

高雪飞, 吴胜春, 尤琼智, 等. 海洋养殖鱼类体内汞污染及其在不同器官中的生物富集特征[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(6): 1078-1086.

GAO Xue-fei, WU Sheng-chun, YOU Qiong-zhi, et al. Mercury contamination and bioaccumulation in different tissues of marine aquaculture fish[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(6):1078-1086.

## 海洋养殖鱼类体内汞污染及其在不同器官中的生物富集特征

高雪飞<sup>1</sup>, 吴胜春<sup>1,2</sup>, 尤琼智<sup>1</sup>, 汪奇<sup>1</sup>, 梁鹏<sup>1,2\*</sup>

(1.浙江农林大学环境与资源学院, 杭州 311300; 2.浙江省土壤污染生物修复重点实验室, 杭州 311300)

**摘要:**以浙江省宁波市象山港和舟山市六横岛海洋渔业养殖区典型养殖鱼体为研究对象,选取三种人工海洋网箱养殖鱼类(黑鲷、鲈鱼和红鲷),通过测定其不同组织和器官中总汞和甲基汞的含量,探讨了不同形态汞在海洋养殖鱼体不同组织和器官中的分布及富集特征。结果显示:象山港和六横岛渔业养殖区鱼体肌肉组织中总汞平均含量分别为 106、43.4 ng·g<sup>-1</sup>,甲基汞含量分别为 81.0、33.6 ng·g<sup>-1</sup>;鱼体不同器官组织的功能不同导致其对汞的富集程度也不同,各器官组织总汞和甲基汞含量分布规律基本表现为肌肉>肝脏>其他器官。肌肉组织中总汞和甲基汞在两地均表现为黑鲷显著高于鲈鱼和红鲷,主要是由于黑鲷以杂鱼为主要食物,而鲈鱼和红鲷以颗粒鱼粮为主要食物,杂鱼汞含量显著高于颗粒鱼粮;但是鱼鳃、鱼鳞等组织中的汞在不同鱼种之间无显著差异,说明这些组织中的汞主要来源于水体。象山港和六横岛两地鱼体肌肉组织中甲基汞的生物富集系数高于总汞的生物富集系数,说明甲基汞更易在鱼体中富集。

**关键词:**海洋养殖;汞形态;鱼体器官;分布

中图分类号:X171.5 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2017)06-1078-09 doi:10.11654/jaes.2016-1446

### Mercury contamination and bioaccumulation in different tissues of marine aquaculture fish

GAO Xue-fei<sup>1</sup>, WU Sheng-chun<sup>1,2</sup>, YOU Qiong-zhi<sup>1</sup>, WANG Qi<sup>1</sup>, LIANG Peng<sup>1,2\*</sup>

(1.School of Environmental & Resources Science, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, China; 2.Key Laboratory of Soil Contamination Bioremediation of Zhejiang Province, Hangzhou 311300, China)

**Abstract:** Three kinds of aquacultured fish, including black seabream (*Acanthopagrus schlegelii*), red snapper (*Lutjanus campechanus*), and perch (*Perca fluviatilis*) were collected from Xiang-shan (XS) Bay and Liu-heng (LH) Island, Zhejiang Province, in an attempt to investigate the distribution patterns and bioaccumulation levels in different tissues and organs of fish in terms of total mercury (THg) and methylmercury (MeHg). The results showed that the mean values of THg concentration in fish muscle samples from XS and LH were 106 and 43.4 ng·g<sup>-1</sup>, respectively, whereas the average MeHg concentrations in fish muscle were 81.0 and 33.6 ng·g<sup>-1</sup>, respectively. THg and MeHg showed a decreasing order in different tissues as follows: muscle>liver>other organs. The THg and MeHg concentrations in the muscles of black seabream were higher than those in red snapper and perch because black seabream was fed with trash fish whereas red snapper and perch were fed with commercial feed pellets. It was found that THg and MeHg concentrations in the trash fish were significantly higher than in the feed pellets. However, there were no significant differences for THg and MeHg concentrations in the gills and scales among the three kinds of fish, indicating that Hg in gills and scales was mainly from the water. The bioaccumulation factor of MeHg in fish muscle was higher than that of THg for both sites, which implies that it was much easier for MeHg to bioaccumulate in fish muscle than for THg.

**Keywords:** marine aquaculture; mercury speciation; fish organs; distribution

收稿日期:2016-11-16

作者简介:高雪飞(1991—),女,河南新乡人,硕士研究生,研究方向为汞元素环境地球化学。E-mail:1178388670@qq.com

\*通信作者:梁鹏 E-mail:liangpeng2727@163.com

基金项目:国家自然科学基金项目(21577130,21677131)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(21577130,21677131)

汞是最受全球关注的环境污染物之一,它是一种特殊的、毒性极强的生物非必需重金属元素,且具有很强的生物积累性和神经毒性,甲基汞是常见汞形态中毒性最大的一种。水体及食物中低浓度的甲基汞能通过生物积累和生物放大作用被鱼类直接富集并蓄积在体内,富集倍数可达 $10^4\sim 10^{11}$ 。研究表明,鱼体内85%~90%汞为甲基汞<sup>[2-3]</sup>,人类摄入甲基汞浓度较高的鱼类时,健康会受到很大的威胁。

近年来,我国近海渔业资源严重衰退,捕捞渔场大面积缩减,随着我国相关产业政策扶持和科技进步等因素的激励,海水养殖业获得了迅猛发展。目前,我国是全球最大的海水养殖国家,2010年,全球养殖渔业年产量达到5987万t,而中国大陆全年产量为3673万t,达到全球产量的61%<sup>[4]</sup>。然而,水产养殖过程中产生大量的污染物会对自身养殖水体造成严重的污染,如鱼类粪便和未食用的鱼粮等有机废物的不断积累、水体富营养化以及药物滥用等<sup>[5]</sup>。

研究证实,摄食水产品是人类摄入甲基汞的最主要途径。汞在水生生态系统中的形态转化已引起了广泛的重视,现有研究主要关注水库或海洋中野生鱼类对汞的生物富集作用<sup>[6-7]</sup>,但是海洋养殖鱼类中汞污染的监测数据和汞在养殖鱼类中不同器官的分布研究较少。调查海洋养殖鱼体中各器官组织的汞污染情况甚为重要,这直接关系到人类通过食用海洋水产

