

乌江渡水库养殖鱼类汞及脂肪酸的组成特征

林丹¹ 林晶¹ 丁丽¹ 杨光红¹ 闫海鱼^{2*}

(¹贵州医科大学公共卫生学院, 贵阳 550025; ²中国科学院地球化学研究所, 环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550081)

摘要 为了评估网箱鱼营养价值, 了解乌江渡水库养殖鱼的汞含量及脂肪酸的组成, 随机采集优势鱼 10 种共计 120 个样品, 测定了总汞、甲基汞以及包括长链不饱和脂肪酸(n6/n3 PUFA) 和 EPA、DHA 等形态的脂肪酸。结果显示: 乌江渡水库养殖鱼的总汞含量在 3.50~185.05 ng·g⁻¹, 平均含量为 23.90 ng·g⁻¹; 甲基汞含量在 0.16~49.09 ng·g⁻¹, 平均含量为 7.78 ng·g⁻¹。乌江渡水库养殖鱼汞含量总体较低, 均未超过我国水产品食用安全标准。同时, 样品中的人体必需脂肪酸 n3 PUFA 中的 EPA+DHA 含量以鲫鱼最高, 肉食性的鲢鱼最低。通过对 n6/n3 PUFA 比值分析发现, 乌江养殖鱼除了富含 EPA 和 DHA 同时也富含较高的 n6PUFA。对于乌江渡水库养殖鱼来说, 武昌鱼、白鲢、草鱼、青鱼以及丁桂鱼是含有较高 EPA+DHA 和较低甲基汞的鱼种, 具有较高的营养价值。

关键词 养殖鱼; 汞含量; 不饱和脂肪酸; 人体健康

Composition characters of mercury and fatty acids in cultured fish from Wujiangdu Reservoir. LIN Dan¹, LIN Jing¹, DING Li¹, YANG Guang-hong¹, YAN Hai-yu^{2*} (¹School of Public Health, Guizhou Medical University, Guiyang 550025, China; ²The State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China).

Abstract: To evaluate the nutrient value and estimate the mercury concentration and fatty acids composition in the cultured fishes of Wujiangdu Reservoir, we randomly collected 120 samples of 10 dominant fish species. The concentrations of THg, MeHg and polyunsaturated fatty acids (n6/n3 PUFA) and DHA and EPA (speciation of fatty acids) in fishes were analyzed. The results showed that the concentration of THg in cultured fishes varied from 3.50 to 185.05 ng·g⁻¹, with an average value of 23.90 ng·g⁻¹. The concentration of MeHg varied from 0.16 to 49.09 ng·g⁻¹, with an average value of 7.78 ng·g⁻¹. The concentrations of THg in cultured fishes were low, and did not exceed the limit of provisions of China's edible standards of contaminants in aquatic products. Furthermore, the content of EPA + DHA in n3 PUFA, the essential fatty acids to human body, was the highest in crucian carp, and the lowest in carnivorous catfish. After analyzing the ratio of n6/n3 PUFA of samples, we found that the fishes enriched with n6 PUFA as well as EPA and DHA. In conclusion, *Parabramis pekinensis*, *Hypophthalmichthys molitrix*, *Ctenopharyngodon idellus*, *Mylopharyngodon piceus*, and *Tinca tinca* are fishes with higher concentration of EPA and DHA and lower concentration of MeHg, being better dietary for human health.

Key words: cultured fish; mercury concentration; unsaturated fatty acids; human health.

汞是受全球关注的污染物之一, 特别是甲基汞极易在水生食物链积累、传输和生物放大。同时, 水产品又是人类优质蛋白和不饱和脂肪酸的重要来

源。特别是 n-3 长链不饱和脂肪酸(n-3 PUFA) 如二十碳五烯酸(EPA) 和二十二碳六烯酸(DHA), 不仅能够有效预防心血管疾病(Undeland *et al.*, 2004), 而且对婴幼儿眼部和脑部发育起着重要的作用(He *et al.*, 2004), Walker *et al.*, 2010)。但人体对于这些有益脂肪酸的合成效率极低, 必须从日常食

国家自然科学基金项目(41273099、40973083、41563012)、中瑞汞管理研究框架计划(SmaReF 项目号: D0697801) 资助。

收稿日期: 2017-09-19 接受日期: 2017-12-27

* 通讯作者 E-mail: yanhaiyu@vip.skleg.cn

物中补充获得,特别是鱼类,然而野生鱼和海洋鱼资源有限,水产养殖成为水产品的主要来源,近十年来,我国74%以上的出口水产品是靠水产养殖提供(FAO 2010)。因此,评估鱼类体内脂肪酸与汞的相互作用关系有着重要意义。

内陆养殖主要在池塘和水库进行,尽管大部分研究认为网箱养殖的鱼类普遍汞含量相对较低,却忽视了网箱鱼的食物通常是人工饵料,在低汞含量的同时,其有益脂肪酸的含量也可能与野生鱼有很大差异。同时,水产养殖导致沉积物中有机质的增加会显著增强水体汞的甲基化(孟博 2011)。因此,有必要清楚了解网箱鱼的营养价值。

