
- [12] CHANDURVELAN R, MARSDEN I D, GAW S, et al. Water-borne cadmium impacts immunocytotoxic and cytogenotoxic endpoints in green-lipped mussel, *Perna canaliculus*[J]. Aquatic Toxicology, 2013, 142/143: 283–293.
- [13] HONDA R T, FERNANDES-DE-CASTILHO M, VAL A L. Cadmium-induced disruption of environmental exploration and chemical communication in matrix, *Brycon amazonicus*[J]. Aquatic Toxicology, 2008, 89(3): 204–206.
- [14] CHORA S, STARITA-GERIBALDI M, GUIGONIS J M, et al. Effect of cadmium in the clam *Ruditapes decussatus* assessed by proteomic analysis[J]. Aquatic Toxicology, 2009, 94(4): 300–308.
- [15] SINGH S, PRASAD S M. IAA alleviates Cd toxicity on growth, photosynthesis and oxidative damages in eggplant seedlings[J]. Plant Growth Regulation, 2015, 77: 87–98.
- [16] JI Y L, WANG Z, WANG H, et al. Ascorbic acid protects against cadmium-induced endoplasmic reticulum stress and germ cell apoptosis in testes[J]. Reproductive Toxicology, 2012, 34(3): 357–363.
- [17] 祝丽萍, 邵晓阳, 章丽芳. 环境因子对双清溪浙江华溪蟹 (*Sinopotamon chekiangense* Tai et Song) 种群变动的影响[J]. 杭州师范学院学报(自然科学版)(ZHU Li-ping, SHAO Xiao-yang, ZHANG Li-fang. The effects of environmental factors on the fluctuations of *Sinopotamon chekiangense* Tai et Song's population[J]. Journal of Hangzhou Teachers College (Natural Science Edition)), 2005, 4(2): 124–128.
- [18] KIM S G, JEE J H, KANG J C. Cadmium accumulation and elimination in tissues of juvenile olive flounder, *Paralichthys olivaceus* after sub-chronic cadmium exposure[J]. Environmental Pollution, 2004, 127(1): 117–123.
- [19] YU X J, YAN Y, WANG W X. The distribution and speciation of trace metals in surface sediments from the Pearl River Estuary and the Daya Bay, Southern China[J]. Marine Pollution Bulletin, 2010, 60(8): 1364–1371.
- [20] 张新民, 柴发合, 王淑兰, 等. 中国酸雨研究现状[J]. 环境科学研究(ZHANG Xin-min, CHAI Fa-he, WANG Shu-lan, et al. Research progress of acid precipitation in China[J]. Research of Environmental Sciences), 2010, 23(5): 527–532.
- [21] CHIU L, YEW-HU C. The Pacific white shrimp, *Litopenaeus vannamei*, in Asia: the world's most widely cultured alien crustacean[M]//GALIL B S, CLARK P F, CARLTON J T. In the Wrong Place—Alien Marine Crustaceans: Distribution, Biology and Impacts. Dordrecht: Springer, 2011: 489–519.
- [22] CHEN T, LIN T H, LI H M, et al. Heat shock protein 40 (HSP40) in Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*): molecular cloning, tissue distribution and ontogeny, response to temperature, acidity/alkalinity and salinity stresses, and potential role in ovarian development[J]. Frontiers in Physiology, 2018, 9: 1784.
- [23] MARTIN M H, COUGHTREY P J. Biological Monitoring of Heavy Metal Pollution: Land and Air[M]. London: Applied Science Publishers of the United Kingdom, 1982.

- [24] VERHAERT V, COVACI A, BOUILLON S, *et al.* Baseline levels and trophic transfer of persistent organic pollutants in sediments and biota from the Congo River Basin (DR Congo)[J]. *Environment International*, 2013, 59: 290–302.
- [25] 黄宝圣. 镉的生物毒性及其防治策略[J]. *生物学通报*(HUANG Bao-sheng. The biochemical toxicity of cadmium and the tactics of prevention and cure[J]. *Bulletin of Biology*), 2005, 40(11): 26–28.
- [26] 李婧, 周艳文, 陈森, 等. 我国土壤镉污染现状、危害及其治理方法综述[J]. *安徽农学通报*(LI Jing, ZHOU Yan-wen, CHEN Sen, *et al.* Actualities, damage and management of soil cadmium pollution in China[J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*), 2015, 21(24): 104–107.
- [27] 杜静雅, 苗亮, 李祥云, 等. 急性镉胁迫对大弹涂鱼血清铁代谢指标的影响[J]. *生物学杂志*(DU Jing-ya, MIAO Liang, LI Ming-yun, *et al.* Effects of acute cadmium stress on serum iron metabolism indicators of *Boleophthalmus pectinirostris*[J]. *Journal of Biology*), 2017, 34(6): 37–41.