品所造成的汞暴露情况。据此,本研究的目的是:(1)调查浙江省典型海洋养殖鱼体中汞的污染状况;(2)分析海洋养殖区典型养殖鱼体各器官组织中汞形态的分布特征。

## 1 材料与方法

### 1.1 采样地点

浙江省为我国渔业养殖大省,主要渔业养殖区域为沿海的宁波市、舟山市、温州市等。本研究主要依据养殖规模、养殖区域水域条件(半封闭式内港和开放海域)以及养殖时间长短等因素选择宁波市象山港和舟山市六横岛渔业养殖区为采样地点(图1)。

象山港地处浙江省东部沿海,是宁波东部沿海半封闭性港湾,北靠杭州湾,南邻三门湾,东北通过佛渡水道、双屿门水道与舟山海域毗邻,东南通过牛鼻山水道与大目洋相通,湾内拥有大小岛屿65个及西沪港、铁港和黄墩港3个次级港湾。象山港流域面积1455 km<sup>2</sup>,岸线全长392 km,其中大陆岸线260 km<sup>[8]</sup>,港内渔业养殖已历10年左右。

六横岛位于舟山南部海域,隶属舟山市普陀区。境域东濒东海,南部海域与象山县海域相连,东北隔港为虾峙门国际航道。舟山渔场海域面积 $1.08\times 10^4$  km<sup>2</sup>,养殖历史约30年。由于受海洋外部因素(如气象、径流和地理条件等)以及外海水域环境影响,该海

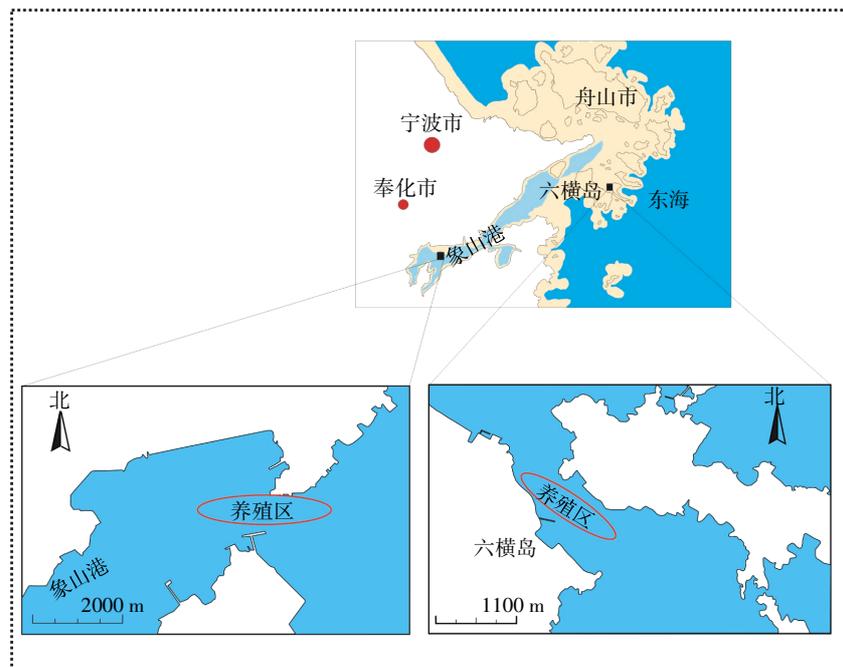


图1 象山港、六横岛样品采样点示意图

Figure 1 Sampling sites around Xiangshan Bay and Liuheng Island

区水文要素的时空变化剧烈,均一性和保守性较之深海或大洋差<sup>[9]</sup>。

## 1.2 样品采集

鲈鱼(*Perca fluviatilis*)、黑鲷(*Acanthopagrus schlegelii*)、红鲷(*Lutjanus campechanus*)是浙江东南沿海网箱养殖的主要鱼类,尤其鲈鱼在象山港的养殖量占60%以上<sup>[10]</sup>。黑鲷为肉食性鱼类,鲈鱼、红鲷为杂食性鱼类。这三种养殖鱼类具有生长速度较快、肉质优良、养殖管理方便、成活率高、经济价值较高等特点,在象山港和六横岛被广泛养殖,并且是目前国内外比较畅销的大宗产品。因此,本研究分别在象山港和六横岛渔业养殖区采集以上三种网箱养殖鱼类,鱼龄1~2年,共计32尾,其中黑鲷和红鲷在两地各采集5尾,鲈鱼在两地各采集6尾。同时,在两地渔民处采集了鱼饲料,一种是杂鱼,为海洋捕捞过程中的小鱼小虾,一种是市售颗粒鱼粮饲料,每种饲料为一个样品。所有样品采集后放入冰箱冷冻,带回实验室后在常温条件下解冻,用去离子水洗净,晾干,记录鱼长、体质量。黑鲷体长范围为27~33 cm,质量约0.5 kg;鲈鱼体长范围为39~46 cm,质量约1 kg;红鲷体长范围为39~45 cm,质量约1 kg。用手术刀切取背皮、肚皮、背肌肉、肚肌肉、肝脏、心脏、大肠、胃、鱼鳞、鳃等样品并依次称重,样品经冷冻干燥机干燥后,称重计算含水率。干燥后的样品用不锈钢粉碎机粉碎或用玛瑙研钵磨碎待测。取样工具和储存样品容器等,按汞元素分析的质量控制要求进行清洗净化<sup>[11]</sup>。

## 1.3 样品测定方法

总汞测定:称取0.100 0~0.200 0 g干鱼样于25 mL比色管中,加入5 mL HNO<sub>3</sub>,比色管口放上漏斗,在通风橱内水浴消煮(95 ℃)4 h,消解完全后,加入少许超纯水和0.5 mL BrCl溶液,摇匀,用超纯水定容<sup>[11]</sup>。

鱼体甲基汞的测定采用碱消解-水相乙基化结合气相色谱(GC)冷原子荧光(CVAFS)测定<sup>[12]</sup>。操作步骤如下:准确称量0.100 0~0.200 0 g干鱼样到离心管中,加5 mL 20 mg·L<sup>-1</sup>的KOH溶液,在水浴锅中加热(75~80 ℃)约3 h,然后用超纯水定容到45 mL,摇匀待测。

样品总汞以及甲基汞分析采用气相色谱-冷原子荧光法,所用仪器为Brooks Rand(美国)测汞仪。

## 1.4 数据分析与质量控制

采用生物样品标准物质 Tort-3(NRCC,加拿大)、方法空白、样品平行和加标回收率等方法进行质量控制。

总汞测定方法的最低检出限为0.006 ng·g<sup>-1</sup>,甲基汞测定方法的最低检出限为0.002 ng·g<sup>-1</sup>。总汞与甲基汞的样品平行误差率分别为7.86%和6.79%,总汞与甲基汞的加标回收率分别为89.3%~107%和75.1%~104%。

