

# 水库鱼体汞积累的预测

徐小清 丘昌强 邓冠强 惠嘉玉 张晓华

(中国科学院水生生物研究所, 武汉 430072)

**摘要** 回归分析表明, 在所研究的长江流域的12个水库中, 水库与河流鲤鱼汞含量的比值F与水库集水面积A和径流量Q的比值呈显著的负相关:

$$F = 2.5096 - 0.48047A / Q \quad (r = -0.795, n = 12)$$

凤滩水库调查结果证实了此回归方程的可靠性。实测的F值与预测值比较, 相对误差为23.1%。用此模型预测三峡大坝建成蓄水后将加剧鱼体对汞的生物富集作用, 局部水域存在鱼体汞含量超过我国食品汞含量标准的可能性。

本文讨论了河流与水库中鱼体对砷、汞、硒、铅和镉元素积累的特点。比较其富集系数指出, 在同一水系中, 河流的鲤鱼对砷和硒的富集能力比水库与湖泊的鲤鱼大, 而对汞、镉、铅的富集能力比水库与湖泊的鲤鱼小。

**关键词** 长江三峡大坝, 鲤鱼, 汞的生物积累

水库、湖泊与河流在流态、物理、化学及生物学特性上存在显著的差别<sup>[1]</sup>。这些差别强烈地影响着水环境各要素的元素含量水平。长江水系水环境元素背景值研究表明<sup>[1]</sup>, 湖泊与水库中原水和过滤水的元素含量的离散程度比河水小, 过滤水与沉积物中微量元素的含量一般均比河流高<sup>[2]</sup>。并且在这些不同的水体中, 元素存在的形态比例也有较大的差异, 它们的生物可利用态也显示出各自的化学特征。因此, 在同一水系不同水体中同种鱼类的某些元素的含量将反映出这些元素的化学生态特性。

水生生物元素背景值统计分析表明<sup>[3]</sup>, 在同一水系中, 河流的鲤鱼对砷和硒的富集能力比水库与湖泊的鲤鱼大, 而对汞、镉、铅的富集能力则后者比前者强。根据这种现象, 可以预计在河流上建坝蓄水后鱼体对汞的富集作用将会增强, 汞对生态与环境的影响程度将会加剧。

作者在《长江水系水生生物元素背景值的研究》、《湖南省沅江伍强溪水电站环境影响评价的调查》和有关水库的水文参数等资料的基础上<sup>2,3,4)</sup>, 利用上述水库汞的生物地球化

1) 中国科学院地理所等。长江水系水体元素背景值, 75 国家科技攻关研究报告, 1990。

2) 中国科学院水生生物研究所。长江水系水生生物元素背景值系统分析, 75 国家科技攻关研究报告, 1990。

3) 中国科学院水生生物研究所。湖南省沅江伍强溪水电站环境影响评价专题报告之八, 对水生生物影响评价报告, 1990。

4) 长江流域规划办公室。长江流域已建在建大型水库汇编, 内部资料, 1982。

1997-12-17修回本部

学现象,探讨河流建坝蓄水后,水库的鱼类对汞积累的规律,预测水库建成蓄水后鱼体对汞积累的变化趋势。

### 1 材料与方法

研究鱼类元素含量必须有足够数量的样品才能获得具有实际意义的统计数据。单个样品的测量值不能代表鱼类群体元素含量的本征状况,它只反映样品本身的元素含量。每个统计单元所需样本数是根据随机取样的个体差异及每个元素测定方法的精度而确定的<sup>[4]</sup>。表 1 列出长江水系鱼类采样的断面数、样品数以及每个统计单元在 95% 置信水平时

表1 长江水系鲤鱼元素含量的实测样品数

Tab.1 Sample size for determination of element contents in carp from The Changjiang River