水产养殖作为水库的一个重要功能,在全国各地均有分布。乌江流域是西南地区最为重要的水系之一,随着乌江流域梯级电站的开发,已建成13级大中型水库,这些水库均有不同程度的水产养殖。因此,本研究以乌江渡水库主要养殖区的优势种养殖鱼体为代表,调查该养殖鱼体中汞污染状况及脂肪酸的组成情况,为人体水产品摄入健康风险评估提供数据支持。

1 材料与方法

1.1 采样地点

乌江渡水库位于贵州境内息烽县和遵义县交界附近的乌江干流中部,水库总容量23亿 m^3 ,正常水位760 m,平均水深154 m,干流库长76 km,水库总面积48 km^2 。乌江渡水库属季节调节水库,网箱养鱼始于1999年,至2005年后呈蓬勃发展趋势,且网箱主要分布于下游和大坝段。据调查乌江渡水库养殖网箱数量达到5000多口网箱,约156户养殖户,年产量高达到15200 t。

1.2 样品采集

样品分别采集于2016年12月和2017年3月,在乌江渡水库养殖区采集主要养殖鱼种10种,共计120尾。采集的鱼种包含草食性鱼:草鱼(*Ctenopharyngodon idellus*)9尾,武昌鱼(*Parabramis pekinensis*)16尾,青鱼(*Mylopharyngodon piceus*)6尾;杂食性鱼:鲫鱼(*Carassius auratus*)8尾,鲤鱼(*Cyprinus carpio*)15尾,丁桂鱼(*Tinca tinca*)11尾;滤食性鱼:白鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)11尾,鳙鱼(*Aristichthys nobilis*)16尾;肉食性鱼:鲶鱼(*Parasilurus asotus*)14尾,江团鱼(*Leiocassis longirostris*)14尾。样品采集后保持鲜活运回实验室进行解剖。记录鱼

种名称、种类、长度及重量等信息,去除鱼鳞后,不锈钢手术刀取背脊部分肌肉约20 g,记录湿重,用锡纸包裹,装入袋中 $-80\text{ }^\circ\text{C}$ 保存。经冷冻干燥后,称量干重用于计算水分含量,然后再用玛瑙研钵研磨成粉状并过60目尼龙筛。测定脂肪酸的样品需装入样品瓶中 $-20\text{ }^\circ\text{C}$ 保存待测。

1.3 样品的测定

鱼样总汞采用酸消解-冷原子荧光法(CVAFS):称取0.1000~0.2000 g干鱼样于25 mL具塞比色管中,加入5 mL优级纯 HNO_3 , $95\text{ }^\circ\text{C}$ 水浴消解3 h,冷却后的消解液加入0.5 mL 30%氯化溴摇匀,最后用超纯水定容至25 mL待测(闫海鱼 2004)鱼样甲基汞的测定:称取0.1000~0.2000 g干鱼样于特氟龙消解罐中,加入5 mL 25% KOH饱和溶液, $75\sim 80\text{ }^\circ\text{C}$ 水浴消解3 h,用 $60\text{ }^\circ\text{C}$ 超纯水定容,GC-CVAFS法测定(闫海鱼 2005)。Brooks Rand model III(产地,美国)测汞仪测定。

鱼样脂肪酸采用国标法测定(GB 5009.168—2016):准确称取2 g干样至烧瓶中甲酯化、内标法,最后用7890A型气相色谱仪(美国Agilent公司)测定。

1.4 质量控制

鱼样汞含量测定采用Tort-3(NRCC,加拿大)作为标准参考物质,同时做5%方法空白、样品平行进行质量控制。标准物质的总汞推荐值为 $292\pm 22\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$,所测值平均为 $284.76\pm 26.36\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$,回收率在98%~102%;甲基汞推荐值为 $137\pm 12\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$,所测值平均为 $142.49\pm 3.88\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$,回收率在101%~106%。脂肪酸内标选取CDAB-CRM47885 37种脂肪酸甲酯混标作为标准物质,通过比对保留时间对脂肪酸进行定性分析,以十一烷酸C11(CDAA-256304,上海安谱)作为内标进行定量分析,样品分析过程同时进行方法空白及15%的样品平行分析,平行样品标准偏差在10%以内。

