

# 循环水养殖欧洲鲈鱼(*Dicentrarchus labrax*) 重金属污染状况与富集分布特征\*

万慧珊<sup>1,2</sup> 程 波<sup>2①</sup> 宋晓红<sup>3</sup> 李 乐<sup>2</sup> 宋 恠<sup>2</sup>

(1. 上海海洋大学水产与生命学院 上海 201306; 2. 中国水产科学研究院质量与标准研究中心 北京 100141;  
3. 岛津企业管理(中国)有限公司 北京 100020)

**摘要** 为了解并评估天津市某循环水养殖企业的养殖产品重金属安全性和分布规律,本研究采用电感耦合等离子体发射光谱法(ICP法)和原子荧光法(AFS法),对该封闭循环水养殖系统中欧洲鲈鱼(*Dicentrarchus labrax*)幼鱼、养殖中期和成鱼3个阶段的鱼体肌肉、肝脏和鳃中8种重金属(As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn和Hg)含量进行测定。结果显示,从生长阶段来看,随养殖过程推进,各重金属在欧洲鲈鱼体内分布特征不同,肌肉中As含量随时间增加而增加,最大值为1.93 mg/kg, Cu和Hg则相反,最大值分别为0.354和0.021 mg/kg;肝脏中As、Cd和Cu含量均随时间增加,最大值分别为1.47、1.09和143.00 mg/kg;鳃中As含量随时间增加而增加,最大值为0.321 mg/kg, Cr、Cu、Zn和Hg含量呈先降后升的趋势,最大值分别为0.356、45.8、19.2和0.0137 mg/kg。从组织分布特征来看,As含量为肌肉>肝脏>鳃,Cd、Cu和Zn含量均为肝脏>鳃>肌肉,Hg含量为肌肉>鳃>肝脏,Cr含量为鳃>肝脏>肌肉。可食部分,即肌肉中各重金属含量均符合食品安全国家标准(GB 2762-2012),参考鱼体重金属残留污染程度分级,该系统中的欧洲鲈鱼均属于未污染。水体样本,除养殖中期进水中Pb和Cd超标,其余重金属含量均符合我国渔业水质标准(GB 11607-89)。表明该养殖系统中重金属污染在安全范围内。

**关键词** 循环水养殖; 欧洲鲈鱼; 重金属; 污染; 组织分布; 富集规律

**中图分类号** X835 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2017)05-0083-09

水产养殖作为“为人类提供优质蛋白质”的农业产业,其需求量逐年上升。据测算,到2030年,中国对水产品的需求量将再增加2000万t(任爱景等,2012)。循环水养殖模式(RAS)被认为是能够解决当前自然资源日益匮乏与人类需求矛盾不断增加的有效

途径之一。通过系统中各单元操作的处理,可实现水资源的循环利用,也加强了对水体污染物的管理和营养素的再利用(柳瑶等,2015;于冬冬,2014<sup>1)</sup>;朱建新等,2014;黄滨等,2016)。同时,循环水养殖系统的封闭模式,方便通过控制水温为养殖对象的生长繁殖提

\* 国家自然科学基金项目(31502191)、公益性行业(农业)科研专项(201503108)、现代农业产业技术体系建设专项(CARS-49)和中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(2016C009)共同资助 [This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (31502191), the Special Fund for Agro-scientific Research in the Public Interest (201503108), Modern Agricultural Industry Technology System (CARS-49), and the Special Fund of Chinese Central Government for Basic Scientific Research Operations in Commonwealth Research Institutes (2016C009)]. 万慧珊, E-mail: hs-wan@foxmail.com

① 通讯作者: 程 波, 副研究员, E-mail: chengbocafs@163.com

收稿日期: 2016-08-26, 收修改稿日期: 2016-09-20

1) Yu DD. The research of fine particles removal techniques in the seawater recirculating aquaculture system. Master's Thesis of Shanghai Ocean University, 2014, 12-16 [于冬冬. 海水循环水养殖系统中微细颗粒去除技术的研究. 上海海洋大学硕士研究生学位论文, 2014, 12-16]

供相对稳定的水环境。

循环水养殖模式虽然有上述诸多优点,但因其封闭循环的特征,若养殖用水受到污染,且源水处理环节不能及时有效发挥作用,一旦有害物质随水源进入养殖系统,将难以排出系统,因而,在循环水养殖系统中,水处理工艺等环节的高效运行,将直接关系到系统中水产品质量安全的保障。此外,养殖过程中投入大量饲料等物质,饲料中微量重金属等有害物质易在系统中累积,有害物质的富集是否会对养殖产品造成质量问题是该模式面临的新挑战。Martins 等(2010)研究了循环水养殖系统中3种不同水循环速率条件(30、70和1500 L/kg feed·d)对养殖尼罗罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)体内的重金属含量的影响,发现循环水中重金属含量随换水率的减少而增加,表明水的循环使用会导致重金属累积。目前,我国循环水养殖大多采用近海海水和地下水作为养殖水源,并充分利用地热资源,降低运行能耗成本。近年来,随着我国工农业的快速发展,大量污染物违规排放入海或入地,养殖用水的安全性受到威胁。目前,有关循环水养殖模式的研究,大多集中在养殖系统水处理工艺流程的设计优化、生物滤器载体填料的筛选、系统病害的防控等方面(刘鹰, 2011; 刘鹰等, 2012),有关该模式养殖产品的安全性问题少有研究。

天津市是我国应用工厂化循环水养殖设备与工艺集成力度最大的地区,本研究以天津地区某大型欧洲鲈鱼(*Dicentrarchus labrax*)循环水养殖系统为研究对象,在养殖周期的不同时间段采集养殖样品,进行重金属含量与分布特征分析,以期评估该养殖产品的安全性,并获得该循环水养殖系统中重金属在欧洲鲈鱼体内的富集与分布特征,为封闭循环水养殖模式的优化设计和推广应用提供理论参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验设计、研究对象及采样