## 2 结果与分析

### 2.1 象山港鱼体汞在各器官组织中的分布特征

象山港三种鱼各器官组织中总汞含量范围为2.19~419 ng·g<sup>-1</sup>,平均值为52.9 ng·g<sup>-1</sup>。黑鲷的总汞含量(平均107±29.1 ng·g<sup>-1</sup>)显著( $P<0.01$ )高于鲈鱼(平均32.1±4.10 ng·g<sup>-1</sup>)和红鲷(平均34.1±9.39 ng·g<sup>-1</sup>)。各器官组织中甲基汞含量范围为0.109~165 ng·g<sup>-1</sup>,平均值为32.1 ng·g<sup>-1</sup>。与总汞分布一致,甲基汞也表现为黑鲷(57.1±14.2 ng·g<sup>-1</sup>)显著( $P<0.01$ )高于红鲷(23.3±6.31 ng·g<sup>-1</sup>)和鲈鱼(21.1±4.21 ng·g<sup>-1</sup>)。

图2a为这三种鱼类各器官组织中总汞含量分布情况。其中黑鲷的背肌肉(178±38.0,149~233 ng·g<sup>-1</sup>)、肚肌肉(185±33.3,164~236 ng·g<sup>-1</sup>)和肝脏(271±114,150~419 ng·g<sup>-1</sup>)显著( $P<0.01$ )高于其他部分,其后按大小顺序依次是心脏、肚皮、背皮、鳃、肠胃和鱼鳞。统计性结果也表明:象山港鲈鱼的心脏和肌肉组织中汞含量(56.5~89.5 ng·g<sup>-1</sup>)显著( $P<0.01$ )高于其他部分(2.48~39.1 ng·g<sup>-1</sup>);红鲷的肝脏和肌肉组织中汞含量(41.9~113 ng·g<sup>-1</sup>)也显著( $P<0.01$ )高于其他部分(3.20~53.7 ng·g<sup>-1</sup>)。

三种鱼类各器官组织中甲基汞含量的分布情况如图2b所示。黑鲷的背肌肉(136±21.3,117~165 ng·g<sup>-1</sup>)、肚肌肉(126±27.1,92.8~158 ng·g<sup>-1</sup>)、肝脏(85.2±38.6,46.1~137 ng·g<sup>-1</sup>)和心脏(71.7±25.2,54.4~101 ng·g<sup>-1</sup>)显著( $P<0.05$ )高于其他部分(1.78~37.7 ng·g<sup>-1</sup>),大小顺序为:背肌肉、肚肌肉、肝脏、心脏、鳃、背皮、肚皮、肠胃、鱼鳞。红鲷肌肉组织中甲基汞含量(47.9~78.9 ng·g<sup>-1</sup>)显著高于其他部分(1.68~38.7 ng·g<sup>-1</sup>, $P<0.01$ );鲈鱼也表现为肌肉组织中的甲基汞含量(44.5~58.3 ng·g<sup>-1</sup>)显著( $P<0.01$ )高于其他器官组织(0.109~33.3 ng·g<sup>-1</sup>)。

### 2.2 六横岛鱼体汞在各器官组织中的分布特征

六横岛三种鱼中总汞含量范围为0.698~86.2 ng·g<sup>-1</sup>,平均值为23.5 ng·g<sup>-1</sup>。同象山港鱼汞含量一样,黑鲷的总汞含量(30.5±8.17 ng·g<sup>-1</sup>)显著( $P<0.01$ )高于鲈鱼(24.2±7.32 ng·g<sup>-1</sup>)和红鲷(16.8±4.34 ng·g<sup>-1</sup>)。该地鱼体甲基汞含量范围为0.135~58.6 ng·g<sup>-1</sup>,平均值为14.2 ng·g<sup>-1</sup>。同样表现为黑鲷(19.3±4.14 ng·g<sup>-1</sup>)显著

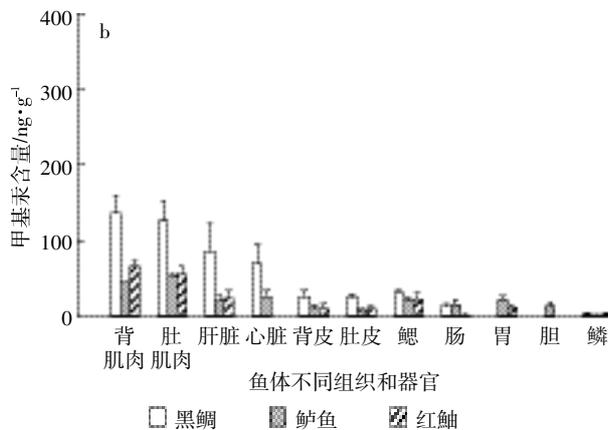
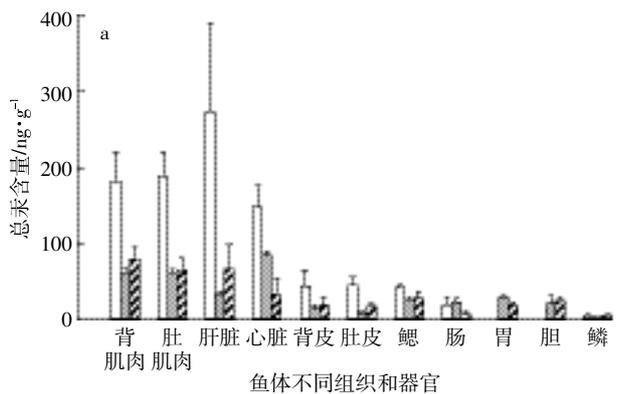


图2 象山港鱼体总汞和甲基汞在不同器官组织中的分布  
Figure 2 THg and MeHg distribution in different fish tissues from Xiangshan Bay

