

# 乌江流域水库鱼体汞分布特征

蒋红梅<sup>1,2</sup> 冯新斌<sup>1</sup> 阎海鱼<sup>1</sup>

(1. 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 贵州 贵阳 550002;

2. 重庆交通科研设计院 重庆 400067)

**摘要** 本文选取乌江流域上两个典型的水库(乌江渡水库和东风水库)作为研究对象,对不同水库中鱼类汞含量分布特征进行研究。结果显示:乌江渡水库鱼体总汞含量平均为38.0ng/g,甲基汞平均为21.5ng/g;东风水库鱼体总汞平均为36.0ng/g,甲基汞平均为10.2ng/g。乌江渡水库和东风水库鱼体总汞和甲基汞含量明显低于国家食用标准。

**关键词** 乌江渡水库 东风水库 鱼体汞

水库是一种介于河流和湖泊之间的半人工、半自然水体。早在20世纪70年代,有研究者就报道了水库鱼体甲基汞含量普遍高于相邻自然湖泊的现象(Smith, et al., 1974; Abernathy and Cumbie, 1977; Cox, et al., 1979)。研究结果显示,被淹没土壤和植被是水库鱼体甲基汞增高的重要来源(Hecky, et al., 1986, 1987; Jackson, 1988)。到目前为止,几乎所有的研究均指出新建水库内肉食性鱼甲基汞含量往往超过世界卫生组织建议的食用标准(0.5 mg/kg)(Bodaly, et al., 1984; Hecky, et al., 1991; Jackson, 1991; Verdon, et al., 1991; Bergkamp, et al., 2000; Friedl and Wüest, 2002)。国内学者对水库鱼体汞活化效应已做过大量研究,徐小清等(1999b)研究报道三峡库区长江干流江段鱼体汞含量范围为0.04~0.42mg/kg(湿重),并预测长江三峡水库蓄水后库区干流及40条主要支流水域汞的活化效应将增强0.35~1.5倍,鱼体汞将是现在鱼体汞含量的1.4~2.5倍。

乌江流域是我国水电开发的重要流域之一,干流进行了11级开发规划。为研究乌江流域修建水库后“汞活化效应”对鱼体汞含量的影响,我们分别在乌江渡水库(库龄25)和东风水库(库龄11)采集了鱼样进行分析。

## 一、材料与方法

### (一) 鱼样的采集

2004年10月和11月分别于东风水库和乌江渡水库采集鱼样。在东风水库共采集鱼样5类23尾,乌江渡水库共12类33尾。每条鱼样测定其体重、体长,同时在鱼的侧线上方取鳞片若干供鉴定鱼龄。在每条鱼同一部位的背侧肌取肌肉样3~5g,冰冻保存(-20℃),备用。

### (二) 测试方法

1. 总汞:酸消解(8HNO<sub>3</sub>+2H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>),冷原子荧光法测定(阎海鱼等,2005a)。
2. 甲基汞:碱消解-水相乙基化结合气相色谱(GC)-冷原子荧光(CVAFS)测定(阎海鱼等,2005b)。

## 二、结果与分析

### (一) 水库鱼体总汞和甲基汞的分布

不同鱼种的长度、质量和鱼龄统计见表1。在两个水库,鲤鱼均为优势鱼种,从鱼龄鉴定结果来看,两个水库绝大多数鱼均在0+~1+岁之间。东风水库有6尾鲤鱼为2+岁,乌江渡水库仅有1尾鲤鱼为2+岁。在东风水库采集的白甲鱼年龄可达4+岁,可能为野生鱼。

