

# 长江三峡库区江段沉积物的 重金属污染特征

徐小清 邓冠强 惠嘉玉 张晓华 丘昌强

(中国科学院水生生物研究所, 武汉 430072)

**摘要** 测定了三峡库区江段沉积物(63 $\mu\text{m}$ )中 21 个元素的含量。比例匹配统计分析指出, 重庆至涪陵江段的沉积物样品间无明显相关, 涪陵至巴东江段的沉积物样品间在 90% 置信水平上显著相关; 沉积物中钙、镁、锶、钡、铁、钴、镍、镉、锰、锌、铝、钒、镧、钇、钛等元素间在 90% 置信水平上有显著相关, 但砷、镉、铜、汞、铅、磷等元素间以及它们与上述元素间无显著相关。这表明涪陵以上江段的沉积物因受重庆和长寿污染影响大, 样品间的相似性小, 而涪陵以下江段的沉积物受污染影响小, 样品间存在较好的相似性。元素间相关性的差异反映出了砷、镉、铜、汞、铅、磷在沉积物中可能具有不同的形态或反映出不同江段的污染状况。计算沉积物中汞的富集因子  $EF$  值证明, 在控制沉积物粒径与成分影响的条件下, 三峡库区江段的沉积物普遍受到汞污染,  $EF$  值高达 1.4—92。

**关键词** 长江三峡, 沉积物, 汞污染

长江三峡工程对生态与环境的影响已引起公众的关注。库区江段水环境污染状况已有报道<sup>[1]</sup>。库区江段沉积物中重金属元素含量主要受上游金沙江、嘉陵江及三峡库区输入的泥沙以及沿江城市和工厂废水、废气和废渣排放的影响。报道指出库区江段的沉积物已受到不同程度的污染, 并证明沉积物中重金属元素含量与其粒径间呈负相关。由于沉积物的粒径和成分的影响, 不同江段沉积物的元素含量变化较大。元素含量较高的沉积物并不一定被污染, 可能反映出不同江段沉积物的粒径或成分的差异。因此, 评价判断沉积物污染必须要考虑沉积物的粒径和成分的影响。

Bernard<sup>[2]</sup>和 Vioent<sup>[3]</sup>将沉积物中微量元素的含量规范化, 使粒径影响限制到最低程度, 并应用重金属元素的富集因子研究沉积物的污染状况。本文分析了三峡库区江段沉积物(63 $\mu\text{m}$ )中重金属元素含量, 利用比例匹配技术(Ration matching technique)<sup>[4]</sup>和沉积物重金属元素富集因子评价三峡库区江段沉积物的污染特征。

## 1 材料与方法

1985 年 2 月在重庆至巴东 17 个江段的回水处采集江边表层沉积物, 盛于酸洗过的塑

料袋中运回实验室。沉积物经风干后,用 40 目尼龙筛除去砂子与杂物,再机械过筛,收集小于 200 目以下的沉积物。细粒径的沉积物经硝酸-高氯酸或硝酸-硫酸消解处理,并用冷原子吸收法测汞,氢化物发生原子吸收光谱法测定砷,无火焰石墨炉原子吸收光谱法测铅和镉<sup>[5]</sup>,等离子体发射光谱法测定铜、锌、钴、镍、铁、铬、锰、钒、铝、钡、锶、钙、镁、钛、钇、镧和磷<sup>[6]</sup>。并利用 SD-6 和 SD-8 沉积物标准参考物质进行分析质量控制<sup>[7]</sup>。所有数据在 IBM 微机上进行统计处理。利用比例匹配技术统计分析沉积物样品间和元素间的相关关系,其计算方法如下。

### 1.1 计算各样品中元素间的浓度比例 ( $a_i / a_j$ ) 矩阵

$$X_{ij} = \begin{vmatrix} a_1 / a_1 & & & \\ a_2 / a_1 & a_2 / a_2 & & \\ a_3 / a_1 & a_3 / a_2 & a_3 / a_3 & \\ \dots & \dots & \dots & \dots \end{vmatrix} \quad (1)$$

### 1.2 计算样品间的比例矩阵 $Y_{ij}(AB)$ :

$$Y_{ij}(AB) = \begin{vmatrix} (X_{11})_A / (X_{11})_B & & & \\ (X_{21})_A / (X_{21})_B & (X_{22})_A / (X_{22})_B & & \\ (X_{31})_A / (X_{31})_B & (X_{32})_A / (X_{32})_B & (X_{33})_A / (X_{33})_B & \\ \dots & \dots & \dots & \dots \end{vmatrix} \quad (2)$$