该养殖企业地处天津市滨海新区杨家白镇,养殖用水为周边盐场卤水与地下井水,卤水经过沉淀池沉

淀后,与地下深井淡水勾兑,调节盐度至30左右,作为养殖系统使用水体。该企业1套封闭循环水养殖系统包括1套水处理系统和8个圆形水泥池,单个水泥池直径为6 m,水深为1 m,欧洲鲈鱼养殖密度约为30 kg/m<sup>3</sup>,养殖废水经过机械过滤器物理过滤、生物滤池生物降解、调温增氧后,泵送回养殖池循环利用,日换水率为50%。

本研究选定1套养殖系统中的1个养殖池为研究对象(单个池子养殖成鱼约1600尾),采集该养殖场欧洲鲈鱼生长的3个主要阶段的样品:幼鱼(养殖3个月,养殖周期为2015年2-5月)、中期(养殖6个月,养殖周期为2015年2-8月)和成鱼(养殖10个月,养殖周期为2015年2-12月),3个阶段每次分别随机采集6尾鱼。欧洲鲈鱼各生长阶段鱼体规格见表1。欧洲鲈鱼幼鱼、养殖中期和成鱼分别取其肌肉、肝脏、鳃进行重金属含量测定。分别采集勾兑使用混合源水、养殖池中水和生物滤器处理出水3种水体并进行重金属含量测定。

### 1.2 试剂与仪器

**1.2.1 仪器** EG35A Plus 电热板(莱伯泰科有限公司,中国);全谱型ICPE-9820 电感耦合等离子发射光谱仪(岛津,日本);AFS-830 型原子荧光分光光度计(北京吉天仪器有限公司)。

**1.2.2 标准品与试剂** 重金属标准溶液购于国家有色金属及电子材料分析测试中心。生物成分分析标准物质购于中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所。试剂:硝酸、高氯酸均为分析纯,购于国药集团化学试剂有限公司。

### 1.3 样品处理

**水样:**将获取的进水、池中水和生物滤器出水各水样分别用0.45 μm 混线滤膜抽滤,加入1 ml 65% HNO<sub>3</sub>,置于-20℃冰箱保存待测。

**生物样:**将捕捞的欧洲鲈鱼样品放入装有冰袋的保温箱中,尽快送回实验室,将欧鲈洗净后用陶瓷解剖刀分别取肌肉、肝、鳃组织,用分散机匀浆后置于-20℃条件下贮存备用。

表1 不同养殖阶段欧洲鲈鱼规格  
Tab.1 Specifications of *D. labrax* at three growth stages

生长阶段 Growth stages	样品数 Sample number	体长 BL(cm)		体重 BWH(g)	
		范围 Range	Mean±SD	范围 Range	Mean±SD
幼鱼 Juvenile	6	7.5-10.2	9.1±0.9	13.3-17.6	15.8±1.3
中期 Mid-term	6	30.2-31.5	31.2±0.8	221.3-331.3	287.3±47.5
成鱼 Adult	6	25.0-30.6	27.9±2.1	270.4-470.7	380.0±82.9

每次分别称取 1.5 g 左右样品放入 50 ml 锥形瓶中, 加入 12.0 ml 65.0% HNO<sub>3</sub> 以及 3.00 ml 70.0% HClO<sub>4</sub>, 加盖静置过夜; 将静置过夜后的溶液放入电热板上消解至澄清透明, 若出现黑色或棕色物质则需再向锥形瓶中加入 65.0% HNO<sub>3</sub> 和 70% HClO<sub>4</sub> 混合酸, 继续消解, 直至溶液近干并冒出白烟, 溶液呈透明或略带黄色, 冷却后用去离子水少量多次洗入容量瓶并定容至 25.0 ml, 同时作试剂空白, 备用待测。

#### 1.4 金属测定

称取生物样品进行消解, 随后由电感耦合等离子体发射光谱仪测定 As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn, 测定方法遵照《食品中铅、砷、铁、钙、锌、铝、钠、镁、硼、锰、铜、钡、钛、锶、锡、镉、铬、钒含量的测定》(DB53T 288-2009), 原子荧光法测定 Hg, 测定方法遵照《食品安全国家标准 食品中总汞及有机汞的测定》(GB 5009.17-2014)。测定过程中制作标准曲线, 根据标准曲线计算出样本中重金属含量。每份样品测定 3 个平行样, 结果均以湿重计。所测各元素加标回收率为 85%–120%, 样品标准偏差小于 5.00%。

#### 1.5 评价方法

利用单因子污染指数法, 根据我国食品安全国家标准-食品中污染限量(GB 2762-2012) (2012), 对本实验中欧洲鲈鱼肌肉中重金属污染状况进行评估。参考鱼体重金属残留污染程度分级, 其中, 污染指数<0.1 为未污染; 0.1–0.2 为微污染; 0.2–0.5 为轻污染; 0.5–0.7 为中污染; 0.7–1.0 为重污染; >1.0 为严重污染(石俊艳等, 1994)。

#### 1.6 数据处理及分析

欧洲鲈鱼各组织器官重金属在不同生长阶段数据分析采用 Excel 2010 和 SPSS 21.0, 配对 *T* 检验进行差异分析, 用于判断重金属在欧洲鲈鱼幼鱼、中期和成鱼各生长阶段含量差异, 以及成鱼阶段肌肉、肝脏

和鳃中重金属分布差异,  $P<0.05$  水平表明差异显著。

## 2 结果与分析

### 2.1 欧洲鲈鱼体内与养殖水体中重金属总体污染状况

表 2 为欧洲鲈鱼各组织中重金属检出率和超标率。在所检测的 54 个样本中, Cd 和 Cu 存在超标, 超标率分别为 33.3%和 22.2%, 其中, 超标样品只存在于肝脏样品中, 肌肉和鳃样本中各元素均未超标。该养殖场欧洲鲈鱼体内重金属含量总体情况良好, 在所检测的肌肉、肝脏和鳃样品中, 肌肉样品重金属检测结果均符合我国食品安全国家标准-食品中污染限量(GB 2762-2012) (2012)。