- [28] 董芳, 李芳芳, 祁晓霞, 等. 环境毒理学研究进展[J]. *生态毒理学报*(DONG Fang, LI Fang-fang, QI Xiao-xia, *et al.* Advances in environmental toxicology researches[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*), 2011, 6(1): 9–17.
- [29] 韩托, 王茜, 王兰. 山西沁河流域溪蟹生态调查及河流污染现状[J]. *四川动物*(HAN Tuo, WANG Qian, WANG Lan. Ecological investigation of freshwater crab and river pollution in basin of Qinhe River[J]. *Sichuan Journal of Zoology*), 2008, 27(5): 804–806.
- [30] 郑洪萍. 福建省耕地土壤重金属污染及生态风险评价[J]. *福建农业学报*(ZHENG Hong-ping. Heavy metal pollution and potential ecological risks of soils for agricultural cultivations in Fujian[J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*), 2012, 27(8): 888–894.
- [31] 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]. 青岛: 中国海洋大学(GONG Qian. The Study of Detection and Accumulation of the Heavy Metal Cadmium in Marine Intertidal Shellfish[D]. Qingdao: Ocean University of China), 2011.
- [32] 罗亚翠, 张海君, 潘碧枢. 台州市近海养殖区海产品中8种元素污染状况及健康风险评价[J]. *中国卫生检验杂志*(LUO Ya-cui, ZHANG Hai-jun, PAN Bi-shu. Pollution status and health risk assessment of 8 elements in marine products from Taizhou[J]. *Chinese Journal of Health Laboratory Technology*), 2019, 29(3): 344–347, 350.
- [33] FRANCO J, BORJA A, SOLAUN O, *et al.* Heavy metals in molluscs from the Basque Coast (Northern Spain): results from an 11-year monitoring programme[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2002, 44(9): 973–976.
- [34] 张鸟飞, 穆卫华, 张斯涵, 等. 舟山特色海产品残留重金属的监测与评价[J]. *广州化工*(ZHANG Niao-fei, MU Wei-hua, ZHANG Si-han, *et al.* Test and evaluation of heavy metals in seafood from Zhoushan[J]. *Guangzhou Chemical Industry*), 2016, 44(4): 101–103.
- [35] 徐立新. 水产品中重金属及禁用渔药的安全风险评估[D]. 厦门: 集美大学(XU Li-xin. Security Risk Assessment of Heavy Metal and Forbidden Fishery Medicine in Aquatic Products[D]. Xiamen: Jimei University), 2018.
- [36] 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[J]. *农业环境科学学报*(HE Qing, PENG Zi-ran, ZHANG Chen, *et al.* Heavy metals content of pond aquaculture products in Yangtze River Delta and the health risk associated with human consumption[J]. *Journal of Agro-Environment Science*), 2017, 36(6): 1070–1077.
- [37] 何佳璐. 舟山地区海水鱼中铅与镉污染现状调查[J]. *中国卫生检验杂志*(HE Jia-lu. Investigation on lead and cadmium residue in seafish of Zhoushan area[J]. *Chinese Journal of Health Laboratory Technology*), 2013(11): 2526–2527, 2531.
- [38] DE SMET H, BLUST R. Stress responses and changes in protein metabolism in carp *Cyprinus carpio* during cadmium exposure[J]. *Ecotoxicology & Environmental Safety*, 2001, 48(3): 255–262.
- [39] KUMAR P, PRASAD Y, PATRA A K, *et al.* Ascorbic acid, garlic extract and taurine alleviate cadmium-induced oxidative stress in freshwater catfish (*Clarias batrachus*)[J]. *Science of the Total Environment*, 2009, 407(18): 5024–5030.
- [40] 裴秀从, 徐兆发. 镉的慢性毒作用及其远期效应[J]. *环境与职业医学*(PEI Xiu-cong, XU Zhao-fa. Chronic toxicity and remote effect of cadmium[J]. *Journal of Environmental and Occupational Medicine*), 2003, 20(1): 58–59.
- [41] 杨建明, 陈琼宇, 曾祥斌, 等. 镉对雄性生育功能的影响[J]. *中国公共卫生*(YANG Jian-ming, CHEN Qiong-yu, ZENG Xiang-bin, *et al.* Effects of cadmium on male reproductive ability in rat[J]. *China Public Health*), 2000, 16(4): 313–314.