2 结果与讨论

2.1 鱼样的基本信息

由于本次采集鱼样均为网箱鱼,鱼龄多为2~4冬龄,体型较大,同种鱼样之间体长和体重差距不大(表1)。

2.2 鱼体中汞含量的分布特征

2.2.1 乌江渡水库中鱼样汞含量 乌江渡水库网箱养殖鱼的汞含量结果如图1,总汞含量(湿重)在

表1 乌江渡水库网箱养殖的各种鱼类基本参数

Table 1 Basic parameters of cultured fish species in Wujiangdu Reservoir

鱼种	数量	食性	体长(cm)		体重(kg)	
			均值±标准差	范围	均值±标准差	范围
鲢鱼(<i>Parasilurus asotus</i>)	14	肉食性	64.79±8.18	53~73	2.19±0.83	1.15~2.96
江团(<i>Leiocassis longirostris</i>)	14	肉食性	45.23±5.09	35~52	1.07±0.51	0.33~1.44
鲤鱼(<i>Cyprinus carpio</i>)	15	杂食性	40.47±6.97	27~53	1.04±0.49	0.35~2.10
鲫鱼(<i>Carassius auratus</i>)	8	杂食性	34.75±4.77	28~39	0.79±0.35	0.39~1.06
丁桂鱼(<i>Tinca tinca</i>)	11	杂食性	33.27±1.19	31~35	0.63±0.06	0.59~0.73
鳙鱼(<i>Aristichthys noliis</i>)	16	滤食性	49.13±4.16	41~56	1.40±0.38	0.87~2.15
白鲢(<i>Hypophthalmichthys molitrix</i>)	11	滤食性	52.09±3.65	47~58	1.51±0.33	1.10~2.07
武昌鱼(<i>Parabramis pekinensis</i>)	16	草食性	32.56±4.08	28~39	0.64±0.26	0.29~1.12
草鱼(<i>Ctenopharyngodon idellus</i>)	9	草食性	50.56±8.55	41~65	1.55±0.82	0.60~2.87
青鱼(<i>Mylopharyngodon piceus</i>)	6	草食性	41.83±2.14	39~45	0.97±0.15	0.78~1.19

体重和体长的数据为均数±标准差。

2.98~185.05 $\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 平均含量为 $23.90 \pm 26.55 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$; 甲基汞含量在 $0.16 \sim 49.09 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 平均含量为 $7.78 \pm 8.07 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 。其中以杂食性的鲫鱼和滤食性的鳙鱼汞含量较高, 总汞含量分别为 $75.04 \pm 66.87 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, $48.18 \pm 19.65 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 。根据食性不同分类, 滤食性鱼(鳙鱼、白鲢)总汞含量明显高于草食性及肉食性的鱼类 ($P < 0.01$), 其总汞范围在 $12.75 \sim 89.74 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 均值为 $37.59 \pm 20.99 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 甲基汞含量范围在 $1.88 \sim 34.33 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 均值为 $10.94 \pm 7.48 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 。每个种类鱼样总汞和甲基汞含量变化趋势大致相同。本次研究与已有报道的总汞含量中肉食性>杂食性>滤食性>草食性的结果不同, 洪家渡水库中肉食性鱼汞平均含量为 $130 \pm 45 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 杂食性鱼汞平均含量 $54 \pm 39 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ (姚珩, 2010); 百花湖水库中杂食性的鲤鱼和鲫鱼汞含量均值分别为 23 和 $22 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 草食性的鱼汞为 $14.8 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ (闫海鱼, 2008); 陡河水库中肉食性鱼汞平均为 $76.8 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 杂食性鱼汞平均为 $54.1 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 滤食性鱼汞平均为 $52.2 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ (王明猛, 2014) 与此相比, 乌江渡水库肉食性鱼汞平均为 $17.96 \pm 11.12 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 杂食性鱼汞 $26.37 \pm 41.89 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 并没有表现出顶端食物链中肉食性鱼含有较高的汞含量的现象。另外, 乌江渡水库网箱鱼的总汞占甲基汞的比例较低平均为 33%, 这与同一流域的百花湖、洪家渡及红枫湖等水库的野生鱼的比例相似(百花湖 29.8%, 洪家渡 37.6%, 红枫湖 43%) (何天容, 2010; 闫海鱼, 2008)。与我国《食品污染物限量》标准 (GB 2762—2012) 相比本次采集的养殖鱼汞含量均远远低于该标准限量值(甲基汞: 肉食性鱼类: $< 1000 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$; 非肉食性鱼类: $< 500 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$)。

2.2.2 与其他地区汞含量相比 乌江渡水库养殖

鱼体汞含量水平与我国其他地区对比如表 2 所示, 乌江渡水库养殖鱼总汞含量明显低于内陆野生淡水鱼, 而乌江渡水库养殖鱼与一些沿海城市的养殖鱼相比也偏低, 且与野生鱼不同, 食物链顶端的肉食性鱼类汞含量并不是最高的。本次对采集到的 3 种饲料进行分析, 总汞含量在 $6.09 \sim 28.73 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ (干重), 其中以肉食性的大颗粒型饲料含量最高 $28.73 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 小颗粒(浮游型)总汞含量最低 $6.09 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 。而天然食物链中浮游生物总汞含量一般为 $58.91 \sim 345.85 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ (干重) (龙胜兴, 2017)。因此, 尽管养殖造成水体汞甲基化增强, 但由于养殖鱼的食物来源主要是饲料, 所以对于养殖 2~4 年的鱼类其体内的汞累积依然很少, 饵料投放的汞含量才是鱼体汞的主要影响因素(高雪飞, 2017)。