元素	普渡河	岷江沱江	嘉陵江	乌江赤水	青弋江	巢湖
Element	Puduhe River	Mingjiang River	Jianlinjiang River	Wujiang River	Qingyijiang River	Chaohu Lake
As	137	119	151	96	124	52
Cd	137	119	147	94	124	52
Cu	137	119	151	96	124	52
Fe	137	119	151	96	124	52
Hg	137	119	149	96	124	52
Mn	137	119	151	96	124	52
Pb	134	83	146	92	121	52
Se	137	119	151	96	124	52
Zn	137	119	150	96	124	52
Na	137	119	151	96	124	52
K	137	119	151	96	124	52
Mg	137	119	151	96	124	52

元素	汉江	清江	鄱阳湖	长江干流	湘江	需要样品数
Element	Hanjiang River	Qingjiang River	Poyanghu Lake	Changjiang River	Xiangjiang River	Sample size
As	158	19	189	76	108	20
Cd	157	18	181	73	108	20
Cu	158	19	188	77	108	9
Fe	158	19	188	49	108	15
Hg	158	18	188	76	108	14
Mn	158	19	189	49	108	21
Pb	155	18	180	72	108	20
Se	158	19	189	76	108	19
Zn	158	19	189	77	108	9
Na	158	19	189	49	108	17
K	158	19	189	49	108	4
Mg	158	19	189	49	108	3

所需样品数的计算值。以下统计分析中水库的研究样品数基本满足此要求。

鱼类样品的采集、样品制备及保存均根据《水环境化学元素研究方法》推荐的操作步骤进行<sup>[4]</sup>。按水生生物元素背景值研究方法用碱消解分步还原冷原子吸收法测定新鲜样品中的无机汞、有机汞和总汞<sup>[5]</sup>;用酸消解氢化物发生-原子吸收光谱法测定鱼样中砷和硒的含量<sup>[6]</sup>;用干灰化无火焰石墨炉平台原子吸收光谱法测定铅与镉<sup>[7]</sup>。在 IBM 微机上用 STATGRF 程序处理所有数据。

2 结果与讨论

2.1 鱼体对元素的富集能力

曹文宣等<sup>[8]</sup>认为,水库建成后,水库内流速显著降低,泥沙大量沉积,饵料生物发生巨大的变化等,原来栖息于该江段的一部分种类不能适应,从而在水库内消失或变得极为罕见。库区江段内适于流水环境的主要经济鱼类,如河鲢、长吻鲢、圆口铜鱼、铜鱼、吻鲈等鱼类的种群数量也将大量减少。鲴亚科和鮠亚科的资源将会有较大的增加。鲤鱼将成为水库渔业的主要养殖对象,鲢、鳙和草鱼的种群数量将相应增加。与水库内饵料生物和鱼类种群发生变化的同时,鱼类对某些元素的富集能力也相应发生较大的变化。表2列出长江流域同一水系的河流与水库鲤鱼肌肉中元素的含量和它们之间的比值。砷与硒元素的比值一般小于1,而汞元素一般大于1。长江流域5个水系的河流与水库鲤鱼肌肉对汞等

表2 鲤鱼肌肉中元素的含量

Tab.2 Contents of elements in carp muscle (mg/kg)

河流 River	水体类型 Type of water body	As	Cd	Hg	Pb	Se
汉江	汉江上游 Upstream of the Hanjiang river	0.60 (1.00)	0.012 (1.00)	0.040 (1.00)	0.063 (1.00)	3.14 (1.00)
Hanjiang River	石泉水库 Shiquan Reservoir	0.155 (0.42)	0.015 (1.3)	0.056 (1.4)	0.077 (1.2)	2.24 (0.71)
	丹江口水库	0.106 (0.41)	0.011 (0.92)	0.047 (1.2)	0.079 (1.3)	3.13 (0.99)
	Danjiangkou Reservoir					
湘江	湘江 Xiangjiang River	0.635 (1.0)	0.013 (1.0)	0.068 (1.0)	0.051 (1.0)	
Xiangjiang River	洋头水库 Pantou Reservoir	0.09 (0.14)	0.031 (2.4)	0.113 (1.7)	0.080 (1.6)	
	欧阳海水库					
	Ouyanghai Reservoir	0.10 (0.16)	0.014 (1.1)	0.103 (1.5)	0.065 (1.3)	
	盘山水库 Panjiang Reservoir	0.10 (0.16)	0.017 (1.3)	0.098 (1.4)	0.070 (1.4)	
资水	资水 Zishui River	0.762 (1.0)	0.023 (1.0)	0.078 (1.0)	0.071 (1.0)	
Zishui River	柘溪水库 Zhexi Reservoir	0.290 (0.38)	0.103 (4.5)	0.209 (2.7)	0.120 (1.7)	
青弋江	青弋江 Qingyijiang River	0.217 (1.0)	0.015 (1.0)	0.56 (1.0)	0.42 (1.0)	2.7 (1.0)
Qingyijiang River	陈村水库 Chengcun Reservoir	0.085 (0.39)	0.023 (1.3)	0.092 (1.6)	0.044 (1.1)	1.14 (0.55)