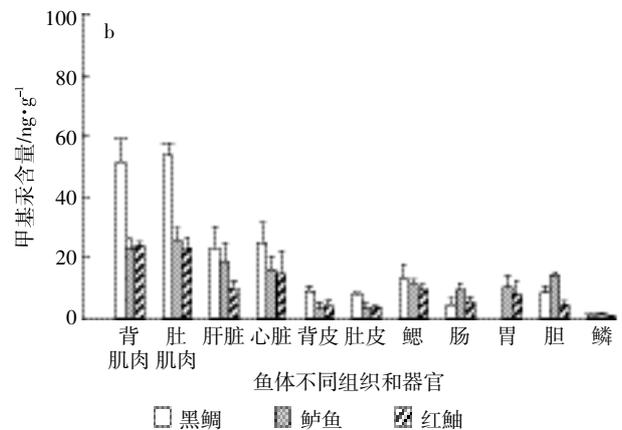
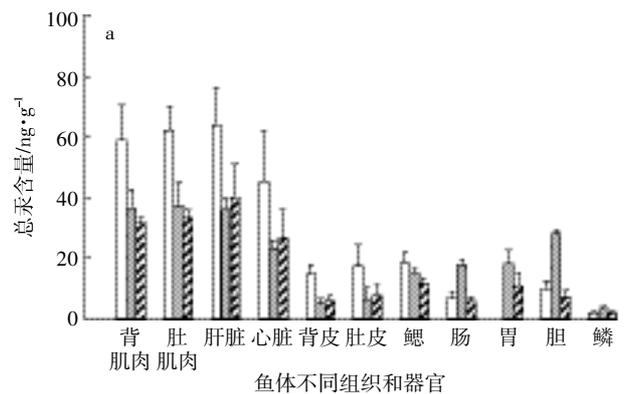


图3 六横岛鱼体总汞和甲基汞在不同器官组织中的分布  
Figure 3 THg and MeHg distribution in different fish tissues from Liuheng Island

( $P < 0.01$ ) 高于鲈鱼 ( $13.5 \pm 3.66 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ ) 和红鲷 ( $9.70 \pm 2.62 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ )。

图 3a 为六横岛三种鱼类各器官组织中总汞含量分布情况。黑鲷的背肌肉、肚肌肉、肝脏的总汞含量 ( $61.7 \pm 9.99 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ ) 显著 ( $P < 0.01$ ) 高于其他器官组织 ( $17.7 \pm 15.1 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ ); 鲈鱼的肝脏和肌肉组织中总汞含量 ( $33.7 \pm 12.0 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ ) 显著 ( $P < 0.05$ ) 高于其他部分 ( $20.5 \pm 19.2 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ ); 红鲷的肝脏与肌肉组织中总汞含量 ( $34.6 \pm 7.45 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ ) 显著 ( $P < 0.01$ ) 高于鱼体其他器官组织 ( $9.97 \pm 8.14 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ )。各器官组织中总汞含量大小顺序大致为: 肝脏 > 肌肉 > 心脏 > 鱼鳃 > 其他内脏 > 表皮 > 鱼鳞。

图 3b 为六横岛三种鱼类各器官组织中甲基汞含量分布情况。整体表现为肌肉组织普遍高于其他部分: 黑鲷、鲈鱼、红鲷肌肉组织中甲基汞含量范围分别为  $43.9 \sim 58.2$ 、 $18.0 \sim 30.0$ 、 $19.2 \sim 27.7 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ , 显著 ( $P < 0.05$ ) 高于同种鱼体其他器官组织 ( $0.322 \sim 32.3$ 、 $0.348 \sim 27.7$ 、 $0.135 \sim 21.0 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ )。

### 2.3 鱼体各器官组织中的绝对汞含量

图 4 为两地鱼体各器官组织中总汞绝对含量和甲基汞绝对含量, 可明显看出两地鱼体背肌肉和肚肌肉中绝对汞含量显著 ( $P < 0.01$ ) 高于其他部分, 其次为肝脏。表明两地鱼体肌肉组织不仅单位质量的汞含量高, 而且肌肉部分在鱼体汞含量中也贡献了绝大部分的汞。

### 2.4 两地鱼体甲基汞占总汞的比例

图 5a 为象山港鱼体各器官组织中甲基汞含量占总汞含量的比例图。象山港鱼体甲基汞占总汞比例范围为  $24.1\% \sim 92.9\%$ , 平均值为  $64\%$ , 其中鱼鳃和肌肉中甲基汞占总汞比例最高, 分别为  $81.9\%$ 、 $79.2\%$ , 肝脏最低, 平均值为  $44\%$ 。

图 5b 为六横岛鱼体各器官组织中甲基汞含量占总汞含量的比例图。含量范围为  $31.3\% \sim 89.5\%$ , 平均值为  $60.7\%$ , 与象山港基本一致, 也表现为肌肉和鱼鳃中甲基汞所占比例最高, 分别为  $75.1\%$ 、 $74.7\%$ , 肝脏最低, 平均值为  $38.1\%$ 。