2.3 鱼体中脂肪酸的含量特征

2.3.1 乌江渡水库鱼样中各脂肪酸含量水平 水产品所含有的脂肪酸包括饱和脂肪酸(SFA)、单不饱和脂肪酸(MUFA)以及多不饱和脂肪酸(PUFA)。

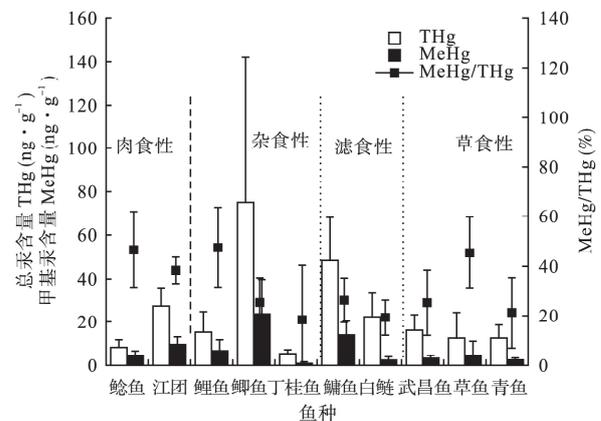


图1 乌江渡水库养殖鱼体的总汞及甲基汞含量分布图
Fig.1 Distribution of THg and MeHg in cultured fish of Wujiang Reservoir

表 2 不同地区养殖鱼及野生鱼汞含量对比

Table 2 Comparison of cultured fish and wild fish mercury levels in different areas

	地区	水体总汞 ($\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$)	鱼体总汞含量 ($\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$)	平均含量 ($\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$)	采样年份	参考文献
野生鱼	陡河水库	2.5~15.1	52.2~133.0	56.4	2013	王明猛 2014
	红枫湖水库	2.5~13.9	10.56~234.4	79.62	2016	何天容 2010
	百花湖水库	6.03	4.2~143.0	28.0	2003	闫海鱼 2008 张勇 2016
	三峡水库	20.51	17.88~117.0	61.0	2011	李楚娴 2014
	太湖	25~31	49.5~98.0	70.7	2013	胡良锋 2014
养殖鱼	乌江渡水库	0.44~3.10	3.5~185.05	23.90	2016~2017	本研究
	沿海市售鱼	-	5.8~590.0	78.31	2012	Du <i>et al.</i> 2012
	广州市售鱼	-	0.11~317	37.2	2013	Li <i>et al.</i> 2013
	福建三都湾	15~46	12~84	32	2004	李秀珠 2011
	福建东山岛	-	13~235	64	2015	Xu <i>et al.</i> 2017

其中 SFA 和 MUFA 氧化为鱼体提供能量而 PUFA 沉积在鱼体内 (Verreth *et al.*, 1994)。值得一提的是, $n-3$ PUFA 中 EPA 和 DHA 是主要发挥有益作用的营养物质。此次采集鱼样的总脂肪含量范围在 $411.44 \sim 3643.31 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$, 平均含量为 $1415.79 \pm 549.80 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ 。其中, 以丁桂鱼总脂肪平均含量最高 ($2097.73 \pm 549.80 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$), 青鱼总脂肪平均含量最低 ($809.49 \pm 482.74 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$) (图 2)。该 10 种养殖鱼类的 SFA 含量范围在 $203.28 \sim 497.87 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$, 平均含量为 $353.53 \pm 139.79 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$; MUFA 的含量范围在 $134.60 \sim 930.78 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$, 平均含量为 $427.84 \pm 289.80 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$; $n-3$ PUFA 含量在 $50.10 \sim 302.56 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$, 平均含量为 $176.98 \pm 74.14 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$; $n-6$ PUFA 含量范围在 $55.41 \sim 480.60 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$, 平均含量为 $253.98 \pm 134.08 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ 。其中 MUFA 含量以丁桂鱼最高, SFA 含量除鲤鱼较低以外其余差别不明显, $n-6$ PUFA 和 $n-3$ PUFA 分别以江团和鲫鱼含量最高。

各类型的脂肪酸除 $n-3$ PUFA 外均与总脂肪存在显著的正相关 (SFA 、 MUFA 、 $n-6$ PUFA 的 r 值分别为 0.774 、 0.947 、 0.731 , P 值均 < 0.05)。

2.3.2 鱼体中 EPA+DHA 含量的比较 EPA 和 DHA 具有较高的生理保健功能, 能有效降低心血管疾病的发生。本次研究的鱼样 EPA+DHA 平均含量为 $148.29 \pm 63.18 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$, 其中以杂食性的鲫鱼含量较高 ($233.56 \pm 112.05 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$); 肉食性的鲢鱼含量最低 ($34.07 \pm 9.95 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$) (图 3)。