Numbers in brackets are ration values

表3 河流与水库鲤鱼的元素生物富集因子

Tab.3 Bioconcentration factors of elements in carp from rivers and reservoirs

水体 Water body		As×10 <sup>2</sup>	Cd×10 <sup>3</sup>	Hg×10 <sup>3</sup>	Pb×10 <sup>2</sup>	Se×10 <sup>4</sup>
普渡河	Puduhe River	2.12	1.22	2.08	1.69	2.17
滇池	Dianchi Lake	1.00	1.43	0.27	1.14	3.89
宋花坝水库	Songhuaba Reservoir	6.59	0.91	1.27	1.16	2.36
汉江上游	Upstream of the Hanjiang River	3.44	0.52	0.90	0.45	0.89
石泉水库	Shiquan Reservoir	1.53	1.25	0.92	3.20	1.60
堵河	Duhe River	8.75	1.00	0.38	0.56	4.96
黄龙滩水库	Huanglongtan Reservoir	2.95	5.50	1.81	1.15	0.34
乌江	Wujiang River	1.43	2.22	5.11	0.85	1.03
乌江渡水库	Wujiangdu Reservoir	3.97	4.29	5.71	3.94	2.48
修水	Xiushui River	8.53	0.63	11.7	1.42	3.12
柘林水库	Zhelin reservoir	8.23	1.33	13.3	1.18	0.65
青弋江	Qingyijiang River	2.76	0.37	14.5	1.41	1.48
陈村水库	Chengcun Reservoir	1.03	0.57	17.7	2.69	0.86

元素的富集系数比较也表明(表 3),在同一水系中,河流的鲤鱼对砷和硒的富集能力比水库湖泊的鲤鱼大,而对汞、和铅的富集能力比湖泊水库的鲤鱼小。这些结果表明,河流变成水库后,鱼体肌肉中砷和硒的含量将相应减少,而汞等元素将会增加。鱼体对这些元素的富集能力及其含量的变化幅度,不仅依赖元素的化学性质,也许还与水库的环境及其水文条件等因素有关。这是一个较为复杂的问题。以下仅就公众关心的汞元素进行分析。

2.2 鱼体汞元素含量与水库的水文特征

天然水体中约有 0.1% 的无机汞转化成甲基汞,在气温较高地区这种转化速率将更大。汞的甲基化速率与微生物的作用、无机汞的浓度及其生物可利用性、氧化还原电位和 pH 等因素的关系极为密切,可用汞的净甲基化速率 (NSMR) 公式表达<sup>[9]</sup>:

$$NSMR = \gamma (\beta C_{Hg-I})^n$$

式中  $\gamma$  为与微生物活动有关的系数,  $C_{Hg-I}$  为无机汞的浓度,  $\beta$  为无机汞的生物可利用系数,  $n$  为甲基化过程的反应动力学常数。当水体间的环境条件相似的情况下,即  $\gamma$ 、 $\beta$ 、 $n$  变化相似的条件,净甲基化速率主要受无机汞浓度的制约。按照污染负荷的概念,河流、湖泊和水库的污染负荷与它们的集水面积和径流量的倒数成正比<sup>[10]</sup>。因此,为分析在河流上建造大坝引起鱼体汞含量增加的趋势,作者设定同一水系的河流与水库的鲤鱼肌肉汞含量的比值为  $F$ ,并对水库的水深  $H$ 、库容  $V$ 、集水面积  $A$ 、径流量  $Q$  等水文参数进行逐步回归发现,在长江流域所研究的 12 个水库的  $F$  值与其相应水库的集水面积和径流量间满足如下回归方程:

