

蟒塘溪水库养殖刺鲃体内重金属富集特征 及食用安全评价

程小飞^{1,2}, 姜海峰³, 高金伟¹, 洪波¹, 刘伶俐¹, 伍远安^{1,2}, 李成^{1,2}, 李鸿¹, 汤海滨⁴

(1. 湖南省水产科学研究所, 湖南长沙 410153) (2. 水产高效健康生产湖南省协同创新中心, 湖南常德 415000)

(3. 中国水产科学研究院黑龙江水产研究所, 黑龙江哈尔滨 150070) (4. 澧县农业局, 湖南澧县 415500)

摘要: 为研究芷江蟒塘溪水库养殖刺鲃(*Spinibarbus caldwelli*)不同组织的重金属污染状况及食用安全性, 采用原子吸收分光光度法测定刺鲃肌肉、鳃丝、鳍、鳞片、鱼皮、膘、肠、肾脏、脾脏、肝胰脏、脂肪、脑中的Pb、Cd、Cu、Zn 4种重金属含量。结果显示, Pb在肝胰脏中高达2.90 mg/kg, 其他组织均低于0.5 mg/kg; Cd在肾脏、肝胰脏、肠、脾脏、鳃丝中含量较高, 分别为3.54 mg/kg、2.34 mg/kg、1.71 mg/kg、1.40 mg/kg、0.61 mg/kg, 其他组织均低于0.1 mg/kg; Cu在各组织中的含量均不超过50 mg/kg; Zn含量明显高于其他3种重金属含量, 且鳍中Zn(254.2605 mg/kg)含量最高。刺鲃不同组织均值污染指数(PI)依次为: 肾脏>肝胰脏>肠>脾脏>鳃丝>鳍>脑>鱼皮>鳞片>脂肪>肌肉>膘。日消费限量(CR_{Lim})和目标危险系数(THQ)分析结果表明, 食用芷江蟒塘溪水库刺鲃肌肉, 不会对消费者健康产生潜在危害。

关键词: 蟒塘溪水库; 刺鲃; 重金属; 富集特征; 污染评价; 食品安全

文章篇号: 1673-9078(2019)08-287-293

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2019.8.040

Accumulation Characteristics and Safety Evaluation of Heavy Metal in

Spinibarbus caldwelli Cultured in Mengtangxi Reservoir

CHENG Xiao-fei^{1,2}, JIANG Hai-feng³, GAO Jin-wei¹, HONG Bo¹, LIU Ling-li¹, WU Yuan-an^{1,2}, LI Cheng^{1,2},
LI Hong¹, TANG Hai-bin⁴

(1. Fisheries Institute Science of Hunan Province, Changsha 410153, China) (2. Collaborative Innovation Center for Efficient and Health Production of Fisheries in Hunan Province, Changde 415000, China)

(3. Heilongjiang River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Harbin 150070, China)

(4. Agricultural Bureau in Li County, Li County 415500, China)

Abstract: In order to investigate the current status of heavy metal pollution and food safety in different tissues and organs of *Spinibarbus caldwelli* farmed in Mengtangxi reservoir in Hunan province, atomic absorption spectrophotometry (AAS) was used to determine the contents of Pb, Cd, Cu, and Zn in the muscle, gill, fin, scales, skin, swim bladder, intestines, kidney, spleen, hepatopancreas, fat and brain of *S. caldwelli*. The results indicated that the content of Pb (2.90 mg/kg) was the highest in *S. caldwelli* hepatopancreas, which was less than 0.5 mg/kg in the other tissues or organs. The content of Cd was the highest in *S. caldwelli* kidney (3.54 mg/kg), followed by hepatopancreas (2.34 mg/kg), intestine (1.71 mg/kg), spleen (1.40 mg/kg) and gill (0.61 mg/kg), which was less than 0.1 mg/kg in the other tissues or organs. The content of Cu was less than 50 mg/kg in all the tissues and organs of *S. caldwelli*. The comprehensive pollution index (PI) of different tissues and organs of *S. caldwelli* were ranked as: kidney>hepatopancreas>intestines>spleen>gill>fin>brain>skin>scales>fat>muscle>swim bladder. Based on the maximum allowable consumption rate (CR_{Lim}) and target hazard quotients (THQ), the heavy metals in muscle of *S. caldwelli* farmed in Mengtangxi reservoir have no potential risk for consumers.