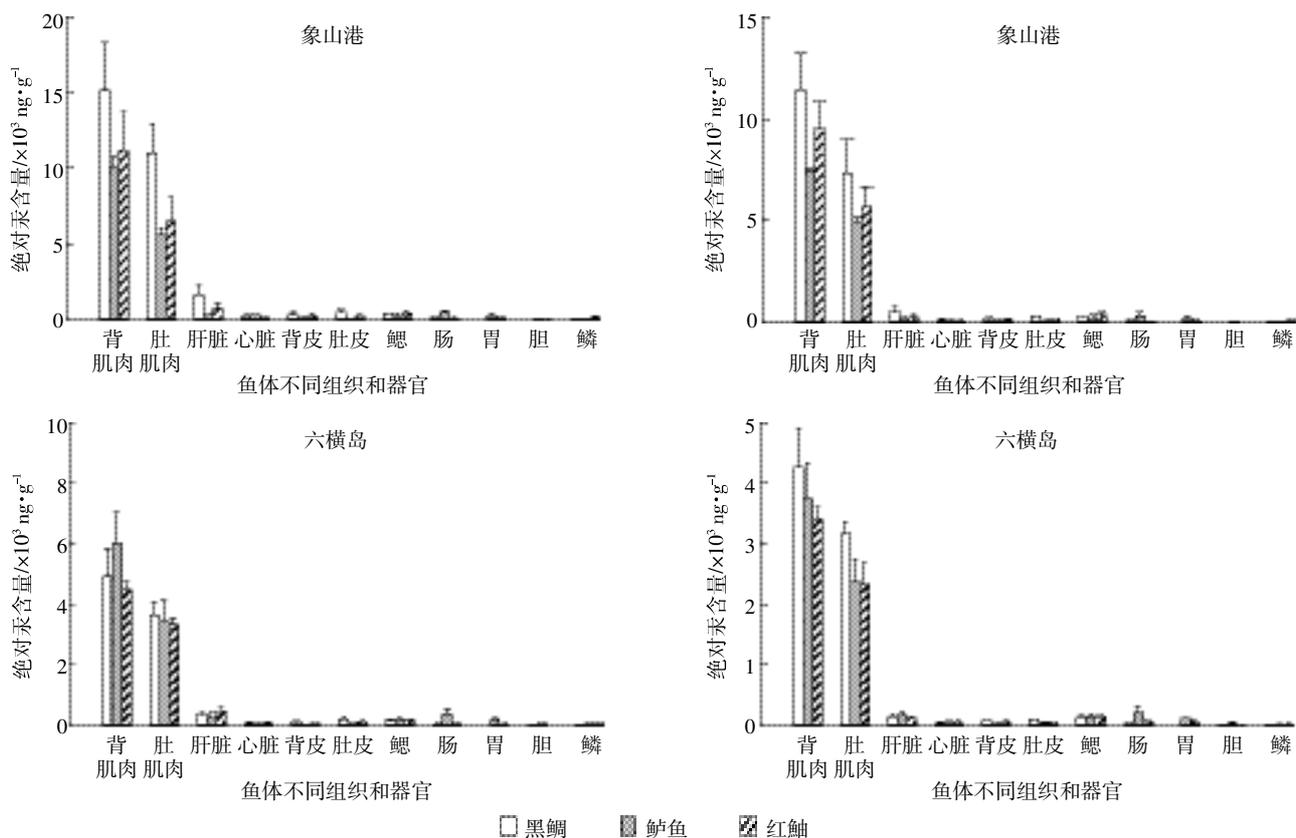


图4 鱼体中总汞和甲基汞在不同组织和器官中的绝对汞含量  
Figure 4 Mass distribution of THg and MeHg in different tissues

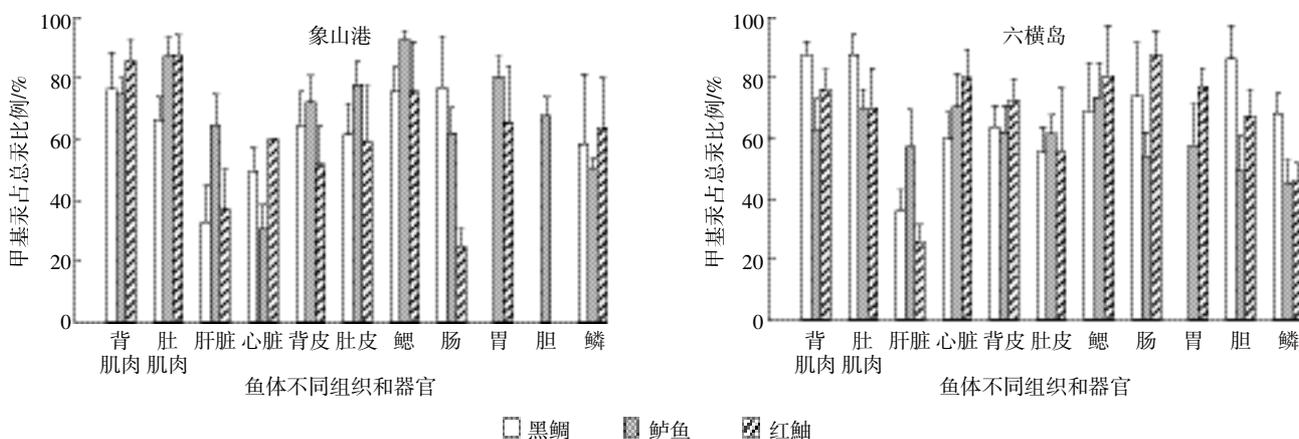


图5 鱼体各器官组织中甲基汞占总汞比例分布  
Figure 5 the percentage of MeHg to THg in different fish tissues

### 2.5 两地主要鱼饲料中汞含量

象山港、六横岛杂鱼总汞含量分别为 25.3、22.4  $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ , 甲基汞含量分别为 12.9、9.23  $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ ; 象山港、六横岛颗粒饲料总汞含量分别为 2.80、2.73  $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ , 甲基汞含量分别为 1.41、1.38  $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 。如前所述, 鱼饲料来自于当地渔民, 采集时期分别只有一种饲料。因此, 数据无法进行统计性分析。但是, 可以看出杂鱼饲料

汞含量明显高于颗粒饲料汞含量, 与之前的研究结果相类似<sup>[13]</sup>。

## 3 讨论

### 3.1 鱼体各器官组织中汞含量差异性分析

鱼类可以通过鳃的呼吸直接吸收水体中的溶解态甲基汞, 但多数研究认为鱼体对甲基汞的富集方式

主要是通过摄取食物而累积<sup>[14-15]</sup>。象山港水体溶解态甲基汞为(0.058±0.012) pmol·L<sup>-1</sup><sup>[16]</sup>,六横岛水体溶解态甲基汞为(0.045±0.021) pmol·L<sup>-1</sup><sup>[17]</sup>。两者之间虽无显著差异,但是从鱼类样品汞含量分析结果可知,两地均表现为肉食性鱼类黑鲷的汞含量明显高于杂食性鱼类(鲈鱼和红鲷)。这也进一步证明了食物才是鱼体甲基汞的主要来源。

两地鱼体各器官组织中汞含量都表现为肌肉组织明显高于其他组织器官,肝脏和心脏中汞含量次之,其次为胃和鱼鳃。汞浓度在不同种类鱼体的某些器官和组织中呈现差异性,例如背部肌肉、腹部肌肉、内脏器官、背皮、腹皮等;而在其他组织中则无明显差异,如鱼鳃和鱼鳞中。这主要是由于不同部位汞的来源不同,本研究中有差异性的组织,汞主要来自于食物。由于黑鲷主要食物为杂鱼,而鲈鱼和红鲷的主要食物为人工制成的颗粒饲料,杂鱼汞含量要高于颗粒饲料,在这些组织中汞含量存在差异。而对于无显著差异的组织来说,汞主要来自于生长环境,由于采样地点相同,在鱼鳃、鱼鳞等组织中,其体内汞主要来自水体,故在同一水域中的三种鱼类的鱼鳃、鱼鳞中的汞含量无差异性。

不同组织和器官之间的差异性则主要取决于其不同组织和器官的特点。由于肌肉中大部分为甲基汞,而甲基汞易存在于生物体内的蛋白质组织内,特别是含硫蛋白质及氨基酸(尤其是半胱氨酸)中,故肌