1.3 定义相关系数  $Z_{AB}$  为满足  $1 / M \leq Y_{ij}(AB) \geq M$  的样品比例矩阵元素的和与矩阵元素总和之比值,并求出相关矩阵  $Z_{kl}$ 。在计算中  $M$  一般取值为 1.5 或 1.3:

$$Z_{kl} = \begin{vmatrix} Z_{AA} & & & \\ Z_{BA} & Z_{BB} & & \\ Z_{CA} & Z_{CB} & Z_{CC} & \\ \dots & \dots & \dots & \dots \end{vmatrix} \quad (3)$$

沉积物的样品间或元素间的相关显著性由对应的相关分配图确定。相关数  $Z_{kl}$  必须大于或等于对应 10% 相关百分数的  $Z$  值才被确认为在 90% 置信水平上具有显著相关。

## 2 结果与讨论

### 2.1 沉积物中元素的含量

表 1 列出不同江段的沉积物中 21 种元素的含量。在库区 14 个江段的沉积物中,镁、钙、铁平均含量分别为 1.90%、4.82%、5.10%,锶、钡、镍、锰、锌、钴的平均含量分别为 160、494、38.0、850、134、21.9 mg / kg。它们的相对标准偏差分别为 14%、11%、14%、4.0%、19%、10%、15%、16%、20.1%。这表明从重庆至巴东江段的沉积物中,这些元素的含量沿程变化较小,其含量与地壳元素丰度相当。但砷、镉、铬、铜、汞、铅等元素含量沿程变化较为明显,它们的平均含量分别为 2.72、0.272、158、59.1、0.312、23.0 mg / kg,其相对标准偏差分别为 39%、56%、46%、36%、137% 和 64%。这个结果表明沉积物可能受到沿江城市和工厂的

表1 三峡库区江段沉积物中21个元素的含量(mg/kg)  
Tab.1 Contents of 21 metal elements in sediments from the Three Gorge Reservoir area

采样站	Sampling station	Al	As	Ba	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Ca	Hg	La	Mn	Mg	Ni	P	Pb	Sr	Ti	V	Y	Zn
嘉陵江口	Jialingjiang Mouth	5.86	3.25	602	0.16	11.3	84.5	30.3	2.91	3.52	0.154	64.0	560	0.96	27.1		13.7	191	0.44	69.2	25.3	85.8
嘉陵江	Jialingjiang River	4.83	2.52	426	0.32	21.3	136	88.1	5.22	5.43	0.036	105	841	2.33	38.3	0.112	13.4	157	1.33	144	28.4	120
朝野	Zhaoye	5.03	1.46	362	0.10	19.1	117	49.1	4.45	5.10	0.336	64.3	693	1.99	36.3	0.079	7.90	159	0.79	147	20.3	113
寸滩	Cuntan	4.32	0.34	639	0.14	25.5	241	59.4	7.47	4.89	0.188	182	991	1.93	39.5	0.119	63.1	158	1.87	254	44.6	162
鱼嘴	Yuzui	4.56	2.32	452	0.46	19.4	125	55.7	4.51	4.94	0.263	85.2	713	2.03	32.5	0.100	23.6	157	1.06	90.5	26.4	112
木洞	Mudong	5.90	4.32	467	0.65	23.1	99.4	102	4.50	5.62	0.067	88.9	1001	2.36	41.4	0.045	24.3	162	0.88	93.2	26.6	170
龙溪河口	LongxiheKou	4.92	1.49	460	0.21	18.9	114	67.4	4.37	4.46	0.042	86.3	746	1.82	29.8	0.104	15.5	155	1.00	88.0	28.7	120
石沱	Shituo	3.93	2.71	634	0.20	30.4	307	32.3	9.20	4.57	0.766	161	1020	1.86	42.8	0.105	50.2	151	1.93	223	42.1	144
涪陵	Fuling	5.26	3.56	487	0.38	20.8	128	50.3	4.87	4.98	0.318	84.4	824	1.93	38.5	0.092	23.9	163	1.01	136	27.3	123
丰都	Fengdu	6.36	2.50	457	0.37	24.3	102	92.4	4.65	5.57	0.121	74.6	1091	2.15	43.6	0.088	20.4	162	0.79	135	24.8	165
忠县	Zhongxian	4.58	3.95	676	0.20	23.2	241	48.8	7.07	4.29	0.344	139	897	1.62	41.4	0.110	21.2	162	1.63	268	38.6	149
万县	Wanxian	5.38	3.20	428	0.17	19.0	124	36.4	4.58	4.64	0.012	74.2	718	1.77	35.3	0.087	16.8	159	0.86	123	25.3	109
奉节	Fengjie	5.89	3.48	490	0.30	20.5	108	50.2	4.25	4.61	0.132	68.0	747	1.76	40.4	0.086	16.9	177	0.79	118	27.1	120
巫山	Wushan	4.58	3.05	538	0.15	22.7	274	44.3	7.76	3.76	1.66	218	936	1.38	37.5	0.115	27.3	163	1.67	281	49.4	148
巴东	Badong	5.79	3.23	402	0.16	19.0	97.9	50.8	4.13	4.55	0.153	60.6	783	1.68	36.7	0.081	8.50	153	0.74	115	23.8	116
乌江	Wujiang River	5.86	2.24	546	0.30	15.8	107	30.7	3.72	3.20	2.40	73.7	819	1.16	32.8	0.090	11.8	130	0.59	124	28.6	98.7
川梁	Chuanran	7.38	3.75	348	0.40	15.7	114	212	4.70	3.43	0.558	113	436	1.05	35.9	0.087	106	298	0.58	70.0	73.3	292
川维	Chuanwei	5.36		504	0.23	15.7	113	43.5	4.09	4.11	0.203	87.1	707	1.42	34.0	0.095	11.3	232	0.69	138	26.5	583
川维口	Chuanweikou	5.26	2.71	461	0.16	21.7	124	44.5	4.80	5.10	0.189	81.0	793	2.01	38.0	0.090	12.7	162	0.99	125	26.7	121