Key words: mengtangxi reservoir; *Spinibarbus caldwelli*; heavy metals; accumulation characteristics; pollution evaluation; food safety

收稿日期: 2019-03-25

基金项目: 湖南省重点科学基金项目(2013NK2007); 湖南省科技重大专项(2017NK1030)

作者简介: 程小飞(1986-), 男, 助理研究员, 硕士, 研究方向: 水产动物营养与饲料科学

通讯作者: 李成(1969-), 男, 副研究员, 本科, 研究方向: 特种水产养殖研究; 共同通讯作者: 李鸿(1982-), 男, 博士, 副研究员, 研究方向: 鱼类生态学

沅水流域在湖南境内,主要流经怀化市、湘西自治州以及常德市的桃源、鼎城和武陵,在常德的德山注入洞庭湖,全长 1033 km,流域面积为 89163 km²,是湖南省境内的第二大河流^[1]。近年来随着社会经济的发展,工、农业废水及生活污水大量排放,对沅水流域水环境造成一定程度的破坏;此外湖南是有色金属大省,境内矿产资源丰富,由于不当开采利用及雨水冲刷,导致大量重金属随水土流失,对沅水流域水环境重金属污染进一步加剧。水体和底泥中的重金属可通过生物富集作用蓄积在水生生物的不同组织和器官中,而鱼类通过腮的呼吸、皮肤的渗透及摄食被重金属污染的水生动植物等方式使重金属在其体内会进一步富集,这不但对鱼类的生长发育产生负面影响,而且对消费者也存在一定的安全隐患^[2]。如,铅(Pb)、镉(Cd)、铜(Cu)和锌(Zn)是常见的重金属污染物,其中 Pb 和 Cd 不但对鱼类等水生生物没有任何益处,且其均存在蓄积性和毒性^[3],而 Cu 和 Zn 虽然是生物体必需的营养元素之一,但当其达到一定浓度时也会对水生生物产生毒害作用^[4,5]。同样对于消费者,Pb、Cd 属于毒性较大的元素,长期摄入也会危害人体健康^[6],现已列为我国无公害水产品检测中的必测项目,而 Cu、Zn 为生命必需元素,维持正常生命活动,但浓度超过一定阈值也会对人体造成危害^[7]。目前关于我国江河、湖泊及水库等自然水域中水产品体内重金属富集及安全性评价方面的研究,主要集中在洞庭湖^[8,9]、鄱阳湖^[10]、太湖^[11]、淮河^[12]、三峡水库^[13,14]等水域,但关于沅水流域水产品体内重金属富集特征及安全性评价方面的研究却鲜有报道。

芷江蟒塘溪水库,是属于沅水一级支流,位于湖南省怀化市芷江侗族自治县境内,距芷江县城 7 km,怀化市 45 km。该水库于 2001 年 4 月建成,主要用于发电站发电,设计正常蓄水位 281 m,水库面积 11 km²,总库容 1.53 亿 m³。刺鲃(*Spinibarbus caldwelli*)是该水库主要养殖鱼类品种之一。通过对芷江蟒塘溪水库网箱养殖刺鲃体内 Pb、Cd、Cu 和 Zn 4 种重金属含量的测定及分析,探讨了刺鲃不同组织器官中重金属的分布特征,并对其不同组织器官中重金属的污染状况和肌肉的食用安全性进行评价,以期对蟒塘溪水库乃至沅水流域怀化段的水产品质量安全提供参考资料。

1 材料与方法

1.1 样品采集与处理

刺鲃样品于 2014 年 10 月,采自湖南省怀化市芷

江蟒塘溪水库大坝附近某网箱养殖基地。5 尾,平均体重(1319.4±67.2) g,平均体长(47.5±2.5) cm。刺鲃样品带回实验室,用双蒸水清洗,滤纸吸干,用解剖刀和解剖剪分别取其鳍条、鳞片、皮、肌肉、肝胰脏、脾脏、肠、脂肪、鳔、肾脏、鳃和脑 12 种组织器官。

1.2 试剂与仪器

盐酸、硝酸、硫酸、氢氟酸、高氯酸、磷酸铵和磷酸氢二铵为优级纯,厂家均是天津科密欧化学试剂有限公司;铅、镉、铜和锌标准溶液(1000 μg/mL),购于中国计量科学研究院;试验用水均为双蒸水。

美国赛默飞世尔公司 M 系列 iCE3500 型原子吸收光谱仪;美国 CEM 公司 Mars Xpress 型微波消解仪;北京市永光明医疗仪器厂可调式恒温电加热板。

1.3 测定方法

采用原子吸收分光光度计测定 4 种重金属,分别按照 GB 5009.12-2010《食品安全国家标准 食品中铅的测定》、GB 5009.15-2014《食品安全国家标准 食品中镉的测定》、GB/T 5009.13-2003《食品安全国家标准 食品中铜的测定》、GB/T 5009.14-2003《食品安全国家标准 食品中锌的测定》中的方法检测刺鲃样品中铅、镉、铜和锌的含量。

分别称取 2.0 g 肌肉和鱼皮(内脏 0.3 g-0.5 g)的样品于微波消解罐中,加入 5 mL 硝酸盖塞浸泡过夜,次日添加 2 mL 过氧化氢,放入微波消解仪中处理,消解完成并冷却后将样品转移至 25 mL 比色管中,再用 5%的硝酸分次冲洗消解管,洗液并入比色管,最后用 5%的硝酸将比色管定容至刻度,待上机测定。