$$F = 2.5096 - 0.48047A / Q \quad (r = -0.795, n = 12)$$

方程表明  $F$  与  $A / Q$  呈负相关,即  $A / Q$  值越小,建坝后鱼体汞含量增加的幅度越大。比较计算与实测的  $F$  值,它们的相对误差为 2.1—40.4%,平均相对误差为 12.6%。

利用凤滩水库与沅江的调查资料验证上述经验方程。凤滩水库建于 70 年代,它位于湖南省沅江支流酉水上,水库集水面积 17500km<sup>2</sup>,年径流量 157 亿 m<sup>3</sup>,总库容 15.44 亿 m<sup>3</sup>。由方程计算  $A / Q$  为 1.115,  $F$  值为 1.97,即建坝后鱼体汞含量比建坝前约增加一倍。实测值表明,沅江鳊鱼肌肉平均汞含量为 0.258mg / kg,凤滩水库鳊鱼肌肉汞含量为 0.332—0.469mg / kg,平均为 0.414mg / kg。实测的  $F$  值为 1.29—1.92,平均为 1.60,与预测值比较相对误差为 23.1%。在所研究的长江流域水库的水文条件范围内,方程具有较好的预测性(图 1)。

2.3 三峡水库鱼体汞元素积累趋势的预测

根据三峡水库干流与主要支流的水文参数和三峡水库的设计参数,计算  $F$  值列于表 4。结果表明,大坝蓄水后,干

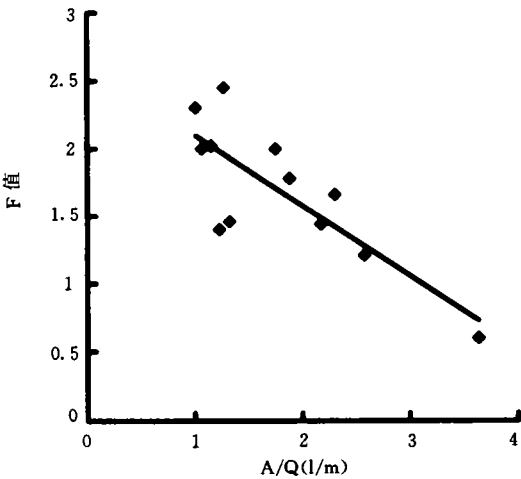


图1 A/Q与F间的关系

Fig.1 Relation between A/Q and F

表4 三峡水库与部分支流的F预测值

Tab.4 Predicted values of F in Three Gorge Reservoir and its streams

水体	Water body	A/Q	F
三峡水库	Three Gorge Reservoir	2.213	1.45
乌江	Wujiang River	1.682	1.701
龙河	Longhe River	0.696	2.175
小江	Xiaojiang River	1.419	1.828
大宁河	Daninge River	0.111	2.456
香溪河	Xiangxihe River	0.142	2.441

流水域内鱼体肌肉汞含量将比现在增加 40% 左右;在大部分支流淹没区库湾水域内,鱼体肌肉汞含量将增加 68—150%,大宁河与香溪河淹没区的库湾内鱼体汞含量增加的比例较大,达到 1.5 倍左右。