注: \* Al, Fe, Mg, Ca, P为百分含量。

表2 三峡库区沉积物元素间的相关矩阵

Tab.2 Correlation matrix of elements in sediment samples from the Three Gorge Reservoir area

元素	As	Hg	Cd	Pb	Cu	P	Co	Cr	Fe	Mn	Ni	V	Zn	Al	Ba	Ga	La	Mg	Sr	Ti
Hg	M <sub>1</sub> 0.131																			
	M <sub>2</sub> 0.092																			
Cd	M <sub>1</sub> 0.294	0.118																		
	M <sub>2</sub> 0.163	0.065																		
Pb	M <sub>1</sub> 0.137	0.144	0.373																	
	M <sub>2</sub> 0.059	0.078	0.203																	
Cu	M <sub>1</sub> 0.438	0.438	0.392	0.359																
	M <sub>2</sub> 0.301	0.523	0.261	0.229																
P	M <sub>1</sub> 0.327	0.144	0.281	0.392	0.503															
	M <sub>2</sub> 0.229	0.111	0.163	0.261	0.340															
Co	M <sub>1</sub> 0.386	0.098	0.830	0.477	0.542	0.699														
	M <sub>2</sub> 0.235	0.092	0.654	0.268	0.373	0.503														
Cr	M <sub>1</sub> 0.261	0.194	0.288	0.451	0.307	0.863	0.634													
	M <sub>2</sub> 0.157	0.144	0.190	0.275	0.209	0.673	0.464													
Fe	M <sub>1</sub> 0.569	0.157	0.288	0.444	0.392	0.562	0.817	0.948												
	M <sub>2</sub> 0.523	0.111	0.216	0.275	0.229	0.425	0.686	0.784												
Mn	M <sub>1</sub> 0.124	0.105	0.379	0.431	0.098	0.601	0.967	0.484	0.712											
	M <sub>2</sub> 0.065	0.052	0.222	0.281	0.072	0.471	0.791	0.399	0.471											
Ni	M <sub>1</sub> 0.582	0.098	0.379	0.405	0.523	0.601	0.922	0.588	0.693	0.843										
	M <sub>2</sub> 0.405	0.065	0.248	0.241	0.379	0.386	0.797	0.451	0.765	0.536										
V	M <sub>1</sub> 0.301	0.124	0.235	0.392	0.301	0.477	0.621	0.791	0.824	0.693	0.336									
	M <sub>2</sub> 0.209	0.078	0.203	0.222	0.183	0.320	0.458	0.621	0.588	0.444	0.431									
Zn	M <sub>1</sub> 0.340	0.137	0.392	0.451	0.608	0.556	0.869	0.503	0.654	0.935	0.837	0.392								
	M <sub>2</sub> 0.235	0.092	0.242	0.320	0.399	0.399	0.797	0.373	0.490	0.869	0.712	0.261								
Al	M <sub>1</sub> 0.595	0.124	0.399	0.340	0.458	0.438	0.627	0.484	0.536	0.712	0.863	0.431	0.654							
	M <sub>2</sub> 0.405	0.098	0.275	0.196	0.327	0.294	0.484	0.340	0.399	0.529	0.660	0.320	0.464	0.641						
Ba	M <sub>1</sub> 0.523	0.131	0.373	0.392	0.366	0.614	0.810	0.627	0.719	0.850	0.784	0.614	0.719	0.641						
	M <sub>2</sub> 0.307	0.078	0.222	0.248	0.222	0.418	0.725	0.418	0.516	0.699	0.516	0.353	0.542	0.490	0.634					
Ga	M <sub>1</sub> 0.477	0.098	0.379	0.405	0.614	0.699	0.882	0.595	0.614	0.850	0.941	0.536	0.830	0.765	0.490					
	M <sub>2</sub> 0.314	0.072	0.255	0.216	0.412	0.471	0.706	0.386	0.510	0.660	0.725	0.373	0.621	0.614	0.490	0.523				
La	M <sub>1</sub> 0.353	0.176	0.268	0.471	0.314	0.536	0.634	0.908	0.824	0.582	0.588	0.647	0.595	0.536	0.608	0.523				
	M <sub>2</sub> 0.216	0.118	0.190	0.379	0.196	0.340	0.431	0.719	0.621	0.405	0.399	0.458	0.373	0.359	0.425	0.399	0.484			
Mg	M <sub>1</sub> 0.346	0.105	0.366	0.333	0.667	0.699	0.876	0.510	0.582	0.817	0.797	0.451	0.765	0.660	0.588	0.993	0.386			
	M <sub>2</sub> 0.242	0.072	0.235	0.235	0.464	0.536	0.673	0.320	0.451	0.614	0.582	0.366	0.562	0.497	0.373	0.869	0.386			
Sr	M <sub>1</sub> 0.575	0.118	0.399	0.373	0.503	0.536	0.732	0.497	0.477	0.778	0.824	0.412	0.863	0.954	0.765	0.817	0.569	0.758		
	M <sub>2</sub> 0.386	0.098	0.255	0.248	0.340	0.353	0.660	0.405	0.458	0.575	0.745	0.294	0.608	0.791	0.549	0.686	0.392	0.575		
Ti	M <sub>1</sub> 0.327	0.157	0.248	0.431	0.359	0.621	0.686	0.549	0.837	0.575	0.516	0.752	0.523	0.359	0.634	0.569	0.719	0.614	0.458	
	M <sub>2</sub> 0.209	0.118	0.176	0.307	0.255	0.431	0.490	0.366	0.621	0.379	0.333	0.523	0.288	0.261	0.418	0.431	0.627	0.497	0.346	
Y	M <sub>1</sub> 0.464	0.176	0.327	0.444	0.405	0.523	0.693	0.732	0.739	0.745	0.660	0.621	0.804	0.588	0.797	0.523	0.810	0.444	0.686	0.673
	M <sub>2</sub> 0.340	0.124	0.222	0.281	0.255	0.366	0.503	0.529	0.575	0.569	0.438	0.444	0.608	0.484	0.693	0.373	0.641	0.353	0.503	0.536