1.4 重金属污染风险评价

评价方法^[11]:采用单因子污染指数法和均值型污染指数法评价芷江蟒塘溪水库网箱养殖刺鲃不同组织和器官重金属污染状况,采用污染负荷比评价主要污染因子。

单因子污染指数法^[11],用于评价某一重金属元素的单一污染程度,公式如下:

$$P_i = \frac{C_i}{S_i} \quad (1)$$

式中: P_i 为单因子污染指数; C_i 为生物体内污染物的实测平均含量(mg/kg); S_i 为某种污染物的评价标准值(mg/kg)。

评价标准值参照《食品中污染物限量》(GB 2762-2017)^[15]、《水产品中有毒有害物质限量》(NY 5073-2006)^[16]、《食品中锌限量卫生标准》(GB 13106-1991)^[17],其中鱼类重金属 Pb、Cd、Cu、Zn 的标准限值分

别为 0.5、0.1、50、50 mg/kg。

均值型污染指数法^[18]用于评价样品中重金属的污染程度,本质是各项单因子污染指数的平均值,其计算公式如下:

$$PI = \sum \frac{P_i}{n} \quad (2)$$

式中: PI 为均值型污染指数; P_i 为单因子污染指数; n 为所测重金属种类数。

根据均值型污染指数法的计算结果将重金属污染程度分为 6 个等级^[19],即未污染级别($PI < 0.1$)、微污染级别($0.1 \leq PI < 0.2$)、轻污染级别($0.2 < PI \leq 0.5$)、中污染级别($0.5 < PI \leq 0.7$)、重污染级别($0.7 < PI \leq 1.0$)、严重污染级别($PI > 1.0$)。

污染负荷比可用于说明主要污染因子,其计算公式如下^[20]:

$$L = \frac{P_i}{\sum P_i} \quad (3)$$

式中: L 为污染物负荷比; P_i 为单因子污染指数。

1.5 重金属健康风险评估

1.5.1 日消费限量法

日消费限量,结果可以反映被重金属污染的水产品的最大允许日消费量,即每天刺鲃的消费限量,在这个消费限量范围内不存在健康风险,其计算公式如下^[14,21]:

$$CR_{Lim} = \frac{RFD \times BW}{C_m} \quad (4)$$

式中: CR_{Lim} 为最大允许消费量, kg/d; RFD 为口服参考剂量。参照 USEPA 标准: Pb 为 4×10^{-3} mg/(kg·d), Cd 为 1×10^{-3} mg/(kg·d), Cu 为 4×10^{-2} mg/(kg·d), Zn 为 0.3 mg/(kg·d)^[13,22]; BW 为消费者平均体重, kg, 参照 2014 年国民体质监测公报^[14,23] (取男女体重的平均值, 见表 4); C_m 为刺鲃肌肉中重金属的含量, mg/kg。

1.5.2 目标危险系数法

采样目标危险系数(THQ)^[10]评价消费者通过芷江蟒塘溪水库网箱养殖刺鲃摄取重金属的风险。公式如下(5):

$$THQ = \frac{EF \times ED \times FIR \times C_m \times 10^{-3}}{RFD \times BW \times TA} \quad (5)$$

式中: EF 为暴露频率(365 d/年); ED 为暴露年限, 约等同于人均寿命, 根据 2015 年国民经济和社会发展统计公报^[24], 取值 76; FIR 为日均鱼肉消费量, 根据 2016 年中国居民膳食指南我国居民人均每天水产品摄入量 40~75 g^[25], 取平均值 57.5 g/(d·人); C_m 为鱼中重金属含量(mg/kg); RFD 为口服参考剂量(mg/kg·d); BW 为平均体重, 根据《中国居民营养与慢性病状

况报告(2015)》^[26], 取男女平均体重 61.75 kg; TA 为非致癌源的平均暴露时间(365·d/年×ED)。

若 $THQ < 1$ 则认定暴露人群无明显食用风险, 若 $THQ \geq 1$ 时则认为存在食用风险。重金属的总危害商数($TTHQ$)为各种重金属的危害商数之和。

1.6 数据处理

采用 Excel 2007 对实验数据进行处理。

2 结果与分析

2.1 同一重金属在刺鲃不同组织中的富集特征

Pb 、 Cd 、 Cu 、 Zn 这 4 种重金属的在刺鲃肌肉、鳃丝、鳍、鳞片、鱼皮、鳔、肠、肾脏、脾脏、肝胰脏、脂肪、脑 12 种组织中的测定结果见表 1。在水库网箱人工养殖条件下,同一种重金属在刺鲃不同组织中的含量各不相同。 Pb 的组织分布规律为肝胰脏>鳞片>肌肉>脂肪>肾脏>鱼皮>脾脏>鳍>鳃丝>鳔>肠>脑, 含量为 0.01 mg/kg~2.90 mg/kg。 Cd 的组织分布规律为肾脏>肝胰脏>肠>脾脏>鳃丝>脑>鳍>脂肪>鳞片>鳔>鱼皮>肌肉, 含量为 0.0035 mg/kg~3.54 mg/kg。 Cu 的组织分布规律为肝胰脏>肠>鳍>脾脏>鳃丝>脑>肾脏>鳞片>鱼皮>肌肉>脂肪>鳔, 含量为 0.15 mg/kg~14.37 mg/kg, 这与 Cu 在淮河鳊鱼体的分布规律基本相同^[12]。4 种重金属中, Zn 的含量最高为 2.50 mg/kg~254.26 mg/kg, 这与涂宗财^[10]的研究结果一致, Zn 的组织分布规律为鳍>鱼皮>鳃丝>鳞片>肝胰脏>脾脏>肾脏>肠>肌肉>鳔>脑>脂肪。