图1、图2分别为东风水库和乌江渡水库鱼体总汞和甲基汞含量(湿重)。整体而言,东风水库鱼体总汞为8.3~80.7ng/g,平均36.0ng/g;甲基汞为2.6~32.2ng/g,平均10.2ng/g;乌江渡水库鱼体总汞为10.2~144.5ng/g,平均38.0ng/g;甲基汞为3.6~87.8ng/g,平均21.5ng/g。可见,两个水库鱼体总汞和甲基汞含量都远远低于国家规定的鱼类食用标准(GB 18064规定鱼体中总汞和甲基汞的浓度阈值分别为0.3mg/kg和0.2mg/kg),但这并不意味着这两个水库不存在建库后鱼体总汞和甲基汞增高的现象。与受汞法生产醋酸的贵州有机化工厂污染的百花湖的鱼体总汞含量相比,乌江渡水库和东风水库鱼体总汞含量要高于百花湖鱼体总汞含量(百花湖鱼体总汞含量平均值为28ng/g,阎海鱼,2008)。这充分说明了乌江渡水库和东风水库存在着水库效应。张明时等(1991)曾报道乌江上游水域鱼体甲基汞含量平均为103ng/g,显著高于我们的测定结果,而当时还未修建东风水库,因此可作为乌江上游河流鱼体甲基汞的本底水平。再有徐小清等(1998)研究认为在长江流域的范围与条件下,河流建坝蓄水后,水库汞活化效应加强,鱼体汞积累的最大限度将是原河流的2.0~3.5倍。因此,同属长江流域的乌江渡水库和东风水库的鱼体甲基汞含量也应增加为103ng/g的2.0~3.5倍。因乌江渡水库和东风水库均有人工专业饲养鱼,而人工饲养鱼普遍生长速度较快,食物链较短,从而对甲基汞的富集能力较低。将鱼龄、体重和体长等指标综合分析发现,我们在两个水库(尤其是乌江渡水库)采集的鱼样绝大多数为人工饲养鱼,因此,鱼体汞和甲基汞含量偏低。

表1 东风水库和乌江渡水库采集鱼样的基本参数

	东风水库				乌江渡水库			
	年龄	尾数	体长/cm	体重/g	年龄	尾数	体长/cm	体重/g
鲤鱼	0+~2+	12	31.1±6.5	487±357	0+~2+	17	32.1±7.0	751±806
鲢鱼		6	36.4±6.1	377±168				
鲫鱼	0+~1+	3	15.8±1.9	73±28	0+	1	16	80
白条	1+	1	14	21				
白甲鱼	4+	1	41	810				
美国斑点叉尾鲟						3	22.3±4.0	121±59
鲑鱼						1	50	2100
鳊鱼						1	70	3100
南方大口鲶					0+	1	35	650
杂交鲶						1	57	1700
花鲢					1+	1	33.5	650
草鱼					1+	1	29	550
加州鲈						2	22.5±4.9	155±88
团头鲂					0+~1+	2	32.5±10.6	619±469
鲟鱼					0+~1+	2	50.5±10.6	650±212

由于条件限制,我们采集的鱼样本量有限,大多数类型的鱼仅采集1尾或2尾样本,显然对探讨不同类型鱼的汞(甲基汞)含量不具代表性。但是,我们将3尾以上的鱼进行分析发现,鱼的生态学特性对不同鱼类平均汞(甲基汞)含量之间的差异影响显著。从东风水库来看,肉食性的鲢鱼总汞含量(平均36.2ng/g)高于杂食性的鲤鱼(总汞平均30.1ng/g),却低于同为杂食性的鲫鱼(总汞平均48.6ng/g);但鲢鱼的甲基汞含量(平均14.5ng/g)明显高于鲤鱼(甲基汞平均10.6ng/g)和鲫鱼(甲基汞平均6.0ng/g)。东风水库鲫鱼总汞含量高于鲢鱼,一方面是因为鲫鱼样本量太少,代表性不足;另一方面可能是采集的鲢鱼多为人工饲养鱼而鲫鱼主要为野生鱼。对乌江渡水库而言,水库内肉食性的美国斑点叉尾鲟的总汞(平均72.6ng/g)和甲基汞(平均45.2ng/g)含量均明显高于杂食性的鲤鱼(总汞平均32.8ng/g,甲基汞平均