注: M<sub>1</sub>=1.5, M<sub>2</sub>=1.3.

Tab.3 Correlation matrix of sediment samples from the Three Gorge Reservoir area

采样点	Sampling station	嘉陵江	崧陵江口	朝野	寸滩	鱼嘴	木洞	川梁	川维口	龙溪河	石沱	涪陵	乌江口	丰都	忠县	万县	奉节	巫山
嘉陵江口 Jialingjiangkou M1 0.377																		
朝野 zhaoye	M2 0.264																	
	M1 0.571	0.385																
	M2 0.424	0.247																
	M1 0.390	0.316	0.372															
寸滩 Cuntan	M2 0.255	0.199	0.247															
	M1 0.636	0.472	0.597	0.411														
鱼嘴 Yuzui	M2 0.519	0.316	0.476	0.251														
	M1 0.463	0.364	0.407	0.286	0.576													
木洞 Mudong	M2 0.346	0.242	0.316	0.212	0.424													
	M1 0.238	0.528	0.234	0.234	0.316	0.277												
川梁 Chuanran	M2 0.173	0.346	0.143	0.173	0.199	0.16												
	M1 0.671	0.351	0.684	0.472	0.701	0.485	0.286											
川维口 Chuanweikou	M2 0.593	0.238	0.584	0.299	0.589	0.351	0.16											
	M1 0.784	0.459	0.567	0.346	0.645	0.558	0.273	0.082										
龙溪河 Longxihe	M2 0.597	0.333	0.398	0.255	0.563	0.407	0.182	0.052										
	M1 0.381	0.303	0.394	0.636	0.385	0.26	0.312	0.407	0.372									
石沱 Shituo	M2 0.264	0.19	0.264	0.498	0.238	0.186	0.182	0.286	0.221									
	M1 0.641	0.541	0.662	0.407	0.844	0.558	0.255	0.693	0.619	0.411								
涪陵 Fuling	M2 0.532	0.364	0.571	0.277	0.719	0.437	0.173	0.649	0.472	0.286								
	M1 0.537	0.58	0.472	0.359	0.506	0.407	0.273	0.628	0.511	0.377	0.667							
乌江口 Wujiangkou	M2 0.377	0.385	0.286	0.229	0.342	0.251	0.156	0.446	0.338	0.26	0.429							
	M1 0.641	0.437	0.554	0.303	0.593	0.597	0.26	0.632	0.602	0.303	0.684	0.571						
丰都 Fengdu	M2 0.455	0.281	0.416	0.186	0.416	0.532	0.19	0.472	0.429	0.195	0.511	0.385						
	M1 0.489	0.459	0.463	0.623	0.515	0.29	0.277	0.615	0.468	0.636	0.589	0.511	0.368					
忠县 Zhongxian	M2 0.342	0.273	0.316	0.563	0.372	0.216	0.186	0.403	0.312	0.481	0.424	0.377	0.238					