Pb 含量在刺鲃肝胰脏中最高, 为 2.90 mg/kg, 是国家《食品中污染物限量》(GB 2762-2017)^[15]标准的 5.8 倍, 也是 12 种组织中唯一 Pb 超标的组织, 而肌肉、鱼皮、鳔等其他 11 种组织中均未超过 0.5 mg/kg; Cd 含量在刺鲃肾脏、肝胰脏、肠、脾脏和鳃丝 5 种组织中超过 0.1 mg/kg 的国家《食品中污染物限量》(GB 2762-2017)^[15]标准, 而脑、鳍、脂肪、鳞片、鳔、鱼皮和肌肉 7 种组织中均未超过 0.1 mg/kg, 这与鳊在芙蓉鲤体内的富集规律基本相同^[27], 即 Cd 在非可食组织中的含量高于可食组织中的含量。分析原因, 导致 Pb 、 Cd 在肝胰脏和肾脏中大量蓄积, 可能与肝的解毒作用和肾的排泄作用相关, 使刺鲃组织内可诱导产生大量束缚重金属的金属硫蛋白, 使肝、肾成为鱼体内蓄积重金属的主要靶器官^[28-29]。 Cu 含量在 12 种不同组织中均未超过行业限定标准(50 mg/kg), 这与肖

明松等^[12]对淮河蚌埠段鳊鱼的研究结果一致; Zn 在鱼鳍中的含量最高为 254.26 mg/kg, 分别是肌肉和鱼皮中 Zn 含量的 22.9 和 3.9 倍, 关于 GB 13106-1991《食品中锌限量卫生标准》, 我国已于 2011-01-10 废止, 目前暂无国家或行业标准对食品中锌有限量标准。综上, 4 种重金属中, Pb 和 Cd 在刺鲃内脏中, 尤其是肝胰脏中严重超标, 但食用部分(如肌肉、鱼皮、鱼鳃等)均未超标, 而 Cu 和 Zn 基本符合无公害水产品的要求。

表 1 重金属在刺鲃不同组织中的分布(mg/kg, 鲜样)

Table 1 The distribution of heavy metals in different tissues of *Spinbarbus caldwelli* (mg/kg, wet weight)

刺鲃组织	Pb	Cd	Cu	Zn
肌肉	0.44	0.00	0.22	11.10
鳃丝	0.17	0.61	0.77	34.80
鳍	0.33	0.10	0.87	254.26
鳞片	0.45	0.05	0.39	32.96
鱼皮	0.40	0.03	0.24	64.62
膘	0.08	0.03	0.15	9.92
肠	0.03	1.71	1.29	17.87
肾脏	0.43	3.54	0.61	18.65
脾脏	0.35	1.40	0.87	24.12
肝胰脏	2.90	2.34	14.37	25.44
脂肪	0.43	0.06	0.21	2.50
脑	0.01	0.49	0.62	8.72
国家食品卫生标准限量(mg/kg) ^a	0.50	0.10	50	-

注: ^a《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762-2017)中规定鱼类可食部分 Pb、Cd 的限量分别为 0.5 mg/kg、0.1 mg/kg;《无公害食品 水产品中有毒有害物质限量》(NY 5073-2006)中规定鱼类 Pb、Cd、Cu 的限量分别为≤0.5 mg/kg、≤0.1 mg/kg、≤50 mg/kg;“-”表示(Zn 元素)无现行国家标准或行业标准。另, 刺鲃肌肉中 Cd 含量 0.00, 未达到检测限值, 而是 0.0035 保留两位有效数字的结果, 下表同。

2.2 刺鲃同一组织中不同重金属的富集特征

刺鲃肌肉、鳃丝、鳍、鳞片、鱼皮、膘、肠、肾脏、脾脏、肝胰脏、脂肪和脑 12 种组织中 Pb、Cd、Cu、Zn 的测定结果见表 1。4 种重金属在刺鲃肌肉中含量为 Zn>Pb>Cu>Cd, 含量在 0.0035 mg/kg~11.10 mg/kg 之间, 均在国家现行标准范围之内, 未发生重金属污染, 这与三峡水库鲤肌肉中重金属含量 Zn>Cu>Pb>Cd 基本类似^[13,14], 而本研究肌肉中 Pb 的含量高于 Cu 的含量, 可能与水体环境中 Pb 的背景值差异及 Pb 具有较高的生物累积现象相关^[13]; 4 种重

