

水环境镉污染对养殖鱼类的影响研究进展^{*}

王志芳¹, 肖俊^{1,2,3}, 罗永巨^{1,2*}

(1. 广西壮族自治区水产科学研究院, 广西水产遗传育种与健康养殖重点实验室, 广西南宁 530021; 2. 上海海洋大学, 上海 201306; 3. 广西海洋生物技术重点实验室, 广西北海 536000)

摘要: 镉是环境中存在的主要重金属污染物之一, 其在体内的大量累积会对机体各器官产生严重的毒害作用。目前, 我国水产养殖业镉污染问题非常严重, 水生动物体内镉残留现象普遍存在, 这不仅严重影响了我国养殖水产品的质量安全, 而且极大制约了我国水产养殖业的健康绿色发展, 同时水生动物体内存在的镉会通过食物链富集进入人体, 严重危害人体健康。现代检测技术的逐步完善, 为研究重金属镉对水产养殖业的影响提供了条件。本文主要以鱼类为代表生物, 概述重金属镉在水生动物体内的累积分布情况, 并论述镉残留的危害, 旨在更好地响应我国水产品“提质增效”这一方针, 同时也为进一步促进我国水产养殖业的健康发展提供参考。

关键词: 水生动物 健康养殖 重金属 镉 检测方法 风险评价

中图分类号: S9 文献标识码: A 文章编号: 1002-7378(2019)03-0166-06

0 引言

新时代下“绿色、健康”的生活理念, 使得人们对产品质量安全问题尤为关注。国民食品中约有 1/3 的动物蛋白来自于水产品, 水产养殖是食品生产中发展最迅速的产业, 因此绿色健康的水产养殖业对满足人类的蛋白和食品安全需求至关重要。鱼类作为水产养殖的主要对象, 同时又是水体中的重要生活群体, 本身处于水体食物链上端, 对水体中的污染十分敏感, 如果长期受环境污染物的胁迫, 会造成鱼类生

殖系统、内分泌和代谢紊乱, 进而导致生理活动失调、畸变, 甚至死亡。

迅速发展的现代工业带来的工业废液的大量排放, 以及日积月累的生活垃圾不合理处置等现象, 使得环境污染问题日益严重。重金属因毒性强、在环境中具有较强的持久性以及可通过生物累积等特点, 成为最严重的环境污染物类别之一。镉作为地壳元素, 广泛存在于自然界中。随着人类生产活动以及工业化进程的迅猛发展, 大量镉元素以各种形态进入人类生活环境中。镉具有环境高毒性、易蓄积性、不易降解性等特点, 对生物体来说, 镉会对体内代谢系统以

^{*}“铜和镉复合暴露影响罗非鱼卵巢发育机制的研究”(31960733), 现代农业产业技术体系专项资金项目(CARS-46), 南宁市重点研发计划“罗非鱼池塘循环流水生态养殖技术与示范”项目(20172010)和广西自然科学基金项目“铜、锌复合暴露在吉富罗非鱼中累积及毒性影响研究(联合资助培育项目)”(2018GXNSFAA138128)资助。

【作者简介】

王志芳(1991—), 女, 硕士研究生, 主要从事水生动物养殖环境调控研究, E-mail: 1376070393@qq.com。

【**通信作者】

罗永巨(1967—), 男, 博士, 研究员, 主要从事水生生物遗传育种与健康养殖、水生态毒理及环境评价研究, E-mail: lfylzcl23@163.com。

【引用本文】

DOI: 10.13657/j.cnki.gxkxyxb.20190903.007

王志芳, 肖俊, 罗永巨. 水环境镉污染对养殖鱼类的影响研究进展[J]. 广西科学院学报, 2019, 35(3): 166-171.

WANG Z F, XIAO J, LUO Y J. A review of the effects of cadmium on aquaculture [J]. Journal of Guangxi Academy of Sciences, 2019, 35(3): 166-171.