17.7ng/g)。两个水库不同类型鱼体汞和甲基汞含量的差异显示：食物链长、营养级较高的鱼类对汞（尤其是甲基汞）的富集能力强于食物链短、营养级相对较低的鱼类。

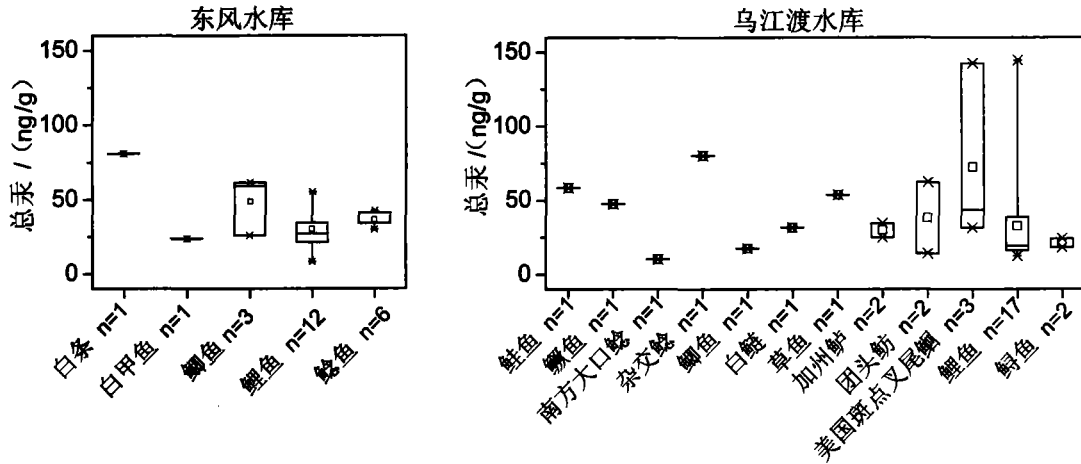


图1 东风水库和乌江渡水库鱼体总汞含量

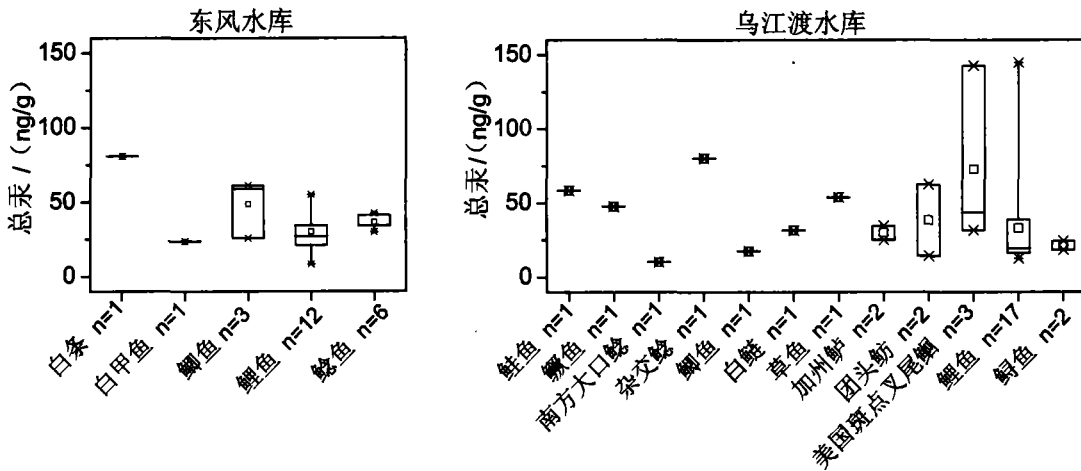


图2 东风水库和乌江渡水库鱼体甲基汞含量

表2 鱼体总汞、甲基汞与鱼体长、体重之间的 Pearson 相关系数

				体长	体重
东风水库	鲤鱼	N = 12	总汞	-0.735 **	-0.699 *
			甲基汞	-0.092	-0.029
	鲢鱼	N = 6	总汞	0.368	0.338
			甲基汞	0.394	0.443
	鲫鱼	N = 3	总汞	-0.981	-0.989
			甲基汞	-0.753	-0.779
乌江渡水库	鲤鱼	N = 17	总汞	-0.159	-0.200
			甲基汞	-0.235	-0.258
	美国斑点叉尾鲟	N = 3	总汞	-0.887	-0.602
			甲基汞	-0.864	-0.563