金属在鳃丝中含量为 Zn>Cu>Cd>Pb, 含量在 0.17 mg/kg~34.80 mg/kg 之间; 4 种重金属在鳍中含量为 Zn>Cu>Pb>Cd, 含量在 0.10 mg/kg~254.26 mg/kg 之间; 4 种重金属在鳞片中含量为 Zn>Pb>Cu>Cd, 含量在 0.05 mg/kg~32.96 mg/kg 之间; 4 种重金属在鱼皮中含量为 Zn>Pb>Cu>Cd, 含量在 0.03 mg/kg~64.62 mg/kg 之间; 4 种重金属在膘中含量为 Zn>Cu>Pb>Cd, 含量在 0.03 mg/kg~9.92 mg/kg 之间; 4 种重金属在肠中含量为 Zn>Cd>Cu>Pb, 含量在 0.03 mg/kg~17.87 mg/kg 之间; 4 种重金属在肾脏中含量为 Zn>Cd>Cu>Pb, 含量在 0.43 mg/kg~18.65 mg/kg 之间; 4 种重金属在脾脏中含量为 Zn>Cd>Cu>Pb, 含量在 0.35 mg/kg~24.12 mg/kg 之间; 4 种重金属在肝胰脏中含量为 Zn>Cu>Pb>Cd, 含量在 2.34 mg/kg~25.44 mg/kg 之间; 4 种重金属在脂肪中含量为 Zn>Pb>Cu>Cd, 含量在 0.06 mg/kg~2.50 mg/kg 之间; 4 种重金属在脑中含量为 Zn>Cu>Cd>Pb, 含量在 0.01 mg/kg~8.72 mg/kg 之间。刺鲃同一组织中重金属含量差异较大, 4 种重金属中, Zn 含量高于其他三种元素, 这与对东苕溪鲫鱼^[19]、太湖水产品(刀额新对虾、鲫鱼、黄颡鱼、黄鳝)^[11]、鄱阳湖水产品(鲤、鳊、鲢、草鱼、青鱼、鳊)^[10]、淮河鳊鱼^[12]等的研究结果一致, 原因可能是 Zn 为生命体的必需微量元素, 更容易被水生动植物主动吸收^[30]。其它三种重金属在不同组织间的富集各不同, Cd 和 Cu 主要蓄积在肝胰脏、肾脏、脾脏、肠等内脏组织中, 而 Pb 仅在肝胰脏中富集较高, 他们在肌肉、鱼皮、鱼鳃等组织中的含量较低。

2.3 刺鲃不同组织中的重金属污染程度评价

4 种重金属在刺鲃 12 种组织中的污染评价结果如表 2 所示。单因子污染指数结果表明, Pb 仅在肝胰脏中存在污染, 污染指数为 5.81; Cd 在肾脏、肝胰脏、肠、脾脏、鳃丝、脑中均超标, 污染指数分别为 35.44、23.43、17.05、13.96、6.08、4.92; Cu 在 12 种组织中均未超标; Zn 仅在鳍和鱼皮少量超标, 污染指数分别为 5.09 和 1.29(GB 13106-1991《食品中锌限量卫生标准》已废弃, 这里仅作参考)。因此刺鲃 12 种组织中肝胰脏是主要受污染组织, 鱼皮是受污染最小组织(污染物为 Zn), 其次是鳍(污染物为 Zn)而肌肉、鱼鳃、脂肪、鳞片是未受污染组织; 4 种重金属中 Cd 对刺鲃的污染强度最大, 而 Cu 不对刺鲃造成污染。本研究肌肉中重金属单因子污染指数均未超标, 这与对太湖人工养殖水产品(刀额对虾、鲫鱼、黄颡鱼、黄鳝)的研究结果一致^[11]。

表2 刺鲃不同组织中的重金属污染指数(P_i)

Table 2 Contamination indices of heavy metals in different tissues of *Spinbarbus caldwelli* (P_i)

刺鲃组织	均值型污染指数 PI	单因子污染指数 P_i			
		Pb	Cd	Cu	Zn
肌肉	0.28	0.88	0.04	0.00	0.22
鳃丝	1.78	0.33	6.08*	0.02	0.70
鳍	1.68	0.66	0.97	0.02	5.09*
鳞片	0.51	0.89	0.46	0.01	0.66
鱼皮	0.60	0.81	0.28	0.00	1.29*
膘	0.17	0.16	0.33	0.00	0.20
肠	4.38	0.07	17.05*	0.03	0.36
肾脏	9.17	0.85	35.44*	0.01	0.37
脾脏	3.79	0.70	13.96*	0.02	0.48
肝胰脏	7.51	5.81*	23.43*	0.29	0.51
脂肪	0.38	0.86	0.59	0.00	0.05
脑	1.28	0.02	4.92*	0.01	0.17

注: *超过标准限量; P_i 的数值是按照表1中原始数据(4位有效数字)由公式1计算得出(2位有效数字)。

表3 刺鲃不同组织中的重金属污染负荷比结果

Table 3 Loading ratios of heavy metals in different tissues of *Spinbarbus caldwelli* (P_i)