肉中汞含量尤其是甲基汞含量最高<sup>[18]</sup>;肝脏为鱼体内解毒及储存器官,可能参与污染物代谢并富集大量污染物<sup>[19]</sup>,但是肝脏中又能发生去甲基化反应<sup>[20]</sup>,也能通过血液运输将甲基汞贮存在肌肉中<sup>[21]</sup>,因此肝脏中甲基汞含量较肌肉低;鱼鳃浸没在水里,是水及离子交换的主要场所<sup>[22]</sup>,是可溶性金属汞的主要入口,因此鱼鳃中汞的含量可直接反应水体中汞的污染状况。在本研究中,两地鱼体中鱼鳃汞含量在不同种类之间都没有明显差异,可以进一步证实鱼鳃汞含量仅与生长环境有关,与鱼食中汞含量无关。胃肠道由于含有大量的甘油三脂,可在胃内产生直链脂肪酸,能与汞结合,促使汞的吸收<sup>[23]</sup>。

### 3.2 鱼体总汞、甲基汞和体质量、体长的关系

许多研究认为,鱼体汞含量不仅与水环境的汞含量有关,而且与鱼的种类、年龄、体长、体质量、生活习性等密切相关<sup>[24-25]</sup>。鱼体中汞浓度和其体质量、体长之间的关系反映了重金属积累的典型过程。象山港、六横岛地区肉食性鱼类(黑鲷)和杂食性鱼类(鲈鱼、红鲷)各器官组织中总汞、甲基汞含量与其体质量、体长的相关性分析结果如表1所示。结果显示除了六横岛肉食性鱼类中背皮甲基汞和体长呈极显著负相关( $P<0.01$ ),杂食性鱼类肚肌肉中甲基汞与体质量呈显著正相关( $P<0.05$ ),象山港杂食性鱼类肚肌肉中的总汞、甲基汞与体质量呈显著正相关( $P<0.05$ )外,其他数据并无规律性且无相关关系,与前人研究结

表1 鱼体各组织总汞甲基汞含量与其体质量、体长相关性分析

Table 1 Pearson correlation analysis between THg, MeHg concentration and fish weight and length

采样点	器官	肉食性				杂食性			
		体质量		体长		体质量		体长	
		总汞	甲基汞	总汞	甲基汞	总汞	甲基汞	总汞	甲基汞
象山港	背肌肉	0.321	-0.435	0.425	-0.329	0.247	0.366	-0.575	-0.643
	肚肌肉	0.155	0.326	0.261	0.433	0.741*	0.764*	-0.195	-0.329
	肝脏	0.510	0.792	0.593	0.841	0.206	0.543	-0.514	0.408
	心脏	-0.495	0.997	-0.333	0.967	-0.133	0.094	0.465	0.241
	背皮	-0.052	-0.078	0.049	0.034	0.474	0.038	-0.448	-0.131
	肚皮	0.127	-0.470	0.194	-0.373	0.106	0.242	-0.604	-0.608
六横岛	背肌肉	0.683	-0.747	-0.891	-0.945	0.211	0.598	0.337	0.385
	肚肌肉	0.067	0.447	-0.478	-0.119	0.365	0.710*	0.477	0.495
	肝脏	0.454	0.312	-0.139	-0.383	0.066	-0.120	-0.227	-0.005
	心脏	0.139	-0.714	-0.533	-0.826	-0.023	-0.266	0.121	0.035
	背皮	-0.650	-0.708	-0.733	-0.994**	0.560	0.478	0.636	0.524
	肚皮	-0.681	-0.031	-0.186	-0.633	0.059	-0.218	-0.209	-0.242

注:\*表示两者之间关系显著( $P<0.05$ ),\*\*表示两者之间关系极显著( $P<0.01$ )。下同。

Notes:\*indicate significant correlation between two factors( $P<0.05$ );\*\*indicate significant correlation between two factors( $P<0.01$ ). The same below.

果<sup>[26-28]</sup>不一致。这是因为所采集鱼类为养殖鱼类,其食物主要来源为饲料,缺乏明显的生物积累特征。

### 3.3 鱼体汞的生物富集系数

鱼体内汞的生物富集系数(Bio-concentration factor, BCF)<sup>[24]</sup>通常可以由鱼体内污染物含量与对应饲料中的污染物含量计算得到<sup>[29-31]</sup>:

$$BCF = \frac{\text{鱼体内汞含量}(\text{ng} \cdot \text{g}^{-1})}{\text{饲料中汞浓度}(\text{ng} \cdot \text{g}^{-1})}$$

由此计算出象山港、六横岛采集鱼类的总汞和甲基汞生物富集系数如表2所示。由计算结果可看出,鱼体甲基汞的生物富集系数基本要比其总汞生物富集系数高,并且肌肉组织中甲基汞BCF高于肝脏和

心脏,说明与总汞相比,甲基汞在鱼体中尤其是肌肉中具有更强的富集特性。这主要是因为鱼体对无机汞及甲基汞的同化吸收存在显著差异,无机汞主要是被吸附到细胞膜而甲基汞则是进入细胞质,鱼体消化细胞质并排泄膜类物质,当摄入大于排泄时甲基汞则在鱼体内富集<sup>[32]</sup>。

### 3.4 与其他研究比较

表3表示出本研究与我国其他地区海水养殖产品肌肉中汞含量大小的对比,可看出本研究及其他海域鱼体可食用部分甲基汞含量均低于国家肉食鱼类甲基汞含量的标准限定值1000 ng·g<sup>-1</sup>。本研究所得数

表2 象山港、六横岛采集鱼类的汞生物富集系数

Table 2 Bioaccumulation factor of mercury in fish from Xiangshan Bay and Liuheng Island

鱼种名称	器官	象山港		六横岛	
		总汞生物富集系数	甲基汞生物富集系数	总汞生物富集系数	甲基汞生物富集系数
黑鲷( <i>Acanthopagrus schlegelii</i> )	肌肉	7.31	10.2	2.71	5.71
	肝脏	10.8	6.64	2.86	2.52
	心脏	5.87	5.50	2.03	2.70
鲈鱼( <i>Perca fluviatilis</i> )	肌肉	22.2	35.6	13.4	17.5
	肝脏	11.7	15.2	13.0	13.7
	心脏	30.2	18.3	8.46	11.8
红鲷( <i>Lutjanus campechanus</i> )	肌肉	26.1	44.5	11.8	17.1
	肝脏	24.2	17.1	14.5	7.24
	心脏	12.1	16.9	9.64	10.7

表3 我国海水养殖产品中汞含量(湿重)对比(ng·g<sup>-1</sup>)