与其他地区相比: 太湖野生淡水鱼中太湖新银鱼、刀薊鱼、红鳍原鲃、似刺鳊鮡的 EPA+DHA 平均含量在 $97.7 \sim 188.6 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ (张东平 2012), 与乌江渡水库养殖鱼 EPA+DHA 平均含量 ($148.29 \pm 63.18 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$) 接近; 太湖野生鱼中同种类鱼的 EPA+DHA 平均含量分别是: 武昌鱼 $91.55 \pm 32.43 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$, 鲫鱼 $133.92 \pm 38.40 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$, 鲤鱼 $64.91 \pm 6.32 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$, 白鲢 $128.0 \pm 18.79 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$, 鳊鱼 $94.97 \pm 19.83 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$, 与之相比乌江渡

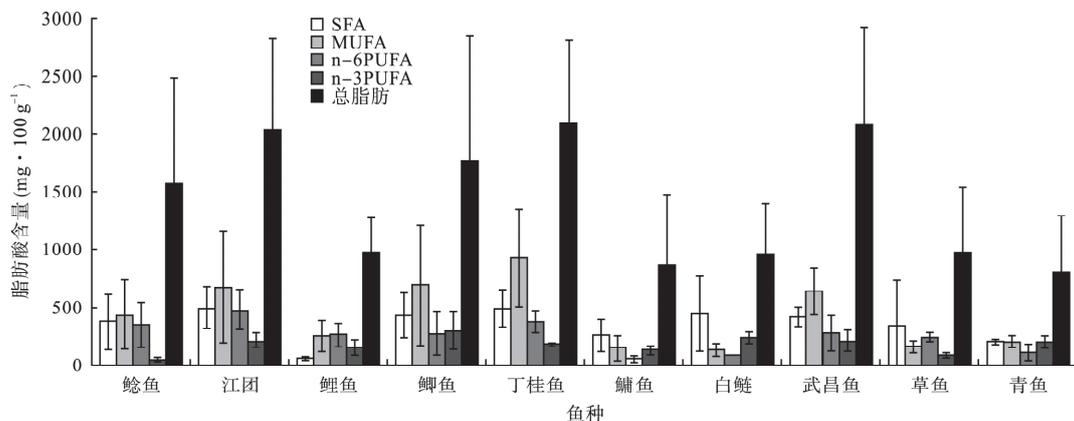


图 2 各种鱼类脂肪酸含量的分布特征

Fig.2 Distribution characteristics of fatty acids in fish

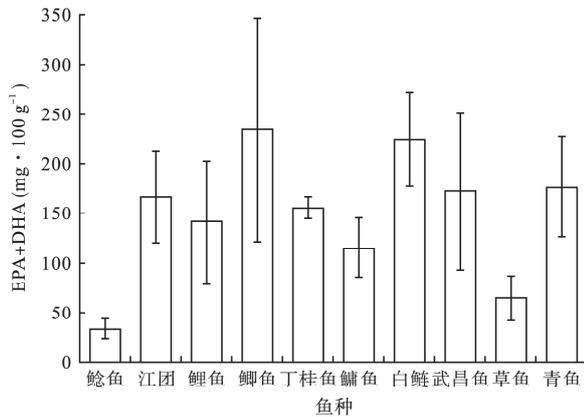


图 3 乌江渡水库鱼体中 EPA+DHA 含量
Fig.3 Concentrations of EPA+DHA in fish in Wujiangdu Reservoir

水库养殖鱼 EPA+DHA 平均含量均高于太湖野生鱼约 2 倍(张东平, 2012)。沿海地区市售淡水产品(多为养殖鱼体) EPA+DHA 含量: 白鲢 $58 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ 、草鱼 $3 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ 、武昌鱼 $6 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ 、鲫鱼 $53 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ (Du *et al.*, 2012) 相比乌江渡水库养殖鱼 EPA+DHA 含量明显较高。与海水鱼类相比, 三文鱼、比目鱼、沙丁鱼和剑鱼所含 EPA+DHA 含量在 $1907 \sim 3276 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ (Siro *et al.*, 2008), 小黄鱼、红三文鱼、三文鱼、带鱼、太阳鱼等海鱼中 EPA+DHA 含量在 $90 \sim 2268 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$, 平均含量为 $785.5 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$, 含量最低的红三文鱼也有 $90 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ (Du *et al.*, 2012), 说明乌江渡水库养殖鱼较国内淡水养殖鱼以及野生鱼类有较高的 EPA+DHA 含量, 而与海水鱼类相比却普遍偏低。