刺鲃组织	污染负荷比 L			
	Pb	Cd	Cu	Zn
肌肉	0.77	0.03	0.00	0.19
鳃丝	0.05	0.85	0.00	0.10
鳍	0.10	0.14	0.00	0.75
鳞片	0.44	0.23	0.00	0.33
鱼皮	0.34	0.12	0.00	0.54
膘	0.23	0.48	0.00	0.29
肠	0.00	0.97	0.00	0.02
肾脏	0.02	0.97	0.00	0.01
脾脏	0.05	0.92	0.00	0.03
肝胰脏	0.19	0.78	0.01	0.02
脂肪	0.57	0.39	0.00	0.03
脑	0.00	0.96	0.00	0.03

均值污染指数结果表明, 刺鲃的肾脏、肝胰脏、肠、脾脏、鳃丝、鳍和脑7种组织的重金属污染水平属于严重污染级别; 鳞片和鱼皮属于中污染级别; 肌肉和脂肪属于轻污染级别; 膘属于微污染级别。

表3可知, 刺鲃肌肉、脂肪和鳞片的重金属元素污染负荷比中, Pb贡献值最大; 鳍和鱼皮重金属元素污染负荷比中, Zn贡献值最大; 肠、脑、肾脏、脾脏、鳃丝等组织的重金属元素污染负荷比中, Cd贡献值最大。说明内脏器官组织的主要污染因子是Cd, Cd是

对人体有害的重金属, 因此在消费刺鲃时应禁止摄入内脏部分; 而肌肉、脂肪、鱼皮和鱼鳍等组织中主要污染因子是Pb和Zn, 这与太湖水产品肌肉中的主要污染因子一致^[11], 其中Pb的长期低水平接触可能造成各种亚临床损害^[31], 而Zn虽作为微量元素, 一定量的摄入是对人体有益的, 但过量的摄入会降低免疫功能、代谢紊乱、缺铁性贫血等。

2.4 刺鲃肌肉食用安全性评价

表4 刺鲃最大允许日消费量

Table 4 Maximum allowable daily consumption of *Spinbarbus caldwelli* (kg/d)

年龄/岁	平均体重/kg	最大允许日消费量			
		Pb	Cd	Cu	Zn
5~9	23.35	0.21	6.67	4.34	0.63
10~14	41.63	0.38	11.89	7.74	1.12
15~19	55.94	0.51	15.98	10.40	1.51
20~24	60.5	0.55	17.29	11.24	1.63
25~29	62.85	0.57	17.96	11.68	1.70
30~34	64.1	0.58	18.31	11.91	1.73
35~39	64.65	0.59	18.47	12.02	1.75
40~44	65.1	0.59	18.60	12.10	1.76
45~49	65.45	0.60	18.70	12.16	1.77
50~54	65.5	0.60	18.71	12.17	1.77
55~59	64.4	0.59	18.40	11.97	1.74

表5 蟒塘水库刺鲃肌肉中重金属健康风险评估

Table 5 Health risk assessment of heavy metals in muscle of *Spinbarbus caldwelli* from Mengtangxi reservoir

重金属	含量/(mg/kg)	RFD/(mg/kg·d)	THQ	是否存在健康风险
Pb	0.44	4×10^{-3}	0.10	否
Cd	0.00	1×10^{-3}	0.00	否
Cu	0.22	4×10^{-2}	0.01	否
Zn	11.10	0.3	0.03	否
TTHQ			0.14	否

刺鲃肌肉中Pb、Cd、Cu、Zn含量见表1, 根据公式(3)计算出5~60岁消费者刺鲃的 CR_{Lim} , 结果如表4所示。芷江蟒塘水库刺鲃肌肉Pb、Cd、Cu、Zn的 CR_{Lim} 分别为0.21~0.60 kg/d、6.67~18.71 kg/d、4.34~12.17 kg/d、0.63~1.77 kg/d。根据世界粮食及农业组织2016年发布的《世界渔业和水产养殖状况》^[32], 2015年世界人均表观鱼品消费量为54.8 g/d, 而根据2016年《中国居民膳食指南》我国居民人均每天水产品摄入量40~75 g^[25], 根据《中国人群暴露参数手册》^[33], 我国人均鱼肉的日消费量为23 g/d, 均低于最大

允许日消费量,说明食用芷江蟒塘溪水库刺鲃肌肉不存在健康风险。

THQ 的数值大小与鱼肉中存在的健康风险成正比,芷江居民通过摄入蟒塘溪水库刺鲃暴露重金属的 THQ 值如表 5 所示,食用蟒塘溪水库刺鲃肌肉中重金属的 THQ ,从高到低的顺序依次为: $Pb(0.10) > Zn(0.03) > Cu(0.01) > Cd(0.00)$,说明 Pb 产生的风险大于 Zn 、 Cu ,而 Cd 产生的风险最低,这与涂宗财等^[10]和沈梦楠等^[34]的研究结果一致。刺鲃重金属的总危害商数 $TTHQ$ 为 0.14,4 种重金属的 THQ 和 $TTHQ$ 均远小于 1,说明食用芷江蟒塘溪水库刺鲃肌肉不存在健康风险。