	M1 0.632	0.567	0.597	0.398	0.641	0.519	0.312	0.814	0.636	0.416	0.749	0.628	0.593	0.584				
万县 Wanxian	M2 0.468	0.39	0.519	0.255	0.468	0.372	0.203	0.727	0.55	0.26	0.684	0.468	0.485	0.407				
	M1 0.628	0.636	0.584	0.364	0.68	0.558	0.234	0.771	0.675	0.316	0.823	0.675	0.758	0.485	0.74			
奉节 Fengjie	M2 0.429	0.429	0.498	0.251	0.472	0.398	0.139	0.641	0.481	0.229	0.736	0.481	0.619	0.325	0.693			
	M1 0.355	0.303	0.372	0.636	0.377	0.273	0.29	0.42	0.381	0.623	0.403	0.398	0.303	0.727	0.424	0.355		
巫山 Wushan	M2 0.264	0.208	0.203	0.519	0.238	0.182	0.173	0.29	0.208	0.446	0.281	0.277	0.177	0.58	0.281	0.216		
	M1 0.584	0.576	0.039	0.394	0.571	0.078	0.29	0.883	0.61	0.333	0.675	0.558	0.636	0.498	0.723	0.753	0.364	
巴东 Badong	M2 0.411	0.372	0.022	0.281	0.424	0.056	0.221	0.732	0.437	0.225	0.615	0.416	0.494	0.316	0.641	0.727	0.251	

注:  $M1=1.5$ ,  $M2=1.3$

污染。

表 2 和表 3 分别为三峡库区江段沉积物元素间及沉积物样品间的相关矩阵。用比例匹配技术检验重庆至巴东沿江 18 个沉积物样品间的关系指出,涪陵以上江段沉积物样品间 55 个相关数小于 0.57, 88.6% 样品间无显著相关性;涪陵以下江段的沉积物样品间 14 个相关数为 0.57—0.81, 在 90% 置信水平上它们具有显著的相关性。这表明重庆至涪陵江段的沉积物因受城市和工厂的污染影响较大,样品的相似性小;而涪陵以下江段受污染影响较小,样品间存在较好的相似性。元素间的比例匹配统计分析结果指出,钙、镁、镉、钼、铁、钴、镍、锰、锌、钒、铬、铝、钇、镧、钛之间的相关数大于或等于 0.82, 它们之间在 90% 置信水平上显著相关。这表明这些元素在沉积物中可能具有相同的存在形态,即它们可能与沉积物中的矿物成分有关。比例匹配统计分析还表明,砷、镉、铜、汞、铅、磷六元素之间以及它们与上述 15 个元素间均无显著相关。这意味着它们在沉积物中具有不同的存在形态,同时还可能反映了沉积物已受到污染的影响。

## 2.2 沉积物污染评价

用污染指数及综合污染指标评价湖泊与三峡库区江段沉积物的污染状况已有报道<sup>[1]</sup>。以长江河源区细粒径沉积物中砷、钴、铬、铜、铁、汞、锰、镍、铅、钒和锌等 12 个元素的平均含量与其 1.29 倍标准偏差之和作为评价标准<sup>[9]</sup>,按下述公式计算库区江段细粒径沉积物中 12 种元素的污染指数( $P_i$ )及综合污染指标( $P_A$ ):

$$P_i = C_i / C_{i0} \quad (4)$$

$$P = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i \quad (5)$$

$$P_A = \sqrt{\frac{1}{2} (P^2 + P_{i\max}^2)} \quad (6)$$

$C_i$ 与 $C_{i0}$ 分别为沉积物中 $i$ 元素的含量与评价标准, $P_{i\max}$ 与 $P$ 分别为沉积物中元素的最大污染指数和平均污染指数。计算结果列入表 4。