绝大多数研究表明鱼体汞（甲基汞）含量与其重量、长度之间均具有良好的正相关关系。将两个水库不同类型鱼的汞（甲基汞）含量分别与鱼的重量和长度进行相关分析发现，我们采

集的样本鱼体汞（甲基汞）含量与鱼的重量和长度之间没有相关关系，且大多数类型的鱼体汞（甲基汞）含量随着鱼的重量和长度的增加而呈现降低的趋势（表2）。这并不表明我们的研究结果与前人的研究结果相矛盾，只更加充分地说明了我们采集的鱼样主要为人工饲养鱼。由于人工饲养鱼生长速度过快，对汞（和甲基汞）的摄入量有限，因此汞（甲基汞）含量水平较低。同时，样品中可能也有少许鱼样为野生鱼（如乌江渡水库采集的一尾体重仅为75g的美国斑点叉尾鲴总汞含量为142.5ng/g，甲基汞为87.8ng/g），因此，常用的诸如鱼重量、长度等因子与鱼体汞（甲基汞）的相关性就无法体现。

对不同类型的鱼而言，鱼体甲基汞占总汞的比例差异十分明显。东风水库内肉食性的鲢鱼甲基汞占总汞的比例（平均41.3%）明显高于杂食性的鲤鱼（平均26.0%）和鲫鱼（平均21.8%）；同样，乌江渡水库内肉食性的美国斑点叉尾鲴中甲基汞占总汞的比例（平均62.4%）高于杂食性的鲤鱼（平均58.6%）。此外，我们还观察到东风水库内白甲鱼中甲基汞占总汞的比例较高，为79.7%。尽管白甲鱼为植食性鱼，食物链较短，对甲基汞的富集能力相对较低，但因其年龄较大（4+岁），故体内甲基汞占总汞的比例相对较高。乌江渡水库采集的草鱼（植食性）中甲基汞占总汞的比例也明显低于其它类型的鱼，但是该水库采集的花鲢甲基汞占总汞的比例却高达74.5%，可能与其食物来源为浮游动物有关。

整体而言，东风水库鱼体甲基汞占总汞的比例为8.8%~94.9%，平均为32.0%；乌江渡水库鱼体甲基汞占总汞的比例为27.4%~89.5%，平均为58.8%（图3）。与大多数研究相反，我们的研究结果显示，水库鱼体甲基汞含量以及甲基汞占总汞的比例均为年龄较长的水库（乌江渡水库，库龄25）大于相对年轻的水库（东风水库，库龄11）。这可能是

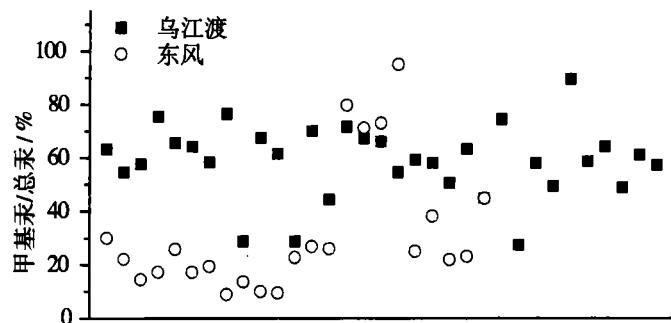


图3 东风水库和乌江渡水库鱼体甲基汞占总汞的比例

由两个水库鱼类食物链底端食物中甲基汞的水平差异引起的。一般而言，鱼类可以通过鳃呼吸直接吸入水体中的溶解态甲基汞，但是大多数研究者认为鱼类富集甲基汞的主要方式是通过摄入食物（Cope, et al., 1990; Meili, 1991）。而通过食物摄入的方式又可大致分为2种（Tremblay, et al., 1996a; 1996b）：① < 40μm 的悬浮颗粒物→20~75μm 的细小有机体（如轮虫、大的浮游植物，但不包括微型浮游生物）→ > 150μm 的大型浮游植物、浮游动物、有机碎屑→鱼类；② 生活在淹没土壤或沉积物中的昆虫幼虫→食碎屑者（双翅类昆虫、毛翅目昆虫）→掠夺者（半翅目昆虫、蜻蜓目昆虫）→鱼类。从水体来看，乌江渡水库全年溶解态甲基汞为0.44 ± 0.19ng/L，东风水库为0.46 ± 0.20ng/L，两个水库水体溶解态甲基汞含量并无明显差异。然而，乌江渡水库无论水体中悬浮颗粒物甲基汞浓度还是沉积物中甲基汞含量都明显高于东风水库，因此，乌江渡水库鱼体甲基汞含量以及甲基汞占总汞的比例均明显高于东风水库。当然，这也进一步证明了食物才是鱼体甲基汞的主要来源。