各阶段养殖进水、池中水和出水中重金属含量范围和限量标准如表 3 所示, 水样中重金属含量水平总体情况良好, 除养殖中期进水中 Pb 和 Cd 出现超标, 其余重金属元素检测结果均符合我国渔业水质标准(GB 11607-89) (1989)。

图 1 为本研究中欧洲鲈鱼各生长阶段肌肉中重金属污染指数。结果显示, 各生长阶段重金属污染指数有所不同, 其中, 养殖幼鱼污染指数最高, 为 0.0831, 养殖中期和养殖成鱼污染指数分别为 0.0203 和 0.0302, 各生长阶段欧洲鲈鱼均属于未污染。表明该养殖系统中重金属污染在安全范围内, 鱼体属于安全的食用范围, 但仍然需要对系统进行监测管理和维护, 以确保该系统长期安全有效运行。

### 2.2 不同生长阶段欧洲鲈鱼重金属含量变化特征

不同生长阶段欧洲鲈鱼肌肉中重金属含量变化特征如图 2 所示。随着养殖过程的进行, As 含量水平逐渐增加, 且相互之间存在显著差异( $P<0.05$ ), 在幼鱼和成鱼阶段, 其含量分别为 1.05 mg/kg, 在养殖阶段, 其含量为 1.93 mg/kg。Hg 含量水平逐渐降低, 且相互之间存在显著差异( $P<0.05$ ), 在幼鱼和成鱼阶段, 其含量分别为 0.021、0.005 mg/kg, 均低于国家食品安全限量标准(0.5 mg/kg)。Cu 与 Hg 含量变化趋

表 2 欧洲鲈鱼各组织中重金属检出率和超标率(%)

Tab.2 The detection rate and the over limit rate of heavy metal in three tissues of *D. labrax* (%)

项目 Items	金属元素 Metal elements							
	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Hg
肌肉检出率 Detection rate in muscle	100.0	33.3	16.7	100.0	44.4	33.3	100.0	100.0
肝脏检出率 Detection rate in liver	100.0	100.0	100.0	100.0	66.7	33.3	100.0	0.0
鳃检出率 Detection rate in gill	100.0	66.7	100.0	100.0	11.1	0.0	100.0	61.1
超标率 Over standard ratio		33.3	0	22.2		0		0

表 3 各生长阶段养殖水中重金属含量范围和限量标准(mg/L)

Tab.3 Concentration and limit standards of heavy metals in water at three growth stages (mg/L)

养殖阶段 Growth stages		金属元素 Metal elements							
		As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Hg/10 <sup>-3</sup>
幼鱼 Juvenile	进水 Inflow	nd	nd	nd	0.003	nd	nd	0.009	nd
	池中水 Culture	nd	nd	nd	0.003	nd	nd	0.009	nd
	出水 Outflow	nd	nd	nd	0.003	nd	nd	0.009	nd
中期 Mid-term	进水 Inflow	nd	0.007	nd	nd	nd	0.160	0.032	0.102
	池中水 Culture water	nd	0.004	nd	nd	nd	0.046	0.014	0.377
	出水 Outflow	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.015	0.256
成鱼 Adult	进水 Inflow	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.004	0.098
	池中水 Culture water	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.008	0.117
	出水 Outflow	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.003	0.123
限量标准 Limit standards		0.05	0.005	0.10	0.01	0.05	0.05	0.10	0.50

注: nd 为未检出 Note: nd: No detection

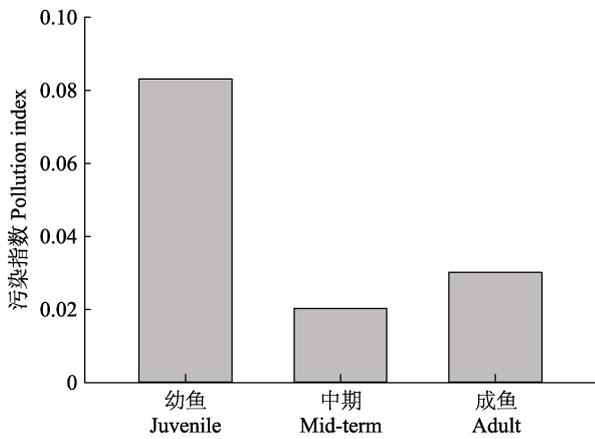


图 1 不同生长阶段欧洲鲈鱼重金属污染指数  
Fig.1 Heavy metals pollution index of *D. labrax* at three growth stages

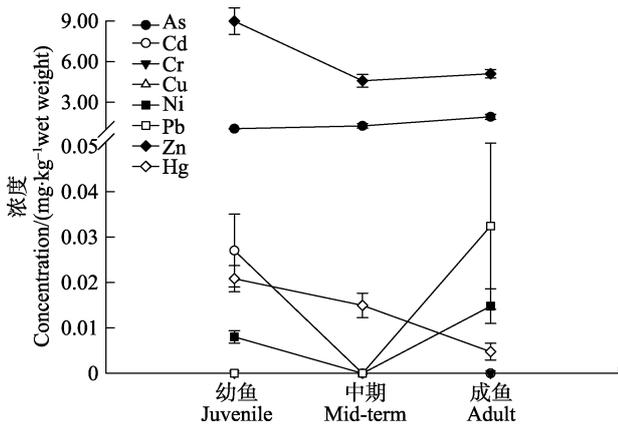


图 2 欧洲鲈鱼不同生长阶段肌肉中重金属含量变化  
Fig.2 The variation of heavy metal contents in the muscle of *D. labrax* at three growth stages

势一致, 含量水平为幼鱼>养殖中期>成鱼, 但各阶段差异不显著( $P>0.05$ )。Zn 含量水平呈先下降后微

有增长的趋势, 且相互之间存在显著差异( $P<0.05$ ), 在幼鱼阶段其含量达到最大值(8.98 mg/kg), 养殖中期呈现最小值(4.59 mg/kg)。Cr 和 Pb 在各生长阶段均未检出。