- [42] 杨平, 李筱筱, 张海忠, 等. 重金属污染物对巨噬细胞的影响及其生物监测意义[J]. *环境科学学报*(YANG Ping, LI Xiao-xiao, ZHANG Hai-zhong, *et al.* Effects of Cd or Pb on macrophage and its potential application in biological monitoring[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*), 2015, 35(10): 3377–3383.
- [43] 柏世军. 水环境镉对罗非鱼的毒性作用和机理探讨[D]. 杭州: 浙江大学(BAI Shi-jun. Effects of Waterborne Cadmium on *Tilapia (Oreochromis niloticus)* and Approach to Mechanism of the Effects[D]. Hangzhou: Zhejiang University), 2006.
- [44] 王兰, 孙海峰. 镉对长江华溪蟹心肌细胞超微结构的影响[J]. *水生生物学报*(WANG Lan, SUN Hai-feng. Effect of cadmium on ultrastructure of myocardial cell of freshwater crab, *Sinopotamon yangtsekiense*[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*), 2002, 26(1): 6–13.
- [45] 韩小铮, 王兰, 王茜, 等. 体外暴露镉对长江华溪蟹肌肉组织细胞超微结构的影响[C]//甲壳动物学论文集. 青岛: 中国动物学会(HAN Xiao-zheng, WANG Lan, WANG Qian, *et al.* Effects of cadmium exposure *in vitro* on ultrastructure of muscle cells of *Sinopotamon yangtsekiense*[C]//A Collection of Papers on Crustacean. Qingdao: China Zoological Society), 2002: 493–498.
- [46] DEMIN O V, KHOLODENKO B N, SKULACHEV V P. A model of $O_2^{\cdot-}$ generation in the complex III of the electron transport chain[J]. *Molecular and Cellular Biochemistry*, 1998, 184(1/2): 21–33.
- [47] LUSHCHAK V I. Environmentally induced oxidative stress in aquatic animals[J]. *Aquatic Toxicology*, 2011, 101(1): 13–30.
- [48] 秦圣娟. 镉对华溪蟹的免疫毒性效应[D]. 太原: 山西大学(QIN Sheng-juan. Immunotoxic Effects of Cadmium on Freshwater Crab, *Sinopotamon*[D]. Taiyuan: Shanxi University), 2011.

- [49] 刘娜, 闰博, 李涌泉, 等. Cd²⁺对长江华溪蟹谷胱甘肽系统的影响[J]. 环境科学(LIU Na, YAN Bo, LI Yong-quan, *et al.* Effects of Cd²⁺ on glutathione system of hepatopancreas and gills in freshwater crab *Sinopotamon yangtsekiense*[J]. Environmental Science), 2008, 29(8): 2302–2307.
- [50] 王丽丽, 夏斌, 陈碧娟, 等. 镉胁迫对虾夷扇贝抗氧化防御系统的影响[J]. 海洋环境科学(WANG Li-li, XIA Bin, CHEN Bijuan, *et al.* Effects of cadmium stress on antioxidant defense system of *Patinopecten yessoensis*[J]. Marine Environmental Science), 2012, 31(1): 39–42.
- [51] 皇甫加清. 镉对南方鲇抗氧化酶系统和脂质过氧化作用的影响[D]. 重庆: 西南大学(HUANGFU Jia-qing. Effect of Cadmium on Antioxidant Enzymes and Lipid Peroxidation of *Silurus meridionalis*[D]. Chongqing: Southwest University), 2011.
- [52] ZHOU Y Y, JING W X, DAHMS H U, *et al.* Oxidative damage, ultrastructural alterations and gene expressions of hemocytes in the freshwater crab *Sinopotamon henanense* exposed to cadmium[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2017, 138: 130–138.
- [53] ZHAO X J, YANG Z G, CHENG Y X. Effects of cadmium alone and in combination with pH on bioaccumulation, tissue structure, and enzyme activity of the Chinese mitten crab, *Eriocheir sinensis*[J]. Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology, 2021, 245: 109025.
- [54] LI R J, ZHOU Y Y, WANG L, *et al.* Low-molecular-weight-chitosan ameliorates cadmium-induced toxicity in the freshwater crab, *Sinopotamon yangtsekiense*[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2011, 74(5): 1164–1170.
- [55] LI Y J, WU H, WEI X X, *et al.* Subcellular distribution of Cd and Zn and MT mRNA expression in the hepatopancreas of *Sinopotamon henanense* after single and co-exposure to Cd and Zn[J]. Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology and Pharmacology, 2015, 167: 117–130.
- [56] SUN M, LI Y T, LIU Y, *et al.* Transcriptome assembly and expression profiling of molecular responses to cadmium toxicity in hepatopancreas of the freshwater crab *Sinopotamon henanense*[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 19405.