(二) 水库鱼体汞的生物富集系数

通常，可以用下式来计算鱼体对水体汞的生物富集系数（Bioconcentration factors, BCF）（Nguyen, et al., 2005）：

$$BCF = \frac{\text{鱼体汞（甲基汞）浓度（ng/g）}}{\text{水体中溶解态汞（甲基汞）浓度（ng/ml）}}$$

根据乌江渡水库溶解态总汞为6.8 ± 3.2 ng/L，溶解态甲基汞为0.44 ± 0.19ng/L；东风水库

溶解态总汞为  $5.5 \pm 2.3$  ng/L, 溶解态甲基汞为  $0.46 \pm 0.20$  ng/L。计算得乌江渡水库鱼体总汞的 BCF 为  $5.6 \times 10^3$ , 甲基汞为  $4.9 \times 10^4$ ; 东风水库鱼体总汞的 BCF 为  $6.5 \times 10^3$ , 甲基汞为  $2.2 \times 10^4$ 。与 Meili 等 (1991; 1997) 和 Sjöblom 等 (2000) 的研究结果相一致, 乌江渡水库和东风水库甲基汞的生物富集系数比总汞高一个数量级。但我们研究的两个水库鱼体汞的生物富集系数均处于所报道的鱼体对水体汞生物富集系数的低端 (Watras, et al., 1995), 可见人工饲养鱼类由于生长速度过快, 对水体汞的富集能力很低。

### 三、结 论

1. 乌江渡水库鱼体总汞含量平均为 38.0ng/g, 甲基汞平均为 21.5ng/g; 东风水库鱼体总汞平均为 36.0ng/g, 甲基汞平均为 10.2ng/g。乌江渡水库和东风水库鱼体总汞和甲基汞含量明显低于国家食用标准。

2. 水库鱼体甲基汞占总汞的比例平均为乌江渡水库 58.8%, 东风水库 32.0%。

3. 对乌江流域水库而言, 水库鱼体甲基汞含量以及甲基汞占总汞的比例均为年龄较老的水库 (乌江渡水库, 库龄 25) 大于相对年轻的水库 (东风水库, 库龄 11)。可见, 乌江流域水库鱼体甲基汞含量不取决于水库年龄, 而决定于水库内水生食物链底端食物的甲基汞浓度。

### 参考文献

- [1] Abernathy, A. R., Cumbie, P. M. Mercury accumulation by largemouth bass (*Micropterus salmoides*) in recently impounded reservoirs [J]. *Environm. Cont. Tox.*, 1977, 17: 595 - 602.
- [2] Bergkamp, G., McCartney, M., Dugan P., et al. Dams, ecosystem functions and environmental restoration [Z]. Thematic reviews II. 1, World Commission of Dams, Cape Town, www.dams.org, 2000.
- [3] Bodaly, R. A., Hecky, R. E., Fudge, R. J. P. Increases in fish mercury levels in lakes flooded by the Churchill River diversion, northern Manitoba [J]. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 1984, 41: 682 - 691.
- [4] Cope, W. G., Wiener, J. G., Rada, R. G. Mercury accumulation in yellow perch in Wisconsin seepage lakes: relation to lake characteristics [J]. *Environ. Toxicol. Chem.*, 1990, 9: 931 - 940.
- [5] Cox, J. A., Carnahan, J., Dinuzio, J., et al. Source of mercury in fish in new impoundments [J]. *Environm. Cont. Tox.*, 1979, 23: 779 - 783.
- [6] Friedl, G., Wüest, A. Disrupting biogeochemical cycles—Consequences of damming [J]. *Aquat. Sci.*, 2002, 64: 55 - 65.
- [7] Hecky, R. E., Ramsey, D. J., Bodaly, R. A., et al. Increased methylmercury contamination in fish in newly formed freshwater reservoirs [A]. In: Suzuki T (eds.) *Advances in Mercury Toxicology*. Plenum Press: New York, 1991.
- [8] Hecky, R. E., Bodaly, R. A., Strange, N. E., et al. Mercury bioaccumulation in yellow perch in limnocorrals simulating the effects of reservoir creation [R]. *Canadian Data Report of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1987, 628.
- [9] Hecky, R. E., Bodaly, R. A., Ramsey, D. J., et al. Enhancement of mercury bioaccumulation in fish by flooded terrestrial material ecosystem [R]. Appendix No. 6. Canada - Manitoba Agreement on the Study and monitoring of mercury in the Churchill River diversion, Winnipeg, Manitoba, 1986.
- [10] Jackson, T. A. Biological and environmental control of mercury accumulation by fish in lakes and reservoirs of northern Manitoba, Canada [J]. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 1991, 48: 2449 - 2470.
- [11] Jackson, T. A. The mercury problem in recently formed reservoirs of northern Manitoba (Canada): effects of impoundment and other factors on the production of methylmercury by microorganisms in sediments [J]. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 1988, 45: 97 - 121.
- [12] Meili, M. Mercury in Lakes and Rivers [A]. In Sigel, A., Sigel H., (eds.), *Metal ions in biological systems: Mercury and its effects on the environment and biology*, Marcel Dekker, New York, NY., 1997.
- [13] Meili, M. Mercury in boreal forest lake ecosystems [D]. *Acta Universitatis Upsaliensis, Comprehensive Summaries*