不同生长阶段欧洲鲈鱼肝脏中重金属含量变化见图 3。As 和 Cu 含量水平随养殖时间的增加而逐渐增加, 且均在成鱼阶段达到最大值, 分别为 1.47、143.00 mg/kg。其中, As 含量在幼鱼和养殖中期之间差异显著( $P<0.05$ ), 养殖中期和成鱼间差异不显著( $P>0.05$ )。Cu 在生长 3 个阶段浓度值均存在显著差异( $P<0.05$ )。Cd、Cr 和 Zn 含量水平均在养殖中期时达到最大值, 分别为 1.09、0.455 和 50.8 mg/kg。Cr 和 Zn 在生长 3 个阶段含量均存在显著差异( $P<0.05$ )。Cd 含量仅在幼鱼和养殖中期存在显著差异( $P<0.05$ )。Hg 在欧鲈 3 个生长阶段肝脏组织中均未检出。

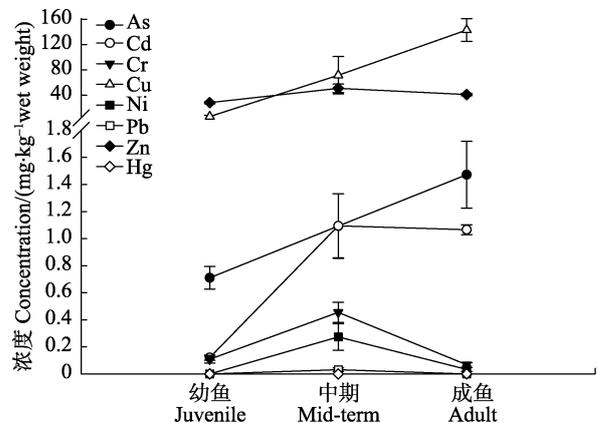


图 3 欧洲鲈鱼 3 个不同生长阶段肝脏中重金属含量变化

Fig.3 The variation of eavy metal contents in the liver of *D. labrax* at three growth stages

不同生长阶段欧洲鲈鱼鳃中重金属含量变化见图 4。随着养殖过程的进行, As 含量水平逐渐增加, 在幼鱼和成鱼阶段, 含量分别为 0.248、0.321 mg/kg, 其中, As 仅在幼鱼和养殖中期存在显著差异 ( $P < 0.05$ )。Cu 和 Zn 含量均在幼鱼阶段含量最高, 分别为 0.472、19.2 mg/kg, 养殖中期含量水平最低, 分别为 0.297、10.5 mg/kg, 其中, Cu 和 Zn 各阶段之间差异显著 ( $P < 0.05$ )。Cr 和 Hg 在养殖成鱼阶段含量水平达到最大值, 分别为 0.356、0.00137 mg/kg, 在养殖中期达到最小值, 分别为 0.119、0.000977 mg/kg, 其中, Cr 各阶段相互之间存在显著差异 ( $P < 0.05$ ), Hg 各阶段相互之间无显著差异 ( $P > 0.05$ )。Pb 在各生长阶段均未检出。

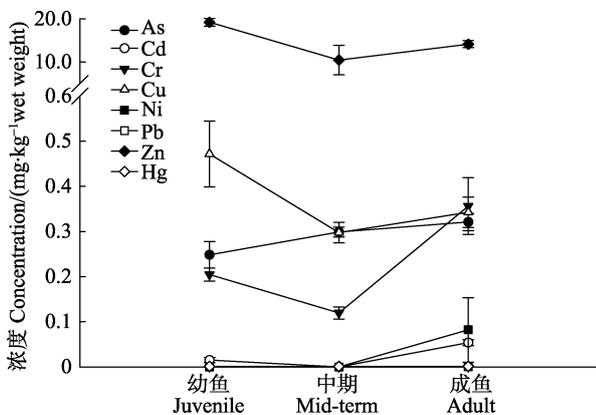


图 4 欧洲鲈鱼 3 个不同生长阶段鳃中重金属含量变化

Fig.4 The variation of heavy metal contents in the gill of *D. labrax* at three growth stages

### 2.3 欧洲鲈鱼养殖成鱼体内重金属的组织分布特征

欧洲鲈鱼成鱼阶段不同组织中重金属含量分布见图 5。As 在欧鲈体内的组织分布为肌肉>肝脏>鳃, 含量最大值为 1.93 mg/kg, 且相互之间存在显著差异 ( $P < 0.05$ )。Cd、Cu、Zn 的组织分布为肝脏>鳃>肌肉, 含量水平最大值分别为 1.06、143.00、40.90 mg/kg, 且各元素的组织分布特征差异显著 ( $P < 0.05$ )。Cr 在欧洲鲈鱼体内的累积浓度为鳃>肝脏>肌肉, 含量水平最大值为 0.355 mg/kg, 且相互之间存在显著差异 ( $P < 0.05$ )。Ni 含量水平在各组织间无显著差异 ( $P > 0.05$ )。Pb 只在肌肉中检出, 含量为 0.0324 mg/kg; Hg 在肝脏中未检出, 在肌肉中含量水平为最大值 (0.005 mg/kg), 肌肉组织和鳃中 Hg 分布呈显著差异 ( $P < 0.05$ )。

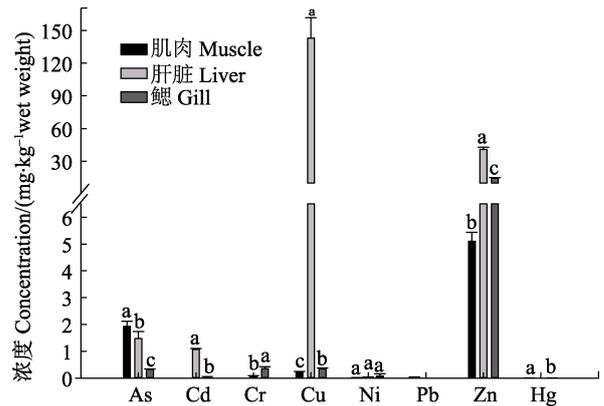


图 5 欧洲鲈鱼成鱼体内重金属的组织分布特征  
Fig.5 Distribution of heavy metals in different tissues of adult *D. labrax*

同组标有不同字母者表示组间差异显著 ( $P < 0.05$ )  
Different superscripts represented significant difference within groups ( $P < 0.05$ )