及诸多器官产生毒害作用,且污染后不易被发现,具有强的组织亲和性,很难随代谢产物排出体内,是水环境中最主要的污染物之一^[1],并最终通过包括食物链在内的多种途径进入人体,威胁人体健康。

镉作为毒性极大的重金属元素之一,其在水产动物体内的大量累积不仅会严重危害生物体健康,而且会危及水产养殖业的绿色健康发展。为满足我国“生态优先”政策和“绿色健康”市场的双重需求,本文针对水产动物镉的残留检测方法以及累积分布情况进行概述,以期对镉的潜在风险评估及合理监管提供参考。

1 镉的检测方法

自然状态下,镉主要以离子态存在,但进入有机体之后,大部分镉离子迅速与金属硫蛋白结合成有机态络合物,少部分则与体内的核苷、蛋白质等物质通过离子键形成配位化合物。

水生动物体内总镉的检测方法为原子吸收光谱(Atomic absorption spectroscopy, AAS)法和电感耦合等离子体(Inductively coupled plasma, ICP)法。

AAS法包括石墨炉原子吸收光谱(Graphite furnace atomic absorption spectrometry, GFAAS)法和火焰原子吸收光谱(Flame atomic absorption spectrometry, FAAS)法。GFAAS法因高灵敏度、低检测限、需样量少等优点被广泛用于镉的测定。但该方法也有一定的局限性,易受灰化温度、原子化温度、基体改进剂条件以及待检测样品中镉含量值的影响,进而干扰检测结果。FAAS法具有灵敏度高、抗干扰能力强、精密度高、选择性好等优点,适用于微量重金属元素的含量检测。

ICP法包括电感耦合等离子体质谱(Inductively coupled plasma mass spectrometry, ICP-MS)法和电感耦合等离子体原子发射光谱(Inductively coupled plasma atomic emission spectrometry, ICP-AES)法。ICP-MS法具有抗干扰能力强、检出限低、准确度高、精密度良好、检测过程便捷,以及对低含量待检测金属元素检测结果准确等优点,被广泛用于金属元素的含量测定中。ICP-AES法具有线性范围宽、检测过程迅速便捷等优点,但易受光谱及基体效应干扰。

2 镉对鱼类的生物学毒性影响

镉是一种毒性极大的非必需重金属元素,其在生物体内的累积会对中枢神经系统、大脑、心脏、肝脏、

肾脏、肺以及肠道等产生严重毒害作用^[2],危害生物体健康。1972年,世界卫生组织将镉列为需要优先检测研究的食品污染物。在联合国环境规划署提出的12种全球范围的环境危险化学品中,镉也位居首位。镉通过与生物体内的巯基结合成稳定化合物形式,严重干扰体内酶的结构及功能,进而扰乱生物体的正常代谢过程,并造成组织损伤。研究表明,鱼类体内的镉含量可达水体中镉含量的1 000倍^[3]。

在鱼类中,一旦污染物胁迫作用发生,鱼体的内分泌活动就会受到影响,从而导致鱼类各种代谢失调和免疫系统紊乱,最终表现为鱼类的生理活动异常、生长速度缓慢和免疫力的下降等^[4],甚至引发死亡。研究表明,尼罗罗非鱼的96 h镉半致死浓度(LC₅₀)为14.8 mg/L^[5],鲶鱼(*Sutchi catfish*)的为64.89 mg/L^[6],线鳢(*Ophicephalus striatus*)的为0.63 mg/L^[7],露斯塔野鲮(*Labeo rohita*)的为22.92 mg/L^[8]。

2.1 镉对鱼类免疫系统的影响

镉主要通过诱导氧化应激和免疫毒性对鱼类产生广泛的毒性影响^[9]。镉对鱼类免疫系统的毒害作用主要是对非特异性免疫系统的毒害,其主要表现为抑制白细胞的数量、淋巴细胞的增殖、中性粒细胞的吞噬率、巨噬细胞的活性等。对北美黑鲶(*Ictalurus melas*)的体外和体内毒性实验均表明,当暴露的镉浓度大于2 μmol/L时,淋巴细胞的增殖明显受到抑制^[10]。朱星樽等^[11]研究显示高浓度镉溶液暴露会抑制黄颡鱼的肝脏溶菌酶、碱性磷酸酶和酸性磷酸酶的活性。另外,镉暴露会显著上调斑马鱼肝脏COX-2和iNOS的酶活和表达量^[12]。CdCl₂会诱导斑马鱼仔鱼体内的中性粒细胞大量增殖,且分泌的中性粒细胞会逐步向肝组织处的炎症部位聚集^[13]。