各江段沉积物中砷、镉、锰、镍 4 元素的污染指数均小于 1, 钴、铬、铜、铁、汞、铅、钒、锌等 8 元素的 $P$ 值在 0.04—5.96 之间。前 4 个元素的含量范围低于长江河源区细粒径沉积物的元素背景值,后 8 个元素因受各江段不同程度的污染而出现高于长江河源区元素背景值的状况。由三峡库区江段沉积物中各元素的平均污染指数 $P$ 与污染负荷比值 $a$ 的计算指出,细粒径沉积物主要受汞、铬、铜 3 元素的污染,其污染负荷比值的顺序为:

$$a_{\text{Hg}} > a_{\text{Cr}} > a_{\text{Cu}} > a_{\text{Fe}} > a_{\text{Zn}} > a_{\text{Co}} > a_{\text{V}} > a_{\text{Ni}} > a_{\text{Mn}} > a_{\text{Pb}} > a_{\text{Cd}} > a_{\text{As}}$$

这个结果与已研究的结论一致,三峡库区江段沉积物受汞的污染较为明显,各江段沉积物受重金属元素污染程度的顺序为:

乌江口 > 巫山 > 川染 > 川维 > 长寿(石沱) > 寸滩 > 忠县 > 木洞 > 丰都 > 朝野 > 涪陵 > 鱼嘴 > 万县 > 龙溪河口 > 奉节 > 巴东。乌江口、巫山、川染、川维、长寿(石沱)、寸滩、忠县等江段沉积物的综合污染指标均大于 1, 这些江段已受到不同程度的污染。由元素污染负荷比值可知,寸滩江段的沉积物主要受铬、汞和铅的污染,长寿江段的沉积物主要受汞、铬和铜的污染,乌江口和巫山江段的沉积物明显受到汞污染的影响。

表4 长江三峡库区沉积物污染评价

Tab.4 Evaluation of contaminated sediments in the Three Gorge Reservoir area

采样站 sampling station	As	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Hg	Mn	Ni	Pb	V	Zn	Pi	Pa
江津 Jiangjin	0.12	0.37	0.85	1.18	1.33	0.90	0.13	0.66	0.74	0.16	0.73	0.63	0.64	1.05
朝野 Zhaoye	0.07	0.08	0.76	1.20	0.74	0.77	1.21	0.54	0.69	0.09	0.75	0.59	0.61	0.96
寸滩 Cuntan	0.02	0.12	1.02	2.11	0.90	1.29	0.42	0.78	0.75	0.73	1.29	0.85	0.86	1.61
鱼嘴 Yuzui	0.11	0.39	0.77	1.09	0.84	0.78	0.95	0.56	0.62	0.27	0.46	0.59	0.62	0.89
木洞 Mudong	0.20	0.55	0.92	0.87	1.54	0.78	0.24	0.79	0.79	0.28	0.47	0.89	0.69	1.19
龙溪河口 Longxihekou	0.07	0.18	0.75	0.99	1.02	0.76	0.15	0.59	0.57	0.18	0.45	0.63	0.53	0.81
石沱 Shituo	0.13	0.17	1.21	2.68	0.49	1.59	2.79	0.80	0.82	0.58	1.13	0.76	1.10	2.12
涪陵 Fuling	0.16	0.33	0.83	1.12	0.76	0.84	1.14	0.65	0.74	0.28	0.69	0.65	0.68	0.94
丰都 Fengdu	0.12	0.32	0.97	0.89	1.40	0.80	0.44	0.86	0.83	0.24	0.69	0.87	0.70	1.11
忠县 Zhongxian	0.18	0.17	0.93	2.11	0.74	1.22	1.24	0.70	0.79	0.25	1.36	0.79	0.87	1.61
万县 Wanxian	0.15	0.14	0.76	1.09	0.55	0.79	0.04	0.56	0.67	0.20	0.62	0.58	0.51	0.85
奉节 Fengjie	0.16	0.26	0.82	0.94	0.76	0.73	0.48	0.59	0.77	0.20	0.60	0.63	0.58	0.78
巫山 Wushan	0.14	0.13	0.91	2.39	0.67	1.34	5.96	0.74	0.72	0.32	1.43	0.78	1.29	4.31
巴东 Badong	0.15	0.13	0.76	0.86	0.77	0.71	0.55	0.62	0.70	0.10	0.58	0.61	0.54	0.72
乌江口(涪陵) Wujiangkou (Fuling)	0.10	0.26	0.63	0.94	0.46	0.64	8.58	0.64	0.63	0.14	0.63	0.52	1.18	4.13
嘉陵江口 Jialingjiangkou	0.15	0.14	0.45	0.74	0.46	0.50	0.55	0.44	0.52	0.16	0.35	0.45	0.41	0.60
川荣 Chuanran	0.17	0.34	0.63	1.00	3.20	0.81	2.01	0.34	0.69	1.23	0.36	1.54	1.03	2.38
川维 Chuanwei	0.13	0.13	0.87	1.09	0.67	0.83	0.68	0.62	0.73	0.15	0.64	0.64	0.60	0.88
川维口 Chuanweikou	0.13	0.20	0.63	0.98	0.66	0.71	0.73	0.56	0.65	0.13	0.70	3.07	0.76	2.24
平均污染指数 P	0.13	0.23	0.81	1.27	0.95	0.88	1.49	0.63	0.71	0.30	0.73	0.85	0.75	1.54
污染负荷比值 a, %	1.4	2.5	9.1	14.1	10.5	9.9	16.6	7.1	7.9	3.3	8.1	9.4		