未来水库内鱼体汞含量与现在鱼体汞含量的水平密切相关。目前库区干流鲤鱼肌肉汞含量为 0.06—0.11mg / kg,平均含量为 0.077mg / kg。按干流的 F 值计算,未来水库鲤鱼肌肉汞含量为 0.092—0.16mg / kg,平均为 0.11mg / kg。在水库北岸支流淹没区水域内,由于 F 值较高,鲤鱼肌肉汞含量将增加到 0.11—0.22mg / kg,这相当于三峡库区内狮子滩水库鲤鱼肌肉汞含量水平。但在水库南岸,由于受汞矿带的影响,乌江淹没区水域的鲤鱼肌肉汞含量将达到 0.12—0.35mg / kg,存在超过我国食品汞含量标准的可能性 (0.30mg / kg)<sup>1)</sup>。因生活习性 & 食性的影响,不同鱼种的汞含量具有明显的差异<sup>[11]</sup>,一般是食物链较长的鱼种汞含量高。如长江三峡库区江段几种鱼类肌肉汞含量的顺序为:长吻鲩 > 鲇鱼 > 鲤鱼 > 铜鱼。根据湖南沅江不同鱼种间汞含量的比例,以三峡库区江段长吻鲩、鲇鱼、鲤鱼的汞含

表5 水库中鱼体肌肉汞含量的预测值

Tab.5 Predicted content of mercury in fish muscle from reservoir (mg/kg)

水体 Water bodies	1	2	3	4	5	6	7	8
水库干流	0.084	0.11	0.14	0.14	0.23	0.20	0.23	0.24
Main river of the Reservoir	0.07-0.12	0.09-0.16	0.10-0.20	0.12-0.22	0.19-0.33	0.16-0.30	0.17-0.33	0.19-0.35
水库支流北岸	0.099	0.13	0.16	0.17	0.27	0.24	0.27	0.28
North bank branch of the reservoir	0.11-0.14	0.10-0.27	0.12-0.24	0.14-0.28	0.22-0.39	0.19-0.36	0.20-0.39	0.22-0.41
乌江下游	0.14	0.19	0.22	0.25	0.39	0.35	0.39	0.39
Lowstream of the Wujiang River	0.09-0.26	0.12-0.35	0.15-0.42	0.17-0.46	0.26-0.73	0.23-0.85	0.25-0.71	0.28-0.73

1. 鲢和鳙 *Hypophthalmichthys molitrix* (C.etV.) and *Aristichthys nobilis* (Rich); 2. 鲤鱼 *Cyprinus carpio* L.; 3. 蒙古红鲂 *Erythractor. mongolicus* (Basil.); 4. 草鱼 *Ctenopharyngodon idellus* (C.et V.); 5. 吻鲃 *Rhinogobio. typus* Bleeker; 6. 长吻鲩 *Leiocassis. longirostris* Gunther; 7. 鳊鱼 *Siniperu. chuatsi* (Basil); 8. 鲇鱼 *Parasilurus asotus*

量和预测三峡库区干流、支流水域的 F 值为基础,估计未来水库不同鱼种肌肉汞含量水平(表 5)。结果表明,水库干流水域中的鲢、鳙、鲤、草鱼、蒙古红鲂的肌肉汞含量范围为 0.065—0.22mg / kg,低于我国食品汞含量标准。但食物链较长的吻鲃、长吻鲩、鳊鱼、鲇鱼等肉食性鱼类汞含量较高,一般为 0.16—0.35mg / kg,存在超标的可能性。在水库北岸支

1) 中华人民共和国食品卫生法(试行)。GB2736—81.

流淹没区的水域内, 鲢、鳙、鲤、草鱼、蒙古红鲮汞含量均在我国食品汞含量允许的范围内, 其值为 $0.10\text{—}0.27\text{mg / kg}$ , 但肉食性鱼类的汞含量为 $0.19\text{—}0.41\text{mg / kg}$ , 超标的可能性比水库干流的鱼类大。在水库南岸乌江淹没区内, 鲢、鳙的汞含量为 $0.09\text{—}0.26\text{mg / kg}$ , 超标的可能性较小; 鲤鱼、草鱼和蒙古红鲮的汞含量为 $0.12\text{—}0.46\text{mg / kg}$ , 超标的机率比水库干流和北岸支流淹没区水域的同种鱼类更大; 而肉食性鱼类吻鲈、长吻鲈、鳊鱼、鲇鱼的汞含量为 $0.23\text{—}0.73\text{mg / kg}$ , 其平均值超过食品汞含量标准。