2.2 镉对鱼类生理代谢的影响

水相暴露时,污染物首先通过鳃进入体内,因此,水相镉暴露中,鳃最先受到污染^[14]。鳃作为鱼体的主要呼吸器官,同时也是酸碱平衡、体内排出含氮废物的通道,因此,维持鳃功能的正常结构及功能对满足鱼体正常的代谢活动至关重要。ATPase酶是细胞能量代谢中重要的酶,在鳃中发挥着重要的作用。而镉可以通过干扰鳃组织中ATPase酶等的活性来影响鱼体的气体交换、酸碱平衡、离子运输等过程,引发鱼体中毒。研究显示,镉能够改变ATPase活性,影响离子通道^[15]。水相镉暴露后,鱼类血液中的钙浓度降低,这可能是由于镉竞争性地与鳃上的钙离子

通道结合,从而对鱼类 Ca^{2+} -ATPase 产生抑制^[16-17], Zhao 等^[18] 研究证实了这一点。Romeo 等^[19] 在鲫鱼、欧洲海鲈 (*Dicentrarchus labrax*) 中发现,当水中镉浓度为 1 mg/L 时,能够抑制鳃上的 $\text{Na}^{+}/\text{K}^{+}$ -ATPase 的活性。De la Torre 等^[20] 研究表明,大量的自由基在镉的作用下,对 ATP 酶氨基酸产生氧化作用,破坏 ATP 酶结构,从而表现出镉对 ATPase 的抑制作用。镉对黄颡鱼鳃线粒体的影响研究显示,经 500 $\mu\text{g}/\text{L}$ 镉暴露后,黄颡鱼的鳃线粒体结构明显受损,血浆丙二醛 (MDA)、一磷酸腺苷 (AMP)、二磷酸腺苷 (ADP) 等含量显著高于对照组^[21]。综上,镉暴露能够影响生物体的渗透压和酸碱平衡、破坏血浆中的离子组成,这些都会导致鱼类的生理活动出现紊乱,从而引起更深度的镉中毒。

2.3 镉对鱼类生殖的影响

镉对鱼类生殖系统的影响主要通过影响生殖调控周来实现。一方面,镉能够影响内分泌激素的表达和分泌。镉可以抑制虹鳟雌激素受体 (Estrogen receptor, ER) 的表达^[22],进而影响 ER 参与的下游途径,引起卵子成熟阶段的卵黄生成过程出现紊乱,导致卵子不成熟,并最终引起生殖败育^[23]。研究证实,镉不仅可以对鱼类的生殖系统产生干扰^[24-26],还可以作为雌激素的相似物和雌激素受体结合^[27]。另外,马广智等^[28] 研究发现鲤鱼经镉暴露后,脑垂体的分泌活动异常。此外,镉会干扰体内 Ca^{2+} 的自稳态平衡,从而导致雌激素分泌紊乱,最终降低生殖能力。另一方面,镉还能通过抑制固醇类物质的合成影响鱼类血清中性激素的含量。Tilton 等^[23] 将日本青鳉 (*Oryzias latipes*) 暴露在 5 $\mu\text{g}/\text{L}$ 镉溶液中 7 周后,鱼体血清中雌二醇浓度显著降低,且其原因可能是由于肝脏和性腺细胞色素 P450 被抑制所致。