3 结论

3.1 Pb 、 Cd 、 Cu 、 Zn 在刺鲃不同组织中的富集具有选择性, Pb 和 Cu 在肝胰脏中的含量、 Cd 在肾脏中的含量及 Zn 在鳍中的含量高于其他组织中对应重金属含量。刺鲃同一组织中 Pb 、 Cd 、 Cu 、 Zn 含量差异较大, Zn 含量明显高于其他三种重金属。

3.2 刺鲃不同组织均值污染指数依次为肾脏>肝胰脏>肠>脾脏>鳃>鳍>脑>鱼皮>脑>鳞片>脂肪>肌肉>鳃。其中肾脏、肝胰脏、肠、脾脏、鳃丝、鳍和脑 7 种组织属于严重污染级别;鳞片和鱼皮属于中污染级别;肌肉和脂肪属于轻污染级别;鳃属于微污染级别。食用安全性评价结果表明,刺鲃肌肉中重金属的 THQ 和 $TTHQ$ 均远小于 1,且国内外人均表观鱼品消费量标准均低于刺鲃日消费限量(CR_{Lim}),说明食用芷江蟒塘溪水库刺鲃肌肉不存在健康风险。

参考文献

- [1] 刘业建,刘业祥,李红岩.湖南境内沅水流域水环境分析与思考[J].红河学院学报,2006,2:61-63
LIU Yong-jian, LIU Ye-xiang, LI Hong-yan. Analysis and thought on water environment of Hunan's Yuanshui valley [J]. Journal of Honghe University, 2006, 2: 61-63
- [2] 张晓博.重金属对水生生物的毒害作用[J].广东农业科学,2010,37(7):149-150,156
ZHANG Xiao-bo. Toxic effects of heavy metals on aquatic organisms [J]. Guangdong agricultural sciences, 2010, 37(7): 149-150, 156
- [3] Has Schon E, Bogut I. Heavy metal concentration in fish tissues inhabiting waters of busko blato reservoir (bosnia and herzegovina) [J]. Environ Monit Assess, 2007, 9(11): 1125-1130
- [4] 王春秀.水体铜对黄河鲤鱼毒性作用的研究[D].郑州:河南农

业大学,2010

WANG Chun-xiu. Study on the effects of copper to the toxicity of the Yellow River carp [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2010

- [5] 徐晓平,席贻龙,黄林. Zn^{2+} 和 Cd^{2+} 对蓼花臂尾轮虫种群增长的单一和联合毒性效应[J].环境科学研究,2016,29(3):368-375
XU Xiao-ping, XI Yi-long, HUANG Lin. single and combined toxicities of Zn^{2+} and Cd^{2+} to the population growth of *Brachionus calyciflorus* [J]. Research of Environmental Science, 2016, 29(3): 368-375
- [6] Lichtfous E, Schwarzbaue R, Rober T. Environmental Chemistry for A Sustainable World [M]. Dordrecht: Springer Netherlands, 2012: 311-373
- [7] Demirel S, Tuzen M, Saracoglu S, et al. Evaluation of various digestion procedures for trace element contents of some food materials [J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 152(3): 1020-1026
- [8] 刘晓伟,陆维亚,薛敏敏,等.东洞庭湖鲢鱼和鳙鱼中重金属富集差异分析[J].食品与机械,2017,33(12):65-69
LIU Xiao-wei, LU Wei-ya, XUE Min-min, et al. Analysis of the differences of heavy metal enrichment between silver carp and *Aristichthys nobilis* in east Dongting lake [J] Food and Machinery, 2017, 33(12): 65-69
- [9] 刘芳芳,李忠海,付湘晋,等.东洞庭湖网箱养殖鲤鱼生长期重金属的富集特征[J].环境科学研究,2013,26(2):166-172
LIU Fang-fang, LI Zhong-hai, FU Xiang-jin, et al. Enrichment of heavy metals in growth period of cage cultured carp (*Cyprinus carpio*) from the east Dongting lake [J]. Research of Environmental Sciences, 2013, 26(2): 166-172
- [10] 涂宗财,庞娟娟,郑婷婷,等.吴城鄱阳湖自然保护区鱼体重金属的富集及安全性评价[J].水生生物学报,2017,41(4): 878-883
TU Zong-cai, Pang Juan-juan, ZHENG Ting-ting, et al. Heavy metal content and safety evaluation of fishes nature reserve in Wucheng section of Poyang lake, China [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2017, 41(4): 878-883
- [11] 张晓文,邵柳逸,连宾.4 种太湖水产品体内重金属富集特征及食用安全性评价[J].食品科学,2018,39(2):310-314
ZHANG Xiao-wen, SHAO Liu-yi, LIAN Bin. Accumulation characteristics and safety evaluation of heavy metals in four kinds of aquatic products from lake Taihu [J]. Food Science, 2018, 39(2): 310-314
- [12] 肖明松,王松,鲍方印,等.淮河蚌埠段鳙鱼体内重金属富集