Table 3 Comparison of marine aquaculture fish among different studies(ng·g<sup>-1</sup>)

鱼种名称	采集地点	总汞	甲基汞	文献
真鲷( <i>Pagrus major</i> )	厦门湾	60±10	50±20	[33]
黑鲷( <i>Acanthopagrus schlegelii</i> )	厦门湾	210±10	200±50	[33]
日本真鲷( <i>Lateolabrax japonicus</i> )	厦门湾	100±20	90±30	[33]
美国红鱼( <i>Sciaenops ocellatus</i> )	厦门湾	40±4	40±10	[33]
海鲫( <i>Ditrema temmincki</i> Bleeker)	黄海海域		12±2	[34]
鲈鱼( <i>Lateolabrax japonicus</i> )	黄海海域		21±4	[34]
真鲷( <i>Pagrosomus major</i> )	黄海海域		74±21	[34]
美国红鱼( <i>Sciaenops ocellatus</i> )	黄海海域		40±6	[34]
卵圆鲳鲙( <i>Trachinotus blochii</i> )	广东省市售	59.2±32.2		[35]
美国红鱼( <i>Sciaenops ocellatus</i> )	广东省市售	60.9±12.1		[35]
红笛鲷( <i>Lutjanus erythropterus</i> )	广东省市售	71.7±24.4		[35]
黑鲷( <i>Acanthopagrus schlegelii</i> )	象山港	185±33.2	132±24.0	本研究
鲈鱼( <i>Perca fluviatilis</i> )	象山港	61.4±4.25	49.5±4.85	本研究
红鲷( <i>Lutjanus campechanus</i> )	象山港	72.2±17.2	61.9±10.4	本研究
黑鲷( <i>Acanthopagrus schlegelii</i> )	六横岛	60.6±9.32	52.7±5.74	本研究
鲈鱼( <i>Perca fluviatilis</i> )	六横岛	37.1±6.66	24.3±3.86	本研究
红鲷( <i>Lutjanus campechanus</i> )	六横岛	32.6±2.24	23.7±2.51	本研究

据虽然略高于其他海域鱼体汞含量,但差异不明显。养殖鱼类鱼体中肌肉部分汞主要来源于食物,饲料中汞的含量对其影响较大。因此,对于养殖鱼体来说,其所食用的饲料决定了其肌肉组织中汞含量的水平。

#### 4 结论

(1)象山港鱼体汞含量明显高于六横岛,主要是由于鱼食中汞含量高因素造成的。象山港和六横岛渔业养殖区鱼体肌肉组织中甲基汞含量分别为 81.0、33.6 ng·g<sup>-1</sup>,均低于国家标准限定值。

(2)鱼体中总汞和甲基汞含量与鱼类食性有关,呈现肉食性>杂食性的趋势。两地鱼体不同器官组织的汞含量差异较大,其中背肌肉>肚肌肉>肝脏>其他器官组织,肌肉组织中汞含量偏高的原因是甲基汞更容易和蛋白质中巯基结合。

(3)两地鱼体总汞、甲基汞与其体重体长的关系特征不明显,主要是由于养殖鱼类生长速度快,其体内汞主要来源于饲料,缺少明显的生物积累特征。

(4)由不同鱼类各组织中汞含量的差异分析可知,肌肉、内脏器官等组织中的汞主要来源于食物,鱼鳃和鱼鳞中汞主要来源于生长水环境。

(5)与总汞相比,甲基汞具有更强的生物富集特性,并且肌肉组织中甲基汞生物富集系数高于肝脏和心脏。

#### 参考文献:

- [1] Stein E D, Cohen Y, Winner A M. Environmental distribution and transformation of mercury compounds[J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 1996, 26(1):1-43.
- [2] Bloom N S. On the chemical form of mercury in edible fish and marine invertebrate tissue[J]. *Canadian Journal of Fisheries & Aquatic Sciences*, 1992, 49(5):1010-1017.
- [3] Campbell L, Verburg P, Dixon D G, et al. Mercury biomagnification in the food web of Lake Tanganyika(Tanzania, East Africa)[J]. *Science of the Total Environment*, 2008, 402(2/3):184-191.
- [4] FAO. Fishery and aquaculture statistics[M]. Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2011.
- [5] Aguado-giménez F, García B. Assessment of some chemical parameters in marine sediments exposed to offshore cage fish farming influence: A pilot study[J]. *Aquaculture*, 2004, 242(1/2/3/4):283-295.
- [6] Burger J, Gochfeld M. Mercury in fish available in supermarkets in Illinois: Are there regional differences[J]. *Science of the Total Environment*, 2006, 367(2/3):1010-1016.
- [7] Sciences R S A O. The madison declaration on mercury pollution[J]. *Ambio*, 2007, 36(1):62-66.
- [8] 刘永超,李加林,袁麒翔,等.人类活动对港湾岸线及景观变迁影响的比较研究——以中国象山港与美国坦帕湾为例[J]. *地理学报*, 2016, 71(1):86-103.  
LIU Yong-chao, LI Jia-lin, YUAN Qi-xiang, et al. Comparative research on the impact of human activities on changes in coastline and landscape in bay areas: A case study with Xiangshangang Bay, China and Tampa Bay, USA[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(1):86-103.
- [9] 张启龙,王凡.舟山渔场及其邻近海域水团的气候学分析[J]. *海洋与湖泊*, 2004, 35(1):48-54.  
ZHANG Qi-long, WANG Fan. Climatological analysis of water masses in Zhoushan fishing ground and adjacent region[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2004, 35(1):48-54.
- [10] 卓华龙,沈庞幼,吴雄飞,等.象山港网箱养殖鲈鱼残饵和排粪情况初步研究[J]. *上海海洋大学学报*, 2007, 16(5):443-447.  
ZHUO Hua-long, SHEN Pang-you, WU Xiong-fei, et al. Preliminary calculations on residual feed and faeces of *Lateo labrax japonicus* cultured in the net cages in Xiangshan Bay[J]. *Journal of Shanghai Fisheries University*, 2007, 16(5):443-447.
- [11] 闫海鱼,冯新斌,商立海,等.天然水体中痕量汞的形态分析方法研究[J]. *分析测试学报*, 2003, 22(5):10-13.  
YAN Hai-yu, FENG Xin-bin, SHANG Li-hai, et al. Speciation analysis of ultra trace levels of mercury in natural waters[J]. *Journal of Instrumental Analysis*, 2003, 22(5):10-13.
- [12] 闫海鱼,冯新斌,LIANG Lian,等. GC-CVAFS 法测定鱼体内甲基汞的分析方法研究[J]. *分析测试学报*, 2005, 24(6):78-80.  
YAN Hai-yu, FENG Xin-bin, LIANG Lian, et al. Determination of methyl mercury in fish using GC-CVAFS[J]. *Journal of Instrumental Analysis*, 2005, 24(6):78-80.
- [13] Liang P, Shao D D, Wu S C, et al. The influence of mariculture on mercury distribution in sediments and fish around Hong Kong and adjacent mainland China waters[J]. *Chemosphere*, 2011, 82:1038-1043.
- [14] Wiener J G, Cope W G, Rada R G. Mercury accumulation in yellow perch in wisconsin seepage lakes: Relation to lake characteristics[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 1990, 9(7):931-940.
- [15] 何天容,吴玉勇,潘鲁生,等.红枫湖鱼体中汞形态分布特征[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2010, 32(7):78-82.  
HE Tian-rong, WU Yu-yong, PAN Lu-sheng, et al. Distribution of mercury species and their concentrations in fish in Hongfeng Reservoir [J]. *Journal of Southwest University(Natural Science Edition)*, 2010, 32(7):78-82.
- [16] 梁鹏,王远娜,尤琼智,等.燃煤电厂周围渔业养殖行为对水生生态环境中汞形态变化的影响[J]. *环境科学*, 2015, 36(8):145-151.  
LIANG Peng, WANG Yuan-na, YOU Qiong-zhi, et al. Influence of marine aquaculture around coal power plant on mercury species change in aquatic ecological environment[J]. *Environmental Science*, 2015, 36(8):145-151.
- [17] 何杉杉,尤琼智,吴胜春,等.渔业养殖区水环境中汞的形态分布[J]. *环境化学*, 2015, 34(10):1911-1917.  
HE Shan-shan, YOU Qiong-zhi, WU Sheng-chun, et al. Distribution of mercury species in aquatic environment in marine aquaculture zones