研究显示,镉胁迫会降低鲮鱼 (*Lymanaea stagnalis*) 和虹鳟 (*Poecilia reticulata*) 子代数量和存活率^[29-32]。Das 等^[33] 将 *Labeo bata* 在 4 mg/L 镉溶液中染毒后,卵巢和精巢腺指数 (gonad somatic index, GSI) 显著降低;类似地, Pereira 等^[34] 发现美洲拟蝶经 25 mg/L 镉溶液胁迫后, GSI 值也会显著降低。此外,镉还会损伤生殖细胞的发生和成熟。高浓度镉会降低食蚊鱼的精子活力和精子数量^[35]。

2.4 镉对鱼类胚胎和仔鱼的影响

水相镉暴露对鱼的胚胎有致畸威胁,对鱼苗有致死毒害作用^[36]。Barjhoux 等^[37] 研究表明,水体中镉浓度达到 25 $\mu\text{g}/\text{L}$ 时,会使得鱼的胚胎产生畸形突变

并死亡。在冯志桐等^[13] 对斑马鱼仔鱼的研究中,发现随着 CdCl_2 浓度的增加,仔鱼 56 h 死亡率、56 h 孵化抑制率等指标显著提高。镉污染对鱼的毒害作用主要发生在囊胚期^[36],但也有研究发现其毒害作用主要发生在胚后发育阶段^[38]。目前,普遍认为镉的毒性作用机制主要表现在影响动物机体组织的细胞分化以及器官原基的形成。Westernhagen 等^[39] 通过组织病理学切片观察到组织表皮细胞中的纤维排列不整齐,推测是因细胞受到压迫所致。

3 镉在鱼类体内的富集情况及累积风险

镉在生物体内的累积具有生物特异性和组织特异性的特点,即不同生物体中镉的累积情况不同,在同一生物体的不同组织器官中镉的累积量也不同。这主要取决于鱼类生物习性以及器官功能的差异性。镉的富集途径有两条:一是通过鳃将溶解状态的镉吸附到体内,这主要是由于鳃能够直接与水环境接触,具有较大的接触面积;另一种方式是通过食物中的镉被消化道吸收而富集。通过水相和食物相富集到鱼体内的镉能够经过血液循环而重新分配到不同的组织中去。镉在不同鱼类中的累积分布规律是杂食性 > 肉食性 > 草食性。经水相暴露后,镉在组织中的分布规律是肾脏 > 肝脏 > 肠 > 鳃 > 肌肉。经食物相暴露后,镉含量分布规律为肠 > 肾脏 > 肝脏 > 鳃 > 肌肉。

2012—2014 年对广西龙江 6 种食用鱼体内镉含量的调查显示,镉大量累积于调查鱼体的肾脏、肝脏、肠、鳃等组织中^[40],对鲤鱼、胡子鲶 (*Clarias batrachus*) 等的研究结果也类似^[41-42]。Thomas 等^[43] 研究显示虹鳟中超过 90% 的镉均累积于鳃、肾脏和肝脏这 3 个组织。2012 年舟山市市售 32 种海水鱼可食部分中镉的检出率为 100%^[44]。2009 年,珠江三角洲河网区鳊鱼条等 16 种鱼体中镉的检出超标率为 36.7%^[45]。2012 年覃东立等^[46] 对东北三省 9 个市 (县) 45 家鱼场中 3 种鱼 (鲤鱼、草鱼、鲫鱼) 共 177 个样品中的检测显示,镉在部分样品中超标,超标率为 1.1%。松花江的鱼类中也存在镉超标现象,且受重金属的综合污染程度较高^[47]。除天然环境及养殖环境中受到不同程度的镉污染之外,实验室重金属暴露实验显示,罗非鱼经水相和食物相分别暴露 30 d 和 60 d 后,镉不仅会大量累积于罗非鱼的肝脏、肾脏、肠、鳃和性腺等组织内,其亲本卵子中的镉含量也明显增高^[48]。