## 3 讨论

### 3.1 欧洲鲈鱼及养殖水体中重金属污染状况与影响因素

本研究中, 养殖欧洲鲈鱼 3 个阶段、3 种组织中均不同程度检测出 As、Hg、Cd、Cr 等重金属元素, 且对肌肉等可食部分按照食品安全国家标准《食品中污染物限量》(GB2762-2012)重金属限量标准值进行评价。结果显示, 该养殖系统中欧洲鲈鱼肌肉中重金属含量未出现超标现象。此外, 养殖欧洲鲈鱼肝脏中 Cd 和 Cu 含量较高, 分别为 1.07、143.00 mg/kg, 但一般情况下, 消费者仅食用鱼体肌肉部分, 肝脏和鳃作为内脏的一部分, 在前处理时已被丢弃, 因此, 从食用角度考虑, 肝脏中富集的重金属不会对该养殖系统中欧洲鲈鱼食品安全造成较大威胁。对于水生动物而言, 生存环境中存在的各种重金属元素, 无论是否和它们生命代谢有关, 都会在动物体内通过呼吸、摄食等不同途径在组织中积累(Rainbow, 2007)。Lacerda 等(2006)发现池塘中 Cu 主要来源于养殖用水, 其次是投入的饲料、肥料和化学药品等。对于循环水养殖系统, 当水源受重金属一定程度污染时, 养殖用水是系统中重金属的主要来源, 并因系统封闭循环的特征, 在养殖动物体内产生较强的富集(Cheng *et al*, 2014)。本研究中, 养殖企业的养殖用水为近海盐场卤水和地下井水勾兑而成, 对其勾兑混合用水进行检测, 水体中重金属 Cu、Pb、Zn 和 Hg 等均有检出, 且养殖中期所用混合源水中 Pb 和 Cd 含量水平超出

渔业水质标准(GB 11607-89)的限量值。有研究表明,封闭循环水养殖系统中,换水率是影响系统水体重金属含量的因素之一,随系统换水率降低,水体重金属含量呈现上升趋势。但研究同时表明,在对系统中罗非鱼、大菱鲂(*Psetta maxima*)等鱼体重金属进行检测时,发现换水率的变化未成为影响鱼体重金属分布的主要因素(Calvi *et al.*, 2006; Deviller *et al.*, 2005; Bussel *et al.*, 2014; Martins *et al.*, 2011)。但养殖鱼体重金属分布特征还会因养殖品种不同而有所不同(陆维亚等, 2016),本实验所测样本为欧洲鲈鱼,与上述研究中研究对象有所不同,研究结果也有所差异。

本研究中,该养殖企业循环水系统水体中 As、Cr 和 Ni 均未检出,且实际生产换水率高达 50.0%,然而,在检测的肌肉样品中,As 含量处于较高水平。同时,在所检测水体中出现超标的 Pb 在欧洲鲈鱼体内并未检出,而 Cd 在水体中出现超标的现象,同时在欧洲鲈鱼肝脏中含量水平较高,这说明在该循环水养殖系统中,水源与欧洲鲈鱼体内重金属累积有关但并不是唯一因素。有研究表明,As 暴露会对人体皮肤造成损害,严重时会引起皮肤癌、肺癌等,Cd 通过呼吸和饮食进入人体,富集在体内的 Cd 对人体的内脏、骨骼以及生殖器官具有较强的损伤,长期 Cd 暴露易患肺癌、骨痛病及神经衰弱等,Pb 对人体多个系统和器官组织具有毒性效应,可引起神经系统紊乱、免疫力下降、血铅中毒(陈保卫等, 2009; 杜丽娜等, 2013; 韩艳春等, 2009)。因此,加强控制源水中重金属含量水平,提高循环水养殖系统运行效率,切实保障水产品质量安全对循环水养殖系统的良性发展至关重要。对于养殖动物而言,重金属离子分为营养类和非营养类,Cu 和 Zn 等营养元素比 As、Hg 等非营养元素更易被机体吸收,且不同重金属之间存在协同和竞争作用,某些金属元素会共用一个离子通道,当环境中多种离子相互作用时,其在生物体内的富集会产生竞争效应,影响吸收(王明华等, 2005)。被测的 8 种重金属元素中,除 Cd、Cu 外,Zn 富集能力相对较高,但 Pb 在欧洲鲈鱼体内基本无富集,说明欧洲鲈鱼对某些重金属元素的富集具有选择性。循环水养殖系统中重金属的污染富集,还与养殖系统的水处理工艺流程、系统的运行管理、养殖品种和投入品质量等诸多因素相关,如何减少有害物质的富集以及是否对养殖产品造成质量安全问题还需要更多深入的

研究探索。

### 3.2 欧洲鲈鱼不同生长阶段重金属分布规律

本研究循环水养殖系统中,养殖水体再利用率可达 50%,水中未被去除的重金属离子伴随着欧洲鲈鱼的生长发育在鱼体内不断累积,且不同元素在欧洲鲈鱼不同生长阶段分布规律有所不同。郭建林(2007)<sup>1)</sup>研究表明,Zn 作为鱼类生长的必需元素,是鱼体内某些酶的组分或活化剂,同时具有促进鱼类蛋白质代谢、骨骼发育等功能。闫海鱼等(2008)研究认为,鱼体在体重迅速增加的阶段其体内重金属富集速率也加快,随着体重的快速增加,重金属在体内被稀释,浓度呈现下降趋势,该结论与本研究结果一致。对于有害重金属元素,生物体在环境中重金属暴露胁迫刺激下,可以诱导产生金属硫蛋白(Metallothionein, MT),通过 MT 与重金属的结合,将重金属排除体外,呈现体内重金属释放的现象(吴坚, 1991; Roesijadi, 1994; 蔡立哲等, 1999; 陈海刚等, 2008)。本研究中,随着养殖过程的进行,Cr、Cd 和 Hg 含量均出现降低,可能与此生理代谢过程有关,但各元素在 3 个生长阶段之间含量并无显著差异( $P>0.05$ )。Cd 含量在养殖中期进水和池中水中均高于成鱼阶段,这与成鱼阶段肝脏中 Cd 含量出现降低的情况一致。可能由于 Cd 未能及时随循环系统排出,滞留在养殖池中造成鱼体中 Cd 累积。Hg 在养殖中期水体中含量较高,该结果与欧洲鲈鱼肌肉中 Hg 含量分布规律一致。在循环水养殖系统中,水体中重金属含量的本底值以及去除率可能会影响该系统中欧洲鲈鱼对重金属的分布规律,具体还有待深入研究。