- 研究[J].安徽科技学院学报,2012,26(2):28-34
- XIAO Ming-song, WANG Song, BAO Fang-yin, et al. Concentrations of heavy metals in the bighead carp *Aristichthys nobilis* from Huaihe river segment of bengbu [J]. Journal of Anhui Science and Technology University, 2012, 26(2): 28-34
- [13] 余杨,王雨春,周怀东,等.三峡水库蓄水初期鲤鱼重金属富集特征及健康风险评估[J].环境科学学报,2013,33(7):2012-2019
- YU Yang, WANG Yu-chun, ZHOU Huai-dong, et al. Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals in carp (*Cyprinus carpio*) from the three gorges reservoir after 175 m impoundment [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, 33(7): 2012-2019
- [14] 罗谢琪,王兆丹,肖国生,等.三峡库区鲤鱼重金属污染状况及其健康风险评估[J].广东农业科学,2018,45(12):112-117
- LUO Xie-qi, WANG Zhao-dan, XIAO Guo-sheng. et al. Heavy metal pollution status and health risk assessment in carp from the three gorges reservoir [J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2018, 45(12): 112-117
- [15] GB 2762-2017,食品安全国家标准 食品中污染物限量[S]
- GB 2762-2017, Chinese Food Safety Standards Contaminant Limit in Food [S]
- [16] NY 5073-2006,无公害食品 水产品中有毒有害物质限量 [S]
- NY 5073-2006, Pollution-free Food Limits of Toxic And Hazardous Substances in Aquatic Products [S]
- [17] GB 13106-1991,食品中锌限量卫生标准[S]
- GB 13106-1991, Chinese Sanitary Standard for Zinc in Food [S]
- [18] 张家泉,李琼,童勇勇,等.黄石市磁湖鱼体内重金属的富集及风险评价[J].湖北农业科学,2013,52(11):2653-2656
- ZHANG Jia-quan, LI Qiong, TONG Yong-yong, et al. Enrichment of heavy metals in fishes of cihu lake and pollution assessment [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2013, 52(11): 2653-2656
- [19] 杨晨驰,黄亮亮,李建华.东苕溪下游鲫鱼不同组织重金属含量分析及食用安全性评价[J].食品科学,2013,34(19):317-320
- YANG Chen-chi, HUANG Liang-liang, LI Jian-hua. Analysis of heavy metals and safety evaluation of crucian carp (*Carassius carassius*) from the downstream east Tiaoxi river [J]. Food Science, 2013, 34(19): 317-320
- [20] 王兆群,肖扬.洪泽湖鱼体内重金属含量调查[J].环境监控与预警,2013,5(3):47-50
- WANG Zhao-qun, XIAO Yang. Survey of heavy metals in fish bodies of the Hongze lake [J]. Environmental Monitoring and Forewarning, 2013, 5(3): 47-50
- [21] Raissy M. Assessment of health risk from heavy metal contamination of shellfish from the persian gulf [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2016, 188(1): 1-7
- [22] USEPA. 2009. Risk-based concentration table [R]. Philadelphia, PA: United States Environmental Protection Agency
- [23] 国家体育总局.2014 年国民体质监测公报[N].人民网, 2015-11-25(<http://sports.people.com.cn/n/2015/1125/c35862-27855794.html>)
- Chinese National Sports Administration. 2014 National Physical Fitness Monitoring Bulletin [N]. People's Network, 2015-11-2
- [24] 中华人民共和国国家统计局. 中华人民共和国 2015 年国民经济和社会发展统计公报([1])[N].人民日报,2016-03-01 (010)
- National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. Statistical Communiqué of the People's Republic of China on National Economic and Social Development in 2015 ([1]) [N]. People's Daily, 2016-03-01 (010)
- [25] Wang S S, Lay S, Yu H N, et al. Dietary guidelines for Chinese residents: comments and comparisons[J]. Journal of Zhejiang University Science B: Biomedicine & Biotechnology, 2016, 17(9): 649-656
- [26] 顾景范.《中国居民营养与慢性病状况报告(2015)》解读[J].营养学报,2016,38(6):525-529
- GU Jing fan. Interpretation of "report on nutrition and chronic diseases of chinese residents (2015)" [J]. Acta Nutrimenta Sinica, 2016, 38(6): 525-529
- [27] 黄华伟,李小玲,刘伶俐,等.镉在芙蓉鲤鲫养殖水体中的分布及在鱼体的富集研究[J].湖南农业科学,2015,7:50-55
- HUANG Hua-wei, LI Xiao-ling, LIU Ling-li, et al. Dynamic distribution of cadmium in aquacultural environment and bioaccumulation of cadmium in furong crucian carp [J]. Hunan Agricultural Sciences, 2015, 7: 50-55
- [28] Allen P. Soft-tissue accumulation of lead in the blue tilapia, *Oreochromis aureus* (steindachner), and the modifying effects of cadmium and mercury [J]. Biological Trace Element Research, 1995, 50(3): 193-208