2.3 沉积物的汞元素富集因子

用铁、铝、镧、钇和钛作为归一化元素,以重庆上游江津江段的沉积物作参照,按下式计算各江段沉积物的汞元素富集因子(EF):

$$EF = \frac{(Hg / R)_i}{(Hg / R)_o} \tag{7}$$

式中(Hg / R)<sub>i</sub>为*i*江段沉积物中汞含量与归一化元素含量之比值,(Hg / R)<sub>o</sub>为参照沉积物中两元素含量的比值。计算结果指出(表 5),除万县江段外,用 5 个归一化元素计算各江段沉积物的汞元素富集因子均大于 1,并且 5 组 EF 值之间具有较显著的相关(0.749≤r ≤0.945,n = 18)。此结果证明在限制沉积物粒径与成分影响的条件下,参照江津江段沉积物的汞含量,所调查的库区江段的沉积物已受到不同程度的污染。涪陵乌江口与巫山江段的 EF 值分别为 92 和 33,长寿和重庆江段的 EF 值为 16.6 和 12.8,其它江段的 EF 值在 0.4—9.93 之间。这表明三峡库区江段可能存在三种类型的汞污染源:EF 值高达 33—92 的强污染源,EF 值为 10—16.6 的城市污染源以及 EF 值低于 10 的广布型污染源。

产生三峡库区江段沉积物汞污染的主要原因是川东南高汞背景和高汞燃煤大气污染的影响。重庆市燃煤排放的汞使大气尘埃中汞含量高达 3.5mg / kg<sup>[10]</sup>,据四川省土壤元素

背景值调查表明<sup>1)</sup>,四川省土壤元素背景值分布特征是川东略高于川西,川东南显著高于全省水平。如重庆<sup>2)</sup>、涪陵、黔江地区土壤的汞含量为 0.08—0.20mg / kg,万县地区沿江两岸的土壤汞含量为 0.05—0.11mg / kg,均高于四川省的平均水平(0.04mg / kg)。由于三峡库区土壤侵蚀模数<sup>[1]</sup>高达 2047—4168t / a.km<sup>2</sup>,高汞土壤流失是造成沉积物汞富集因子普遍增高的一个重要原因。此外,高汞土壤背景的分布趋势还与川东南的地质条件和含汞量高的煤有关。

表5 三峡库区沉积物中汞的富集因子

Tab.5 Mercury enrichment factors of sediments from The Three Gorge Reservoir area							
采样站	sampling station	Hg/Fe	Hg/Al	Hg/La	Hg/Y	Hg/Ti	average
朝野	Zhaoye	10.9	9.0	15.2	13.0	15.7	12.8
嘉陵江口	Jianlingjiangkuo	7.7	3.6	7.0	4.8	13.1	7.2
寸滩	Cuntan	2.3	3.7	1.9	2.1	2.3	2.5
鱼嘴	Yuzui	8.5	7.7	9.0	7.9	9.2	8.5
木洞	Mudong	2.2	1.5	2.2	2.0	2.8	2.1
川染	Chuanran	17.2	10.1	14.0	6.0	35.6	16.6
川维	Chuanwei	7.2	5.1	6.8	6.0	10.9	7.2
川维口	Chuanweikuo	5.7	4.8	6.8	5.6	7.0	6.0
龙溪河口	Longxihekou	1.4	1.2	1.4	1.2	1.6	1.4
石沱	Shituo	12.2	26.5	14.0	14.6	14.9	16.4
涪陵	Fuling	9.5	8.1	11.0	9.2	11.7	9.9
乌江口	Wujiangkuo	93.5	54.8	94.8	66.0	151	92.0
丰都	Fengdu	3.8	2.6	4.7	3.9	5.7	4.1
忠县	Zhongxian	7.1	10.1	7.2	6.8	7.8	7.8
万县	Wanxian	0.4	0.3	0.5	0.4	0.5	0.4
奉节	Fengjie	4.5	3.0	5.7	3.9	6.2	4.7
巫山	Wushan	30.9	48.5	22.2	26.5	36.6	32.9
巴东	Badong	15.4	3.5	7.4	5.1	7.6	7.8