### 3.3 欧洲鲈鱼养殖成鱼不同组织重金属分布规律

对于水生生物来说,重金属的吸收途径主要有三种(王明华等, 2005):一是通过表皮和鳃直接从周围水环境中摄入,二是从食物链中通过摄食(包括饵料和颗粒物等)富集,三是通过以上两种方法共同作用形成重金属积累。本研究中,重金属在欧洲鲈鱼各组织器官中存在显著差异( $P<0.05$ ),其中,肝脏对重金属呈现出高含量水平,Cd 在肝脏中含量水平为鳃的 21.2 倍;Cu 在肝脏中含量水平分别是肌肉和鳃的 659.6 和 420.4 倍;肝脏中 Fe 含量水平分别是肌肉和鳃的 36.0 和 2.6 倍,肝脏中 Zn 含量水平是肌肉的 8.0

1) Guo JL. Effects of Fe, Cu, Mn, Zn on growth, physiological function, content of trace elements in organs of *Carassius auratus* Gibelio. Master's Thesis of Soochow University, 2007, 19-24 [郭建林. Fe、Cu、Mn、Zn 对异育银鲫生长、生理机能及器官微量元素含量的影响. 苏州大学硕士研究生学位论文, 2007, 19-24]

倍, 是鳃的 2.9 倍。饵料中重金属累积会影响暴露在该环境下的鱼类重金属吸附情况(Wang *et al.*, 1996、2001a、b)。针对饵料对该循环水养殖系统中欧洲鲈鱼体内重金属累积的影响, 还有待进一步探究。

Hook 等(2001)研究表明, 一般情况下, 通过水相吸收的重金属离子会留在表皮组织或外骨骼中, 存在于鱼体内脏等软组织中的重金属多是由鱼体摄食吸收而来。本研究中, 幼鱼阶段水体中 Cu 和 Zn 含量相对较高, 暴露在这一环境中的幼鱼易受其影响, 造成皮肤和鳃中 Cu 和 Zn 的富集, 该结果与上述结论一致。此外, 当重金属离子进入体内后, 由肝脏进行解毒, 一部分重金属在此被降解, 还有一小部分随排泄物排出体外, 当鱼体内脏重金属浓度过高时, 会发生重金属向肌肉扩散的现象(Sanders *et al.*, 1998)。本研究所发现的 As 在鲈鱼不同组织中分布规律与鲫鱼(*Carassius auratus*)和菲律宾蛤仔(*Ruditapes philippinarum*)基本一致(罗国钧, 2000; 姜会超等, 2014)。有研究表明, 鱼体对重金属的累积作用受生活环境和重金属种类等因素的影响(曾乐意, 2012)<sup>1)</sup>。本研究中, 欧洲鲈鱼暴露在含有重金属的水体中造成体内重金属累积, 但不同重金属元素在鱼体内分布情况不同, Cd、Cu 主要分布在肝脏中, 而 As、Hg 主要分布在肌肉中。对于 Cu 而言, 仅在养殖初期水体中检出, 但在欧洲鲈鱼各阶段肌肉、肝脏和鳃中均有检出, 其中, 肝脏组织中 Cu 含量出现较高值。该结果与 Cinier(1999)的研究结果一致。

#### 4 结论

As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 和 Hg 共 8 种重金属在该封闭循环水养殖系统欧洲鲈鱼肌肉、肝脏和鳃中部分或全部有检出, 其中, 肌肉中各元素含量均在食品安全国家标准《食品中污染物限量》(GB2762-2012)范围以内, 水体样本除养殖中期进水中 Pb 和 Cd 出现超标, 其余重金属检测结果均在我国渔业水质标准(GB 11607-89)限量标准内, 重金属污染指数结果显示, 各生长阶段欧洲鲈鱼均属于未污染。

除 Ni 外, 其余 7 种重金属在欧洲鲈鱼体内存在显著组织分布特征: As 含量水平为肌肉>肝脏>鳃, Cd、Cu 和 Zn 含量水平为肝脏>鳃>肌肉, Hg 含量水平为肌肉>鳃>肝脏, Cr 含量水平为鳃>肝脏>肌肉。

随着养殖过程推进, 不同重金属元素在欧洲鲈鱼

体内不同组织富集规律不同, 对于肌肉组织, 总 As 含量随时间增加而增加, 而 Cu 和 Hg 则相反; 在肝脏中 As、Cd 和 Cu 含量均随时间增加而增加, 但在鳃中, As 含量随时间增加而增加, 而 Cr、Cu、Zn 和 Hg 含量呈现先下降后上升的趋势。