2.3.3 鱼样中 n6 PUFA 与 n3 PUFA 比值分析 研究发现, n6 PUFA 与 n3 PUFA 因共同竞争相同的酶而抑制 n3 PUFA 的吸收(Simopoulos *et al.*, 2002)。世界卫生组织在早期就提出日常饮食中 n6 PUFA 与 n3 PUFA 比值应小于 4(Doughty, 1994)。在心血管疾病的研究中发现该比值为 4/1 时, 心血管疾病的总死亡率下降了 70%(Simopoulos, 2008)。因此, 降低 n6 PUFA 的摄入, 同时增加 n3 PUFA 的吸收对健康具有积极的影响(Wijendran *et al.*, 2004)。本研究中 10 种鱼类的 n6/n3 PUFA 比值范围在 0.14~11.97, 平均值为 2.16 ± 2.29 (图 4), 除了鲢鱼(6.92 ± 2.72) 其余鱼样的该比值均小于 4。太湖中野生鱼中 n6/n3 PUFA 比值在 0.4~1.0, 鄱阳湖中野生鱼的该比值为 0.45~1.19, 相比乌江渡水库养殖鱼该比值较高, 说明野生鱼类优于水库养殖鱼类。乌江渡

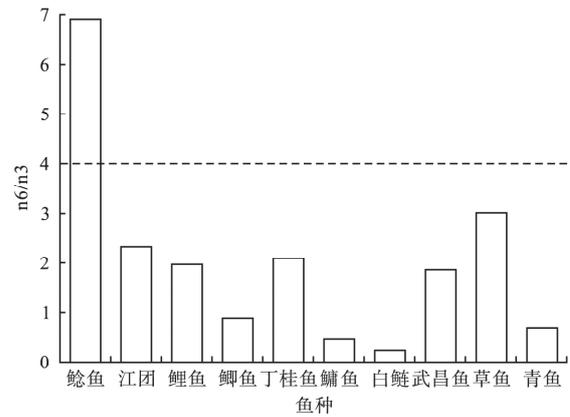


图 4 n6 PUFA 与 n3 PUFA 的比值
Fig.4 The ratio of n6 PUFA/n3 PUFA

水库的养殖鱼虽富含 n3 PUFA, 但同时 n6 PUFA 的含量也相对较高, 可能会降低 n3 PUFA 对预防心血管疾病方面的作用。

2.3.4 甲基汞与 EPA+DHA 共摄入的益害分析 用可接受的日摄入量评估人体 MeHg 暴露水平(EDI) 对人体的潜在危害。使用如下公式计算居民每天消费鱼类摄入甲基汞的量($\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$):

$$EDI = C \times M / BW$$

式中, C 为鱼肉中的甲基汞的含量($\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), M 为每人每天食鱼的量, BW 为人体平均体重 60 kg, 根据中国膳食营养素摄入状况统计结果, 成人每人每天水产品摄入量 55.8 g。

评估 MeHg 暴露与 PUFA 中的 EPA 和 DHA 摄入的结果如表 3 所示, 每日摄食 55.8 g 的鱼肉导致甲基汞的摄入量以鲫鱼最高($1.34 \mu\text{g}$), 其次是江团和鳊鱼; 而每日摄入的 EPA+DHA 的量以鲫鱼和白鲢最高(分别为 685.93 和 626.04 mg)。对于 EDI 值计算所得较高的是食用鲫鱼和鳊鱼, EDI 值分别为 0.0223 和 $0.0132 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, 但均未超过 WHO/PTWI 提出的鱼体中甲基汞的每日推荐食用量 $0.23 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 。在不超甲基汞每日食用推荐值的情况下, 鲫鱼最大允许摄入量为 575 g, 而鳊鱼也仅有 973 g, 其余鱼样均超过 1000 g。

水产品是 n3 PUFA 的良好来源但也是污染物甲基汞的主要摄入来源(Cantoral *et al.*, 2017)。本次研究中, 甲基汞含量最高的鲫鱼低于其他地区报道的含量, 如成都的 $26.1 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ (江桂斌, 1991), 岳阳市鲫鱼含量范围 $41 \sim 109 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ (李子君, 2016), 而含量较低的其他乌江渡水库养殖鱼类也低于已报道的含量, 如广州市售草鱼平均含量为 $6.35 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$

表 3 食用乌江渡水库养殖鱼的甲基汞暴露和多不饱和脂肪酸的摄入情况

Table 3 Intake of MeHg and PUFAs in cultured fish of Wujiangdu Reservoir

鱼的种类	MeHg ($\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$)	EPA+DHA ($\text{mg} \cdot 100 \text{g}^{-1}$)	每日食用量		EDI ($\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)	每日最大允许 摄入量(g)
			MeHg (μg)	EPA+DHA (mg)		
鲢鱼	4.63	170.37	0.26	95.07	0.0043	2980
江团	10.07	722.08	0.56	402.92	0.0094	1370
鲤鱼	7.10	541.33	0.40	302.06	0.0066	1971
鲫鱼	24.02	1229.26	1.34	685.93	0.0223	575
丁桂鱼	1.02	739.09	0.06	412.41	0.0009	13529
鳙鱼	14.18	605.80	0.79	338.04	0.0132	973
白鲢	2.25	1121.94	0.13	626.04	0.0021	6133
武昌鱼	3.62	746.99	0.20	416.82	0.0034	3812
草鱼	4.60	325.38	0.26	181.56	0.0043	3000
青鱼	2.25	842.39	0.13	470.05	0.0021	6133