龚仕玲等^[29]的研究结果显示黄颡鱼暴露在低剂量的镉溶液中 8 周后, 鳃组织出现动脉瘤、细胞增生、鳃小片弯曲、细胞脱落等明显的病理学现象。安晶晶等^[49]研究表明, 低剂量的镉会干扰成年雄性斑马鱼的生殖内分泌。杨瑞瑞等^[50]对斑马鱼早期胚胎的镉胁迫影响发现, 急性镉暴露会使胚胎致畸, 对早期斑马鱼的胚胎发育有较强的毒性作用。Min 等^[51]对牙鲮(*Paralichthys olivaceus*) 的研究证实, 20 $\mu\text{g/L}$ 镉暴露会导致胚胎畸形率显著增加, 并伴随着卵黄囊异常和脊柱弯曲等症状。金春华等^[52]研究显示, 镉会对大弹涂鱼外周血细胞造成遗传损伤。

鱼类作为人类食物蛋白的主要来源之一, 其体内的镉最终经由食物链进入人体, 并对人体造成危害。镉在人体中主要累积在骨骼、肺、肝脏、肾脏和神经组织中, 代谢半衰期较长。研究显示, 低剂量的镉就会对人体产生巨大的毒害^[53]。镉对机体的毒害作用主要是导致肾脏损伤。“痛痛病”即是镉中毒导致的疾病, 该病状主要表现为神经痛、骨痛、四肢弯曲、骨质疏松等症状。慢性镉中毒患者可能会出现神经、免疫、生殖系统损害甚至诱发肿瘤。因此, 镉累积对人体产生的毒害不容忽视。

4 展望

镉的大量富集严重威胁着水产养殖业的健康可持续发展, 同时, 也极大地制约着我国食品加工业的发展。深入研究镉在鱼体内的分布和产生的毒害作用, 以及其可能对人体产生的毒害程度意义重大。但目前国内外研究主要集中在镉的急性致毒方面, 而且实验对象大多只集中在斑马鱼这种模式生物中, 就罗非鱼等食用鱼受镉污染后可能受到的危害研究较少。这不仅不利于实际养殖过程中镉污染问题的监测管理, 制约健康养殖; 同时, 由于研究对象单一、研究方法有限等制约因素, 也不利于全面认识镉的毒性作用及致毒机理, 极大地限制了针对性治理镉污染、修复镉损伤。因此, 建议广泛开展镉对可食性鱼类的毒理研究。