#### 参 考 文 献

- Bussel CGJ, Schroeder JP, Mahlmann L, *et al.* Aquatic accumulation of dietary metals (Fe, Zn, Cu, Co, Mn) in recirculating aquaculture systems (RAS) changes body composition but not performance and health of juvenile turbot (*Psetta maxima*). *Aquacultural Engineering*, 2014, 61(4): 35–42
- Cai LZ, Hong HS, Hong LY. Accumulation of zinc and lead in *Ruditapes philippinarum* and its tolerance. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1999, 19(3): 97–100 [蔡立哲, 洪华生, 洪丽玉. 菲律宾蛤仔对锌、铅的积累特征. *环境科学学报*, 1999, 19(3): 97–100]
- Calvi AM, Allinson G, Jones P, *et al.* Trace metal concentrations in wild and cultured Australian short-finned eel (*Anguilla australis* Richardson). *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2006, 77(4): 590–596
- Chen BW, Naramandura H, Lu ML, *et al.* Metabolism, toxicity, and biomonitoring of arsenic species. *Progress in Chemistry*, 2009, 21(2–3): 474–482 [陈保卫, 那仁满都拉, 吕美玲, 等. 砷的代谢机制、毒性和生物监测. *化学进展*, 2009, 21(2–3): 474–482]
- Chen HG, Jia XP, Lin Q, *et al.* Accumulation and release characteristics of heavy metals in *Crassostrea rivalaris* under mixed exposure. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(4): 922–927 [陈海刚, 贾晓平, 林钦, 等. 混合暴露条件下近江牡蛎对重金属的积累与释放特征. *应用生态学报*, 2008, 19(4): 922–927]
- Cheng B, Liu Y, Yang HS, *et al.* Effect of copper on the growth of shrimps *Litopenaeus vannamei*: Water parameters and copper budget in a recirculating system. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2014, 32(5): 1092–1104
- Cinier CDC, Petit-Ramel M, Faure R, *et al.* Kinetics of cadmium accumulation and elimination in carp *Cyprinus carpio*, tissues. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Pharmacology, Toxicology and Endocrinology*, 1999, 122(3): 345–352
- Deviller G, Palluel O, Aliaume C, *et al.* Impact assessment of various rearing systems on fish health using multibiomarker response and metal accumulation. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2005, 61(1): 89–97

1) Zeng LY. The contents of heavy metals in several fish species from upstream of the Yangtze River and ecophysiological effects of the dietary lead (Pb) on *Spinibarbus sinensis*. Master's Thesis of Southwest University, 2012:14–17 [曾乐意. 长江上游几种鱼类重金属含量及饲料铅对中华倒刺鲃的生理生态学影响. 西南大学硕士研究生学位论文, 2012:14–17]

- Du LN, Yu RZ, Wang HY, *et al.* Pollution and toxicity of cadmium: A review of recent studies. *Journal of Environment and Health*, 2013, 30(2): 213–217 [杜丽娜, 余若祯, 王海燕, 等. 重金属镉污染及其毒性研究进展. *环境与健康杂志*, 2013, 30(2): 213–217]
- Han YC, Sinayil A. Progress in clinical and experimental researches of children lead poisoning. *Journal of Environment and Health*, 2009, 26(8): 746–748 [韩艳春, 阿依吐伦·斯马义. 儿童铅毒性临床和实验研究进展. *环境与健康杂志*, 2009, 26(8): 746–748]
- Hook SE, Fisher NS. Reproductive toxicity of metals in calanoid copepods. *Marine Biology*, 2001, 138(138): 1131–1140
- Huang B, Ma T, Liu BL, *et al.* Effects of ozone concentration on the activity of biofilm and its effectiveness of purification in recirculating aquaculture systems. *Progress in Fishery Sciences*, 2016, 37(3): 143–147 [黄滨, 马腾, 刘宝良, 等. 不同浓度臭氧对循环水养殖系统生物膜活性及其净化效能的影响. *渔业科学进展*, 2016, 37(3): 143–147]
- Jiang HC, Liu AY, Song XK, *et al.* The characteristics of heavy metal accumulation and release in *Ruditapes philippinarum* tissues and organs during the exposure of mixed heavy metals. *Process in Fishery Sciences*, 2014, 35(3): 82–90 [姜会超, 刘爱英, 宋秀凯, 等. 混合暴露条件下菲律宾蛤仔不同组织对几种重金属的富集与释放特征. *渔业科学进展*, 2014, 35(3): 82–90]
- Lacerda LD, Santos JA, Madrid RM. Copper emission factors from intensive shrimp aquaculture. *Marine Pollution Bulletin*, 2006, 52(12): 1823–1826
- Liu Y, Liu BL. Opportunities and challenges for marine industrialized aquaculture in China. *Fishery Modernization*, 2012, 39(6): 1–4, 9 [刘鹰, 刘宝良. 我国海水工业化养殖面临的机遇和挑战. *渔业现代化*, 2012, 39(6): 1–4, 9]
- Liu Y, Song XF, Lei JL, *et al.* Biofiltration of cyclo-bio fluidized sand bed in recirculating aquaculture system. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(3): 249–254 [柳瑶, 宋协法, 雷霖霖, 等. 循环水养殖旋转式生物流化床生物过滤功能. *农业工程学报*, 2015, 31(3): 249–254]
- Liu Y. Research progress on marine industrial recirculating aquaculture technology. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2011, 13(5): 50–53 [刘鹰. 海水工业化循环水养殖技术研究进展. *中国农业科技导报*, 2011, 13(5): 50–53]
- Lu WY, Li J, Xue MM, *et al.* Accumulation and migration regularity of heavy metals in plankton and *Aristichthys nobilis*. *Food and Machinery*, 2016, 32(3): 96–100 [陆维亚, 李节, 薛敏敏, 等. 重金属在浮游生物与鳙鱼中的蓄积和迁移规律. *食品与机械*, 2016, 32(3): 96–100]
- Luo GJ. Research into the distributive and accumulative rules about heavy metals in the Crucian Carp's body. *Journal of Yuzhou University*, 2000, 17(1): 56–61 [罗国钧. 鲫鱼体内重金属的分布和积累规律研究. *渝州大学学报(自然科学版)*, 2000, 17(1): 56–61]
- Martins CIM, Eding EH, Verreth JAJ. The effect of recirculating aquaculture systems on the concentrations of heavy metals in culture water and tissues of Nile tilapia *Oreochromis niloticus*. *Food Chemistry*, 2011, 126(3): 1001–1005
- Martins CIM, Eding EH, Verdegem MCJ, *et al.* New developments in recirculating aquaculture systems in Europe: A perspective on environmental sustainability. *Aquacultural Engineering*, 2010, 43(3): 83–93
- Ministry of Health of PRC. National food safety standard-Maximum levels of contaminants in foods (GB 2762-2012). Beijing: China Standards Press, 2012 [中华人民共和国卫生部. 食品安全国家标准 - 食品中污染物限量 (GB 2762-2012). 北京: 中国标准出版社, 2012]
- National Environmental Protection Agency. GB 11607-1989 Water quality standard for fisheries. Beijing: China Standards Press, 1989 [国家环境保护局. GB 11607-1989 渔业水质标准. 北京: 中国标准出版社, 1989]
- Rainbow PS. Trace metal bioaccumulation: Models, metabolic availability and toxicity. *Environment International*, 2007, 33(4): 576–582
- Ren AJ, Yang ZY, Dai YJ, *et al.* Research on aquatic product demand forecasting in China. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2012, 21(1): 145–150 [任爱景, 杨正勇, 戴亚娟, 等. 我国水产品需求预测研究. *上海海洋大学学报*, 2012, 21(1): 145–150]
- Roesijadi G. Behavior of metallothionein-bound metals in a natural population of an estuarine Mollusca. *Marine Environmental Research*, 1994, 38(4): 147–168
- Sanders JG, Riedel GF. Metal metabolism in aquatic environments. London: Chapman and Hall, 1998: 285–319
- Shi JY, Yu WJ, Liu Z, *et al.* Investigation on residual pollutant of fishes in Yalu River. *Freshwater Fisheries*, 1994, 24(3): 8–10 [石俊艳, 于伟君, 刘中, 等. 鸭绿江等河流鱼体残毒调查报告. *淡水渔业*, 1994, 24(3): 8–10]
- Wang MH, Wang GZ, Li SJ. Assimilation and metabolism of heavy metals in marine crustacean. *Fujian Journal of Agricultural sciences*, 2005, 20(B12): 51–56 [王明华, 王桂忠, 李少菁. 重金属在海洋甲壳动物中的吸收和代谢. *福建农业学报*, 2005, 20(B12): 51–56]
- Wang WX, Dei RCH, Xu Y. Responses of Zn assimilation by coastal plankton to macronutrients. *Limnology and Oceanography*, 2001a, 46(6): 1524–1534
- Wang WX, Dei RCH. Biological uptake and assimilation of iron by marine plankton: Influences of macronutrients. *Marine Chemistry*, 2001b, 74(2/3): 213–226
- Wang WX, Lee BG, Reinfelder JR, *et al.* Assimilation and regeneration of trace elements by marine copepods. *Limnology and Oceanography*, 1996, 41(1): 70–81
- Wu J. Biochemical effects of trace elements to marine organism. *Marine Environmental Science*, 1991, 10(2): 58–64 [吴坚. 微量元素对海洋生物的生物化学效应. *海洋环境科学*, 1991, 10(2): 58–64]