三峡库区毗邻武陵汞矿成矿亚区<sup>[11]</sup>,汞矿化沿一系列大体等距和平行的区域褶皱及断裂带分布,矿带主要呈北北-北东向。贵州和四川的汞矿开发已对乌江下游的生态与环境产生较大的影响。如乌江支流洪渡河地区的务川汞矿,由于开发不合理,洪渡河已遭到严重的汞污染。沉积物与沿岸土壤中的汞含量高达几十 mg / kg,并发现鱼体中汞含量超过我国食品允许的标准(0.3mg / kg)。这种污染使涪陵乌江口沉积物的汞的 EF 值高达 92,对三峡库区江段的生态与环境产生了一定的影响。因此,在兴建三峡大坝时,对川东和川东南高汞背景的影响应给予高度重视。

参 考 文 献

[1] 中国科学院三峡工程生态与环境科研项目领导小组编. 长江三峡工程对生态与环境的影响及其对策研究. 北

1) 四川省环境保护科学研究所资料。  
2) 重庆市环保局,1991,重庆市环境质量报告书(1986—1990)



- 京:科学出版社, 1987, 155—221
- [2] Benmard A M. Partial Extraction of Metals from Aquatic Sediments. *Environmental Science & Technology*. 1977, **11**(3): 277—282
- [3] Vinoent S A. Determination of Metal Enriment Factors. *Environmental Science & Technology*. 1991, **25**(10): 1760—1766
- [4] Oswald U A. Ration Matching —a Statistical aid for Discovering Generic Relationships among Samples. *Analytical Chemistry*. 1972, **44**(12): 1930—1933
- [5] “环境污染分析方法”编写小组编. 环境污染分析方法. 北京:科学出版社, 1980
- [6] 张兆勋等. 天然水及河流底泥中微量元素等离子原子发射光谱分析法. 见:中国环境科学研究. 上海:上海科学技术出版社. 1988, 1259—1262
- [7] 泰勒著, 蒋子刚等译. 标准参考物质使用手册. 上海:上海科学技术出版社, 1987
- [8] 徐小清等. 大冶湖污染调查和环境质量评价研究. 见:海洋湖沼环境污染学术讨论会论文集. 北京:科学出版社. 1984, 49—57
- [9] 张立诚等. 长江河源区主要河流水系水体元素背景值及其化学地理特征. 见:化学元素背景值研究. 北京:测绘出版社. 1989: 1—12
- [10] 陈尧华. 重庆地区部分水域沉积物汞污染现状. 重庆环境保护, 1984, **6**(2): 40—42
- [11] 曾若兰等著. 中国矿产. 成都:四川科学出版社. 1988, 165—172

## HEAVY METAL POLLUTION IN SEDIMENTS FROM THE THREE GORGE RESERVOIR AREA

Xu Xiaoqing Deng Guanqiang Hui Jiayu Zhang Xiaohua and Qiu Changqiang

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

**Abstract** Determination of 21 heavy metals in sediments from the Three Gorge Reservoir area was conducted. The results of the ration matching analysis show that there is a good correlation among sediments in the Fulin-Badong reaches of the Changjiang River, but the low correlation in the Chongqing-Fulin reaches. This means that in the reaches the sedimentation is affected by municipal wastewater, and similarity among sediment samples is low, but the good similarity of samples from the Fulin-Badong reaches because of light pollution. There seems to be in high correlation among Mg, Sr, Ba, Fe, Co, Ni, Cr, Mn, Zn, Al, Ca, V, Y, Ti in sediments, this indicates that the speciation of these elements in sediments is similar, the differences of the correlation among As, Cd, Cu, Hg, Pb, P are considered that the speciation of the elements in sediments may be affected by pollution. Under conditions of limiting grain size and constitute of sediments, values of mercury enrichment factor are 33—92, this confirms that sediments in the Three Gorge Reservoir Area reaches are polluted by mercury. The analysis of Ef indicates that anthronogenic sources of mercury are the high mercury background area of the southeast Sichuan province, China, Burning of coat with high content of mercury, mining and municipal wastewater.

**Key words** Sediment, Heavy metal enrichment factor Three Gorge Reservoir, Mercury, Pollution