参考文献

- [1] SILVESTRA F, DIERIEK J F, DUMONT V, et al. Differential protein expression profiles in anterior gills of *Eriocheir sinensis* during acclimation to cadmium [J]. Aquatic Toxicology, 2006, 76(1): 46-58.
- [2] STOHS S J, BAGCHI D. Oxidative mechanisms in the toxicity of metal ions [J]. Free Radical Biology and Medicine, 1995, 18(2): 321-336.
- [3] 葛虹. 渔用配合饲料重金属的毒残危害及安全限量[J]. 渔业致富指南, 2004(7): 15-18.
- [4] 谢黎虹, 许梓荣. 重金属镉对动物及人类的毒性研究进展[J]. 浙江农业学报, 2003, 15(6): 376-381.
- [5] GARCIA-SANTOS S, FONTAÍNHAS-FERNANDES A, WILSON J M. Cadmium tolerance in the Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) following acute exposure: Assessment of some ionoregulatory parameters [J]. Environmental Toxicology, 2006, 21(1): 33-46.
- [6] ABEDI Z, KHALES I M, KOHESTAN ESKANDARI S, et al. Comparison of Lethal Concentrations (LC₅₀-96 H) of CdCl₂, CrCl₃, and Pb (NO₃)₂ in Common Carp (*Cyprinus carpio*) and Sutchi Catfish (*Pangasius hypophthalmus*) [J]. Iranian Journal of Toxicology, 2012, 6(18): 672-680.
- [7] BAIS U E, LOKHANDE M V E. Effect of cadmium chloride on the biochemical content in different tissues of the freshwater fish *Ophicephalus striatus* [J]. International Research Journal of Biological Sciences, 2012, 1(7): 55-57.
- [8] LATIF A, ALI M, KAOSER R, et al. Effect of cadmium chloride and ascorbic acid exposure on the vital organs of freshwater Cyprinid, *Labeo rohita* [J]. African Journal of Biotechnology, 2012, 11(33): 8398-8403.
- [9] 何玲玲, 陈正洪. 武汉市水环境重金属污染的监测[J]. 环境科学与技术, 2007, 30(5): 41-42, 94.
- [10] ALBERGONI V, VIOLA A. Effects of cadmium on catfish, *Ictalurus melas*, humoral immune response [J]. Fish & Shellfish Immunology, 1995, 5(2): 89-95.
- [11] 朱星樽, 黎明, 袁莉霞, 等. 镉胁迫对黄颡鱼幼鱼抗氧化酶活性及免疫应答的影响[J]. 浙江海洋学院学报: 自然科学版, 2016, 35(6): 478-482.
- [12] 蔡荣, 郭赛男, 郑家浪. Cd²⁺暴露对斑马鱼肝脏和卵巢抗氧化和免疫系统的影响及蓝 LED 光预暴露的保护作用[J]. 生态毒理学报, 2018, 13(1): 169-178.
- [13] 冯志桐, 赵爽, 潘炯, 等. 镉对转基因斑马鱼的急性毒性效应[J]. 天津理工大学学报, 2019, 35(2): 61-64.
- [14] SIMONIELLO P, FILOSA S, SCUDIERO R, et al. Cadmium impairment of reproduction in the female wall lizard *Podarcis sicula* [J]. Environmental Toxicology, 2013, 28(10): 553-562.
- [15] PRATAP H, BONGA S E W. Effect of ambient and dietary cadmium on pavement cells, chloride cells, and Na⁺/K⁺-ATPase activity in the gills of the freshwater teleost *Oreochromis mossambicus* at normal and high calcium levels in the ambient water [J]. Aquatic Toxicology, 1993, 26(1): 133-149.
- [16] PERFUS-BARBEOCH L, LEONHARDT N, VAVASSEUR A, et al. Heavy metal toxicity: Cadmium permeates through calcium channels and disturbs the plant water status [J]. The Plant Journal, 2002, 32(4): 539-548.