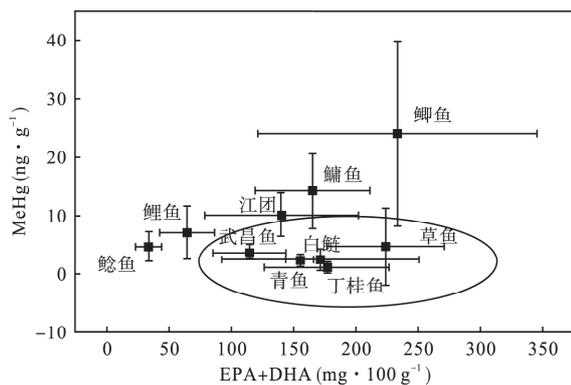


图 5 EPA+DHA 与甲基汞含量关系

Fig.5 Relationship between EPA+DHA and methylmercury

(田文娟 2011) 北京市售武昌鱼平均为 $12.49 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ (童银栋等 2010)。说明乌江渡水库养殖鱼甲基汞含量在国内总体偏低。其中甲基汞含量最低的武昌鱼、白鲢、草鱼、青鱼以及丁桂鱼都具有较高的 EPA+DHA 含量,可作为较好的食用选择;而鲢鱼甲基汞含量虽然很低但是 EPA+DHA 的含量较其他鱼类低,鲫鱼虽有较高的 EPA+DHA 含量,但是甲基汞含量较其他鱼类高,故均不是最好的食用选择。在 Tsuchiya 等(2008)的研究中提出 DHA 与甲基汞极小摄入量的概念,当 DHA 与甲基汞含量比值大于 17 说明个人消费的鱼既能够满足居民膳食营养素参考摄入量 DHA ($100 \text{ mg} \cdot \text{d}^{-1}$) 也不超过美国 EPA 提出的参考剂量(RFD) MeHg $0.1 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$,本研究该比值由于鱼样中甲基汞含量很低导致比值均远远超过 17,丁桂鱼、白鲢及青鱼比值较高,这与图 5 中低汞高 EPA+DHA 含量的鱼种一致。

3 结论

水库富营养化导致水库的汞甲基化程度增强,

但对于水库养殖鱼中总汞及甲基汞含量影响不大,所有样本汞含量均远远低于我国《食品污染物限量》标准(GB 2762—2012)。

富营养化导致的浮游生物群落改变,并未产生预想中的养殖鱼类优质脂肪酸的含量显著下降的现象。但是 n6/n3 PUFA 比值改变说明野生鱼还是优于养殖鱼。

甲基汞与 EPA+DHA 共摄入的益害分析结果显示:武昌鱼、白鲢、草鱼、青鱼以及丁桂鱼都是含有较高 EPA+DHA 和较低 MeHg 含量的水产品摄入的较优选择。

参考文献

- 高雪飞,吴胜春,尤琼智,等. 2017. 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. 农业环境科学学报, **36**(6): 1078-1086.
- 何天容,吴玉勇,潘鲁生,等. 2010. 红枫湖鱼体中汞形态分布特征. 西南大学学报: 自然科学版, **32**(7): 78-82.
- 何天容,吴玉勇,冯新斌. 2010. 富营养化对贵州红枫湖水库汞形态和分布特征的影响. 湖泊科学, **22**(2): 208-214.
- 胡良锋,王永花,王秋英,等. 2014. 北太湖水、沉积物及典型水生生物样品汞的分布特征与生态风险评价. 农业环境科学学报, **33**(6): 1183-1188.
- 江桂斌,顾晓梅. 1991. 毛细管气相色谱-原子吸收法测定生物样品中的有机汞. 色谱, **9**(6): 350-352.
- 李楚娟,孙荣国,王定勇,等. 2014. 三峡水库消落区土壤、植物汞释放及其在斑马鱼体的富集特征. 环境科学, **35**(7): 2721-2727.
- 李秀珠. 2011. 福建三都湾渔业环境和养殖生物体内总汞含量及人体暴露健康风险评价. 中国水产科学, **15**(3): 961-969.
- 李子君. 2016. 2014 年岳阳市水产品中总汞、甲基汞检测结果. 职业与健康, **32**(9): 1206-1207.
- 龙胜兴,何天容,陈 椽,等. 2017. 高原水库富营养水体浮游动物对汞的富集特征. 中国环境科学, **37**(1): 263-