- of Uppsala Dissertations from the Faculty of Science No. 336, Uppsala, Sweden. 1991.
- [14] Nguyen, H. L., Leermakers, M., Kurunczi, S., et al. Mercury distribution and speciation in Lake Balaton, Hungary [J]. *Sci. Tot. Environ.*, 2005, 340: 231 - 246.
- [15] Smith, F. A., Sharma, R. P., Lynn, R. L. et al. Mercury and selected pesticide levels in fish and wildlife of Utah: I. Levels of mercury, DDT, DDE, Dieldrin and PCB in fish [J]. *Environ. Toxicol. Chem.*, 1974, 12: 218 - 223.
- [16] Tremblay, A., Lucotte, M., Rheault, I. Methylmercury in a benthic food web of two hydroelectric reservoirs and a natural lake [J]. *Water Air Soil Pollut.*, 1996a, 91: 255 - 269.
- [17] Tremblay, A., Lucotte, M., Meili, M. et al. Total mercury and methylmercury contents of insects from boreal lakes: ecological, spatial and temporal patterns [J]. *Water Qual. Res. J. Can.*, 1996b, 31: 851 - 873.
- [18] Sjöblom, Å., Meili, M., Sundbom, M. The influence of humic substances on the speciation and bioavailability of dissolved mercury and methylmercury, measured as uptake by *Chaoborus* larvae and loss by volatilization [J]. *Sci. Tot. Environ.*, 2000, 261: 115 - 124.
- [19] Verdon, R., Brouard, D., Demers, C. et al. Mercury evolution 1978 - 1988 in fishes of the La Grande Hydroelectric Complex, Quebec Canada [J]. *Water Air Soil Pollut.*, 1991, 56: 405 - 417.
- [20] Watras, C. J., Morrison, K. A., Host, J. S. et al. Concentration of mercury species in relationship to other site - specific factors in the surface waters of Northern Wisconsin Lakes [J]. *Limnol. Oceanogr.*, 1995, 40: 556 - 565.
- [21] 徐小清, 张晓华, 靳立军, 等. 三峡水库汞活化效应对鱼汞含量影响的预测 [J]. *长江流域资源与环境*, 1999, 8 (2): 198 - 204.
- [22] 徐小清, 丘昌强, 邓冠强, 等. 长江水系河流与水库中鲤鱼的元素含量特征 [J]. *长江流域资源与环境*, 1998, 7 (3): 267 - 273.
- [23] 阎海鱼, 冯新斌, 刘霆, 等. 贵州百花湖鱼体汞污染现状 [J]. *生态学*, 2008, 27 (8): 1357 - 1361.
- [24] 阎海鱼, 冯新斌, 李仲根, 等. 半封闭溶样冷原子荧光测定鱼体中总汞的分析方法研究 [J]. *地球与环境*, 2005a, 33 (1): 89 - 92.
- [25] 阎海鱼, 冯新斌, 梁琰, 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*, 2005b, 24 (6): 78 - 80.
- [26] 张明时, 王爱民, 赵小毛, 等. 乌江上游水域水生生物中甲基汞污染调研 [J]. *贵州科学*, 1991, 9 (2): 155 - 159.