- [57] LI Z H, CHEN L, WU Y H, *et al.* Effects of waterborne cadmium on thyroid hormone levels and related gene expression in Chinese rare minnow larvae[J]. Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology and Pharmacology, 2014, 161: 53–57.
- [58] 熊礼明. 土壤溶液中镉的化学形态及化学平衡研究[J]. 环境科学学报(XIONG Li-ming. Chemical species and equilibria of cadmium in soil solutions[J]. Acta Scientiae Circumstantiae), 1993, 13(2): 150–156.
- [59] 廖敏, 黄昌勇, 谢正苗. pH对镉在土水系统中的迁移和形态的影响[J]. 环境科学学报(LIAO Min, HUANG Chang-yong, XIE Zheng-miao. Effect of pH on transport and transformation of cadmium in soil-water system[J]. Acta Scientiae Circumstantiae), 1999, 19(1): 81–86.
- [60] 许中坚, 刘广深. 模拟酸雨对南方红壤镉释放的影响[J]. 农村生态环境(XU Zhong-jian, LIU Guang-shen. Effect of simulated acid rain on release of cadmium from red soils[J]. Rural Environment), 2004, 20(4): 27–31.
- [61] 黎秉铭. 镉、铅在某些河流环境中迁移净化机理的研究[J]. 地球化学(LI Bing-ming. A study on the mechanism of Pb-, Cd-transportation and purification in streams[J]. Geochimica), 1983(2): 205–212.
- [62] APPEL C, MA L N. Concentration, pH, and surface charge effects on cadmium and lead sorption in three tropical soils[J]. Journal of Environmental Quality, 2002, 31(2): 581–589.
- [63] NARDI A, BENEDETTI M, FATTORINI D, *et al.* Oxidative and interactive challenge of cadmium and ocean acidification on the smooth scallop *flexopecten glaber*[J]. Aquatic Toxicology, 2018, 196: 53–60.
- [64] ZHANG Y H, ZHANG H H, ZHANG Z B, *et al.* pH effect on heavy metal release from a polluted sediment[J]. Journal of Chemistry, 2018, 2018: 1–7.
- [65] RIBA I, DELVALLS T A, FORJA J M, *et al.* The influence of pH and salinity on the toxicity of heavy metals in sediment to the estuarine clam *Ruditapes philippinarum*[J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2010, 23(5): 1100–1107.
- [66] MA T W, WANG M, GONG S J, *et al.* Impacts of sediment organic matter content and pH on ecotoxicity of coexposure of TiO₂ nanoparticles and cadmium to freshwater snails *Bellamya aeruginosa*[J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 2017, 72: 153–165.
- [67] ZHOU Y Y, JING W X, WANG L, *et al.* Oxidative damage, ultrastructural alterations and gene expressions of hemocytes in the freshwater crab *Sinopotamon henanense* exposed to cadmium[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2017, 138: 130–138.
- [68] 王俭, 吴永贵, 刘方, 等. 贵州省典型煤矿区水体水质分析及其急性生物毒性[J]. 环境科学与技术(WANG Jian, WU Yong-gui, LIU Fang, *et al.* Water quality analysis and acute toxicity to *Daphnia carinata* of various water samples from typical coal mining areas in Guizhou Province[J]. Environmental Science and Technology), 2011, 34(4): 68–73.
- [69] 韦晓慧. 海洋酸化条件下铜、镉对日本虎斑猛水蚤(*Tigriopus japonicus*)发育、繁殖和超氧化物歧化酶活性的影响[D]. 青岛: 中国海洋大学(WEI Xiao-hui. Effect of Simulated Ocean Acidification Condition and Heavy Metals of Cu and Cd on the Development, Reproduction and SOD Activity of *Tigriopus japonicus*[D]. Qingdao: Ocean University of China), 2013.
- [70] 杨世超. 重金属铜、镉及海水酸化对底栖猛水蚤的毒性研究[D]. 青岛: 中国海洋大学(YANG Shi-chao. Toxicity of Copper, Cadmium and Seawater Acidification to the Benthic Harpacticoid[D]. Qingdao: Ocean University of China), 2010.
- [71] CAO R W, LIU Y L, WANG Q, *et al.* Seawater acidification aggravated cadmium toxicity in the oyster *Crassostrea gigas*: metal bioaccumulation, subcellular distribution and multiple physiological responses[J]. Science of the Total Environment, 2018, 642: 809–823.
- [72] CUI W T, CAO L, LIU J H, *et al.* Effects of seawater acidification and cadmium on the antioxidant defense of flounder *Paralichthys olivaceus* larvae[J]. Science of the Total Environment, 2020, 718: 137234.