- 270.
- 孟 博,冯新斌,陈春宵,等. 2011. 乌江流域不同营养水平水库水体中汞的含量和形态分布. *生态学杂志*, **30**(5): 951-960.
- 田文娟. 2011. 珠江三角洲地区总汞和甲基汞人体暴露水平与风险评价(硕士学位论文). 广州: 暨南大学.
- 童银栋,郭 明,胡 丹,等. 2010. 北京市场常见水产品中总汞、甲基汞分布特征及食用风险. *生态环境学报*, **19**(9): 2187-2191.
- 王明猛,闫海鱼,李太山,等. 2014. 陡河水库鱼体汞的生物积累初探. *生态毒理学报*, **9**(5): 986-992.
- 姚 珩,冯新斌,闫海鱼,等. 2010. 乌江洪家渡水库鱼体汞含量. *生态学杂志*, **29**(6): 1155-1160.
- 闫海鱼,冯新斌,李仲根. 2004. 半封闭溶样冷原子荧光法测定鱼体中的总汞. *上海环境科学*, **23**(5): 219-220.
- 闫海鱼,冯新斌,Liang L,等. 2005. GC-CVAFS法测定鱼体内甲基汞的分析方法研究. *分析测试学报*, **24**(6): 78-80.
- 闫海鱼,冯新斌,刘 霆,等. 2008. 贵州百花湖鱼体汞污染现状. *生态学杂志*, **27**(8): 1357-1361.
- 张东平. 2012. 太湖鱼体中脂肪酸与PCBs和PBDEs的暴露水平、分布特征和益害分析(博士学位论文). 上海: 上海大学.
- 张 勇. 2016. 贵州百花湖汞污染研究及污染控制成果浅析(硕士学位论文). 山西: 太原理工大学.
- Cantoral A, Batis C, Basu N. 2017. National estimation of seafood consumption in Mexico: Implications for exposure to methylmercury and polyunsaturated fatty acids. *Chemosphere*, **174**: 289-296.
- Doughty J. 1994. Fats and oils in human nutrition. Report of a joint expert consultation. Food and Agriculture Organization of the United Nations and the World Health Organization. *FAO Food & Nutrition Paper*, **57**: 1-147.
- Du ZY, Zhang J, Wang C, et al. 2012. Risk-benefit evaluation of fish from Chinese markets: Nutrients and contaminants in 24 fish species from five big cities and related assessment for human health. *Science of the Total Environment*, **416**: 187-199.
- FAO. 2010. The State of World Fisheries and Aquaculture 2010 (SOFIA): Contributing to food security and nutrition for all. *State of World Fisheries & Aquaculture*, **4**: 40-41.
- He K, Song Y, Daviglius M. 2004. Accumulated-evidence on fish consumption and coronary heart disease mortality. A meta-analysis of cohort studies. *Circulation*, **109**: 21-22.
- Li P, Feng X, Liang P, et al. 2013. Mercury in the seafood and human exposure in coastal area of Guangdong province, South China. *Environmental Toxicology & Chemistry*, **32**: 541-547.
- Simopoulos AP. 2008. The importance of the omega-6/omega-3 fatty acid ratio in cardiovascular disease and other chronic diseases. *Experimental Biology and Medicine*, **233**: 674-688.
- Simopoulos AP, Cleland LG. 2002. Importance of the ratio of omega-6/omega-3 essential fatty acids: Evolutionary aspects. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, **56**: 365-379.
- Sirot V, Oseredczuk M, Bemrah N, et al. 2008. Lipid and fatty acid composition of fish and seafood consumed in France: CALIPSO study. *Journal of Food Composition & Analysis*, **21**: 8-16.
- Tsuchiya A, Hardy J, Burbacher TM, et al. 2008. Fish intake guidelines: Incorporating n-3 fatty acid intake and contaminant exposure in the Korean and Japanese communities. *American Journal of Clinical Nutrition*, **87**: 1867-1875.
- Undeland BI, Ellegard L, Sandberg AS. 2004. Fish and cardiovascular health. *Scandinavian Journal of Food & Nutrition*, **48**: 119-130.
- Verreth J, Coppoolse J, Segner H. 1994. The effect of low HUFA- and high HUFA-enriched *Artemia*, fed at different feeding levels, on growth, survival, tissue fatty acids and liver histology of *Clarias gariepinus* larvae. *Aquaculture*, **126**: 137-150.
- Walker R, Meyland I, Tritscher A. 2010. Joint FAO/WHO Expert committee on food additives. Seventy-second Meeting (JECFA/72/SC).
- Wijendran V, Hayes KC. 2004. Dietary n-6 and n-3 fatty acid balance and cardiovascular health. *Annual Review of Nutrition*, **24**: 597-615.
- Xu X, Wang WX. 2017. Mercury exposure and source tracking in distinct marine-caged fish farm in southern China. *Environmental Pollution*, **220**: 1138-1146.

作者简介 林 丹,女,1993年生,硕士。主要从事职业卫生及环境卫生的研究工作。E-mail: 1159240611@qq.com
责任编辑 魏中青