- [J]. *Environmental Chemistry*, 2015, 34(10):1911–1917.
- [18] Harris H H, Pickering I J, George G N. The chemical form of mercury in fish[J]. *Science*, 2003, 301(5637):1203.
- [19] Gonzalez P, Dominique Y, Massabuau J C, et al. Comparative effects of dietary methylmercury on gene expression in liver, skeletal muscle, and brain of the zebra fish (*Danio rerio*) [J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, 39(11):3972–3980.
- [20] Eagles C A, Ackerman J T, Julie Y, et al. Mercury demethylation in waterbird livers: Dose–response thresholds and differences among species [J]. *Environmental Toxicology & Chemistry*, 2009, 28(3):568–577.
- [21] Wang R, Feng X B, Wang W X. In vivo mercury methylation and demethylation in freshwater tilapia quantified by mercury stable isotopes [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(14):7949–7957.
- [22] Wang R, Wong M H, Wang W X. Coupling of methylmercury uptake with respiration and water pumping in freshwater tilapia *Oreochromis niloticus* [J]. *Environmental Toxicology & Chemistry*, 2011, 30(9):2142–2147.
- [23] 彭德姣, 侯娟, 陈琳, 等. 无机汞在鲤鱼体内生物富集规律的研究 [J]. *毒理学杂志*, 2007, 21(2):129–131.  
PENG De-jiao, HOU Juan, CHEN Lin, et al. A study of the bioconcentration of inorganic mercury in *Cyprinus carpio* [J]. *Journal of Toxicology*, 2007, 21(2):129–131.
- [24] McIntyre J K, Beauchamp D A. Age and trophic position dominate bioaccumulation of mercury and organochlorines in the food web of Lake Washington [J]. *Science of the Total Environment*, 2007, 372(2/3):571–584.
- [25] Ruelas–inzunza J, Meza–lópez G, Pérez–osuna F. Mercury in fish that are of dietary importance from the coasts of Sinaloa (SE Gulf of California) [J]. *Journal of Food Composition & Analysis*, 2008, 21(3):211–218.
- [26] Sharma C M, Borgstrom R, Huitfeldt J S, et al. Selective exploitation of large pike *Esox lucius*: Effects on mercury concentrations in fish populations [J]. *Science of the Total Environment*, 2008, 399(1/2/3):33–40.
- [27] Staudinger M D. Species– and size–specific variability of mercury concentrations in four commercially important finfish and their prey from the Northwest Atlantic [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2011, 62(4):734–740.
- [28] Storelli M M, Barone G, Piscitelli G, et al. Mercury in fish: Concentration vs. fish size and estimates of mercury intake [J]. *Food Additives & Contaminants*, 2007, 24(12):1353–1357.
- [29] Nguyen H L, Leermakers M, Kurunzi S, et al. Mercury distribution and speciation in Lake Balaton, Hungary [J]. *Science of the Total Environment*, 2005, 340(1/2/3):231–246.
- [30] US EPA. Mercury study report to congress Volume III: Fate and transport of mercury in the environment [R]. EPA–452/R–97–005. Washington D. C.; United States Environmental Protection Agency, 1997.
- [31] 蒋红梅. 水库对乌江河流汞生物地球化学循环的影响 [D]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所, 2005.  
JIANG Hong–mei. Effects of hydroelectric reservoir on the biogeochemical cycle of mercury in the Wujiang River [D]. Guiyang: Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 2005.
- [32] 徐勤勤. 三峡水库鱼体中汞和甲基汞的分布特征 [D]. 重庆: 西南大学, 2014.  
XU Qin–qin. Distribution characteristics of mercury and methylmercury in fishes in the Three Gorges Reservoir [D]. Chongqing: Southwest University, 2014.
- [33] Onsanit S. 金属在海水网箱养殖鱼类中的生物累积、食物链传递及健康风险评估 [D]. 厦门大学, 2012.  
Onsanit S. Bioaccumulation, trophic transfer of metals in marine caged fish and human risk assessment [D]. Xiamen: Xiamen University, 2012.
- [34] 张红霞. 我国三个常见海鱼消费对健康影响的风险–获益平衡研究 [D]. 太原: 山西医科大学, 2014.  
ZHANG Hong–xia. The health risk assessment for three kinds of marine fish consumption: The balance between benefit and risk [D]. Taiyuan: Shanxi Medical University, 2014.
- [35] Li P, Feng X B, Liang P. Mercury in the seafood and human exposure in coastal area of Guangdong Province, South China [J]. *Environmental Toxicology & Chemistry*, 2013, 32(3):541–547.