综上所述, 三峡水库建成后, 将加剧鱼体对汞元素的生物富集作用, 水库鱼体汞含量将显著增加, 存在鱼体汞含量超过我国食品标准的可能性。特别是受乌江中下游高汞背景生态脆弱区的影响, 鱼体超标的可能性更大。这不利于今后库区渔业开发, 并给人群健康带来潜在的危害, 应引起人们的高度重视。

### 参 考 文 献

- [1] 陈静生. 环境地球化学. 北京: 海洋出版社. 1990, 90—94
- [2] 余中盛. 长江中下游典型水域水体环境背景值研究. 北京: 科学技术出版社. 1991, 104—112
- [3] 徐小清等. 长江水系鲤鱼元素背景值的系统研究. 环境背景值和环境容量研究. 北京: 科学出版社. 1993, 96—103
- [4] 王立军等. 水环境化学元素研究方法. 武汉: 湖北科学技术出版社. 1992, 7—22
- [5] 邓冠强等. 水生生物体中无机汞、有机汞及总汞的冷原子吸收测定法. 化学元素水环境背景值研究. 北京: 测绘出版社. 1990, 219—228
- [6] 惠嘉玉. 氢化物发生法—原子吸收光谱测定水生生物体中硒和砷. 化学元素水环境背景值研究. 北京: 测绘出版社. 1990, 236—240
- [7] 王立军等. 水环境化学元素研究方法. 武汉: 湖北科学技术出版社. 1992, 98—101
- [8] 曹文宣等. 三峡工程对长江鱼类资源影响的初步评价及资源增殖途径的研究. 长江三峡工程对生态与环境影响及其对策研究论文集. 北京: 科学出版社. 1987, 16
- [9] Krenkel P A. Heavy Metals in the Aquatic Environment. Oxford: Pergamon Press. 1975, 299—311
- [10] Werner Stumm, Morgan James J. Aquatic Chemistry. New York: John Wiley & Sons. 1981. 690—691
- [11] 徐小清等. 三峡库区汞污染的化学生态效应. 水生生物学报(待出版)

## PREDICTION OF FISH MERCURY BIOACCUMULATION IN RESERVOIRS

Xu Xiaoqing Qiu Changqiang

Deng Guangqiang Hui Jiayu and Zhang Xiaohua

(*Institute of Hydrobiology, The Chinese Academy Of Sciences, wuhan 430072*)

**Abstract** Heavy metal bioaccumulation of fish in rivers and lakes or reservoirs are discussed in relation to background values of elements in fish in Changjiang River water system and the Fengtan Reservoir, Hunan Province. The carp in lakes or reservoirs has greater concentrations than in rivers for Hg, Cd and Pb, and has less concentrations than in rivers for As and Se. F value, which is the fish mercury content in reservoir compared to the content in river within a same river basin, is greater than 1, but smaller than 1 for As and Se.

The regression analysis shows that there is a good correlationship between F and ratio values of reservoir drainage area(A) to its runoff(Q):

$$F = 2.5096 - 0.48047A / Q \quad (r = -0.795, n = 12)$$

This shows that the smaller values of A / Q, the greater extent of mercury in fish. Comparing calculated F values to measured values, their relative errors are 2.1—40.4%, average relative error is 12.6%. The regression equation is confirmed by results investigated in the Fengtan Reservoir. Measured in field F values are 1.29—1.92 with the mean value 1.60, and the relative error 23.1%. It is well filled with the predicted F value. On the basis of this regression equation, it is predicted that the bioconcentration of mercury in fish will increase after construction of the Three Gorge Reservoir, contents of mercury will be 1.6—2.0 time higher than present contents, and there might be a possibility that fish mercury contents might exceed the concentration of 0.3mg / kg which is the limit content of the Food Hygiene Law of the People's Republic of China (tentative). In the high mercury background zone of the low Wujiang River, this will produce the severe impacts on fishery development and community health.

**Key words** Three Gorge Reservoir, Carp, Bioaccumulation of mercury