- [17] SHEN H-M, DONG S-Y, ONG C-N. Critical role of Calcium overloading in Cadmium-induced apoptosis in mouse thymocytes [J]. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 2001, 171(1): 12-19.
- [18] ZHAO S, SUN J, WANG X, et al. Effects of cadmium on calmodulin content and Ca^{2+} -ATPase activities of maize (*Zea mays*) seedling [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2008, 14(2): 264-271.
- [19] ROMÉO M, BENNANI N, GNASSIA-BARELLI M, et al. Cadmium and copper display different responses towards oxidative stress in the kidney of the sea bass *Dicentrarchus labrax* [J]. *Aquatic Toxicology*, 2000, 48(2/3): 185-194.
- [20] DE LA TORRE F, SALIBIAN A, FERRARI L. Biomarkers assessment in juvenile *Cyprinus carpio* exposed to waterborne cadmium [J]. *Environmental Pollution*, 2000, 109(2): 277-282.
- [21] 柏世军, 许梓荣. 镉对黄颡鱼鳃线粒体结构和能量代谢的影响[J]. *应用生态学报*, 2006, 17(7): 1213-1217.
- [22] GUÉVEL R L, PETIT F G, GOFF P L, et al. Inhibition of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) estrogen receptor activity by cadmium [J]. *Biology of Reproduction*, 2000, 63(1): 259-266.
- [23] TILTON S C, FORAN C M, BENSON W H. Effects of cadmium on the reproductive axis of Japanese medaka (*Oryzias latipes*) [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology*, 2003, 136(3): 265-276.
- [24] HENSON M C, CHEDRESE P J. Endocrine disruption by cadmium, a common environmental toxicant with paradoxical effects on reproduction [J]. *Experimental Biology and Medicine*, 2004, 229(5): 383-392.
- [25] NOVAIS S C, DE COEN W, AMORIM M J. Transcriptional responses in *Enchytraeus albidus* (Oligochaeta): Comparison between cadmium and zinc exposure and linkage to reproduction effects [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2012, 31(10): 2289-2299.
- [26] LIU H, PAN L, ZHENG D. Effects of salinity on biogenic amines, hemolymph osmotic pressure, and activity of Gill's Na^+/K^+ -ATPase in *Charybdis japonica* (Crustacea, Decapoda) [J]. *Journal of the World Aquaculture Society*, 2008, 39(6): 812-820.
- [27] STOICA A, KATZENELLENBOGEN B S, MARTIN M B. Activation of estrogen receptor- α by the heavy metal cadmium [J]. *Molecular Endocrinology*, 2000, 14(4): 545-553.
- [28] 马广智, 林浩然, 张为民. Cd^{2+} 对离体的鲤鱼脑垂体分泌促性腺激素的影响[J]. *动物学研究*, 1995, 16(3): 255-261.
- [29] 龚仕玲, 谢冬梅, 李英文, 等. 镉暴露诱导黄颡鱼鳃的组织学损伤、氧化应激和免疫反应[J]. *水生生物学报*, 2019, 43(2): 340-347.
- [30] SZÜCS A, SALÁNKI J, RÓZSA K S. Effects of chronic exposure to cadmium- or lead-enriched environments on ionic currents of identified neurons in *Lymnaea stagnalis* L. [J]. *Cellular and Molecular Neurobiology*, 1994, 14(6): 769-780.
- [31] SZEBEDINSZKY C, MCGEER J C, MCDONALD D G, et al. Effects of chronic Cd exposure via the diet or water on internal organ-specific distribution and subsequent gill Cd uptake kinetics in juvenile rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2001, 20(3): 597-607.
- [32] CHOUBA L, KRAIEM M, NJIMI W, et al. Seasonal variation of heavy metals (Cd, Pb and Hg) in sediments and in mullet, *Mugil cephalus* (Mugilidae), from the Ghar El Melh Lagoon (Tunisia) [J]. *Transitional Waters Bulletin*, 2007, 1(4): 45-52.
- [33] DAS R. Cadmium toxicity to gonads in a freshwater fish, *Labeo bata* (Hamilton) [J]. *Archiv Für Hydrobiologie*, 1988, 112(3): 467-474.
- [34] PEREIRA J, MERCALDO-ALLEN R, KUROPAT C, et al. Effects of cadmium accumulation on serum vitellogenin levels and hepatosomatic indices of winter flounder (*Pleuronectes americanus*) [J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 1993, 24(4): 427-431.
- [35] MILIOU H, ZABOUKAX N, MORAITOU-APOSTOLOPOULOU M. Biochemical composition, growth, and survival of the guppy, *Poecilia reticulata*, during chronic sublethal exposure to cadmium [J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 1998, 35(1): 58-63.
- [36] THOMPSON J, BANNIGAN J. Cadmium: Toxic effects on the reproductive system and the embryo [J]. *Reproductive Toxicology*, 2008, 25(3): 304-315.
- [37] BARJHOUX I, BAUDRIMONT M, MORIN B, et al. Effects of copper and cadmium spiked-sediments on embryonic development of Japanese medaka (*Oryzias latipes*) [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2012, 79: 272-282.
- [38] HALLARE A, SCHIRLING M, LUCKENBACH T, et al. Combined effects of temperature and cadmium on developmental parameters and biomarker responses in zebrafish (*Danio rerio*) embryos [J]. *Journal of Thermal Biology*, 2005, 30(1): 7-17.
- [39] WESTERNHAGEN H V, DETHLEFSEN V, ROSENTHAL H. Correlation between cadmium concentration in the water and tissue residue levels in dab, *Limanda limanda* L. and plaice, *Pleuronectes platessa* L. [J]. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 1980, 60(1): 45-48.
- [40] 王俊能, 赵学敏, 胡国成, 等. 广西龙江鱼类镉含量分布特征及生物积累特性分析[J]. *环境科学*, 2019, 1(40): 488-495.