Yan HY, Feng XB, Liu T, *et al.* Present situation of fish mercury pollution in heavily mercury-contaminated Baihua reservoir in Guizhou. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27(8): 1357–1361 [闫海鱼, 冯新斌, 刘霆, 等. 贵州百花湖鱼体汞污染现状. *生态学杂志*, 2008, 27(8): 1357–1361]

Zhu JX, Liu H, Xu Y, *et al.* Dual-culture techniques for the rapid start-up of recirculating aquaculture system. *Process in Fishery Sciences*, 2014, 35(4): 118–124 [朱建新, 刘慧, 徐勇, 等. 循环水养殖系统生物滤器负荷挂膜技术. *渔业科学进展*, 2014, 35(4): 118–124]

(编辑 冯小花)

## Contamination and Accumulation of Heavy Metals in *Dicentrarchus labrax* Cultured in Recirculating Aquatic Systems

WAN Huishan<sup>1,2</sup>, CHENG Bo<sup>2①</sup>, SONG Xiaohong<sup>3</sup>, LI Le<sup>2</sup>, SONG Yi<sup>2</sup>

(1. College of Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306; 2. Quality and Standard Research Center, Chinese Academy of Fishery Sciences, Beijing 100141; 3. Shimadzu (China) Co., Ltd., Beijing 100020)

**Abstract** Aquaculture provides human beings with steady sources of high-quality proteins and has been an ever-growing industry thanks to the recirculating aquatic system (RAS). RAS allows aquaculture to be less dependent on natural resources. However, RAS is prone to the accumulation of hazardous substances such as flocculation, non-ionic ammonia and heavy metals, so the safety of produces raised in RAS needs to be carefully evaluated. In this study, we analyzed the safety and the distribution of eight heavy metals in *Dicentrarchus labrax* cultured in a closed RAS in Tianjin. The contents of arsenic, cadmium, chromium, copper, nickel, lead and zinc were measured with Inductively Coupled Plasma (ICP), and the level of mercury was measured with Atomic Fluorescence (AFS) during the three growth stages including juvenile, mid-term and adult. It was found that the distribution of heavy metals varied at different growth stages. In the muscle, the content of arsenic increased over time with the maximum value of 1.93 mg/kg. The contents of copper and mercury changed in an opposite pattern and the maximum values were 0.354 mg/kg and 0.021 mg/kg respectively. In the liver, the contents of arsenic, cadmium and copper increased over time with the maximum value of 1.47 mg/kg, 1.09 mg/kg and 143.00 mg/kg respectively. In the gill, the content of arsenic increased over time with the maximum value of 0.321 mg/kg. The contents of chromium, copper, arsenic and mercury first rose and then dropped, and the maximum values were 0.356 mg/kg, 45.8 mg/kg, 19.2 mg/kg and 0.0137 mg/kg respectively. The distribution of arsenic in different tissues followed the order of muscle>liver>gill; the distribution of cadmium, copper and zinc followed the order of liver>gill>muscle; mercury followed the order of muscle>liver>gill; and chromium followed the order of gill>liver>muscle. In general, the contents of all elements in the muscle complied with the national food safety standard (GB 2762-2012). All the samples were unpolluted according to the grading of heavy metal residues in fishes. Contents of all heavy metal elements were under the limits of the water quality standard for fisheries (GB 11607-89) except for Pb and Cd. In conclusion, the heavy metal contents in the tested RAS were in a safe range.

**Key words** Recirculating aquatic systems (RAS); *Dicentrarchus labrax*; Heavy metals; Contamination; Distribution; Enrichment

① Corresponding author: CHENG Bo, E-mail: chengbocafs@163.com