- [41] DE SMET H, BLUST R. Stress responses and changes in protein metabolism in carp *Cyprinus carpio* during cadmium exposure [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2001, 48(3): 255-262.
- [42] 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.
- [43] THOMAS D G, CRYER A, JOHN F, et al. A comparison of the accumulation and protein binding of environmental cadmium in the gills, kidney and liver of rainbow trout (*Salmo gairdneri richardson*) [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Comparative Pharmacology*, 1983, 76(2): 241-246.
- [44] 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*, 2013, 23(11): 2526-2527, 2531.
- [45] 谢文平, 陈昆慈, 朱新平, 等. 珠江三角洲河网区水体及鱼体内重金属含量分析与评价[J]. *农业环境科学学报*, 2010, 29(10): 1917-1923.
- [46] 覃东立, 汤施展, 白淑艳, 等. 东北地区鲤、鲫、草鱼肌肉中重金属含量评价[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(2): 264-270.
- [47] 祝惠, 阎百兴, 张凤英. 松花江鱼体中重金属的富集及污染评价[J]. *生态与农村环境学报*, 2010, 26(5): 492-496.
- [48] 罗永巨. 镉对吉富罗非鱼毒性效应及繁殖力影响的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2015.
- [49] 安晶晶, 谢冬梅, 李英文, 等. 低剂量镉暴露对雄性斑马鱼生殖内分泌的干扰[J]. *重庆师范大学学报: 自然科学版*, 2019, 36(2): 24-29.
- [50] 杨瑞瑞, 王兰, 孙敏, 等. 急性镉暴露对斑马鱼早期胚胎发育的毒性效应[J]. *山西农业科学*, 2019, 47(3): 351-356.
- [51] MIN E Y. Effects of cadmium on embryo hatchability, larval development and survival of the olive flounder, *Paralichthys olivaceus* [J]. *Journal of Fish Pathology*, 2013, 26(1): 11-17.
- [52] 金春华, 李明云, 刘伟成, 等. 镉胁迫对大弹涂鱼 (*Boleophthalmus pectinirostris*) 血细胞遗传损伤研究[J]. *海洋与湖沼*, 2010, 41(1): 80-84.
- [53] 史慧勤, 张利军, 苑晓燕, 等. 氯化镉暴露对斑马鱼幼鱼神经行为毒性作用[J]. *生态毒理学报*, 2013, 8(3): 374-380.

A Review of the Effects of Cadmium on Aquaculture

WANG Zhifang¹, XIAO Jun^{1,2,3}, LUO Yongju^{1,2}

(1. Guangxi Key Laboratory of Aquatic Genetic Breeding and Healthy Breeding, Guangxi Academy of Fishery Science, Nanning, Guangxi, 530021, China; 2. Shanghai Ocean University, Shanghai, 201306, China; 3. Guangxi Key Laboratory for Marine Biotechnology, Beihai, Guangxi, 536000, China)

Abstract: Cadmium is one of the main heavy metal pollutants in the environment, and its accumulation in the body can cause serious toxicity to various organs of the body. At present, the problem of cadmium pollution in China's aquaculture industry has been very serious. The phenomenon of cadmium residues in aquatic animals is abundant, which not only seriously affects the quality and safety of aquaculture products in China, but greatly restricts the healthy and green development of China's aquaculture industry. Meanwhile, cadmium present in the body of aquatic animals will enter the human body through the food chain which will seriously endanger human health. The gradual improvement of modern testing technology provides conditions for studying the impact of cadmium on aquaculture. This paper mainly uses fish as the representative organism, summarizes the cumulative distribution of cadmium in aquatic animals, and discusses the hazards of cadmium residual, aiming to better respond to the policy of "purifying quality and increasing efficiency" of China's aquatic products. At the same time, it can also provide references for further promoting the healthy development of China's aquaculture industry.

Key words: aquatic animals, healthy farming, heavy metals, cadmium, detection methods, risk assessment

责任编辑: 米慧芝