

三峡水库蓄水以来长江中下游干流河床沉积物 粒度变化的初步研究

徐晓君^{1,2}, 杨世伦¹, 张 珍¹

(1 华东师范大学 河口海岸学国家重点实验室, 上海 200062 2 上海市浦东教育发展研究院, 上海 200135)

摘要: 于 2008 年在宜昌至徐六径之间的 1 600 km 干流河道进行 30 个横断面取样和分析, 与前人于三峡水库蓄水前的取样分析资料进行对比。结果表明: ① 三峡水库蓄水以来坝下游约 400 km 的干流河床 (宜昌至城陵矶) 沉积物出现全程粗化, 越近大坝粗化越明显, 这种沉积物粗化与水库蓄水后坝下游河床出现的强烈侵蚀密切相关; ② 蓄水前后城陵矶以下的 1 200 km 干流河床沉积物粒度的沿程趋势基本一致; ③ 蓄水后河床沉积物仍保持沿程向下游变细且越近河口变化越缓慢的格局。

关 键 词: 沉积物; 粒度; 三峡水库; 长江

中图分类号: F512.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0690(2010)01-0103-05

中下游河床对河流泥沙搬运起着调节作用。当河流能量降低, 能搬运其原来搬运的泥沙时, 就会发生沉积。反之, 当河流携带的泥沙量低于其搬运能力时, 河床就会遭受侵蚀^[1-6]。河床沉积物反映一定动力条件下的河流沉积地貌环境^[7]。粒度是沉积动力学的重要判别指标^[8], 同时又是地貌学、工程地质学、生态学、生物地球化学等相关研究的基本参数之一。河床沉积物粒度影响因素多, 表现形式各异, 影响尺度各不相同。

人类活动作为有别于地球内应力以及太阳辐射外力的第三驱动力, 其对于自然环境的影响日渐增大^[9-13]。对于河流系统来说, 修建水库^[12]打破了自然系统的平衡, 使得水沙输运过程发生巨大的改变。长江流域一系列水库的修建导致近期中下游干流泥沙输运出现明显的锐减趋势。特别是 2003 年三峡水库蓄水以来, 约 2/3 来自上游的泥沙被拦截在水库里^[3], 出库水体含沙量急剧下降, 坝下游河床发生侵蚀^①。这种侵蚀在河床沉积物粒度上反映怎样, 其向下游的影响范围到达何处, 目前知之甚少, 这也正是本文的目的。

1 研究区概况

长江为世界第三大河。宜昌以上为上游段, 长

4 504 km。宜昌至湖口为中游段, 长 955 km, 其间北有主要支流之一的汉江汇入, 南有洞庭湖水系相连。湖口以下为下游段, 长 938 km, 其间有鄱阳湖水系汇入^[11] (图 1)。三峡大坝修建在宜昌上游约 40 km 的三峡出口, 大坝体积 $2\,671 \times 10^4 \text{ m}^3$, 为世界之最。三峡水库总库容 $393 \times 10^8 \text{ m}^3$, 居世界第 24 位^[3]。长江出三峡以后由山区性河流转为平原河流, 坡降变小, 河面展宽, 流速降低, 易于泥沙落淤。20 世纪 50~60 年代, 每年有 $(2\sim 3) \times 10^8 \text{ t}$ 上游来沙沉积在洞庭湖和宜昌至汉口间的干流河床。70 年代以来, 随着上游来沙的减少, 上述区段淤积也减少。三峡水库蓄水后, 由于上游来沙大部分沉积在水库中, 出库水体处于“饥饿”(未饱和)状态, 坝下游河床出现每年数千万吨的侵蚀^[11]。

2 采样分析方法和资料来源

2008 年 1 月中旬在船上利用抓斗式沉积物采样器对宜昌至徐六径约 1 600 km 河段内的 30 个断面 (表 1) 上进行底床沉积物采样。每个断面上采三个样, 分别在南岸、河中部和北岸, 在采样之前利用 GPS 确定断面位置并利用回声测深仪测量取样点水深。

将所采沉积物样密封于塑料样品袋中, 在进行

收稿日期: 2009-02-12 修订日期: 2009-06-11
基金项目: 国家自然科学基金创新研究群体项目 (40721004)、科技部国家重点实验室科研业务课题 (2008KY YW 01)。
作者简介: 徐晓君 (1983-), 男, 上海人, 硕士研究生, 主要从事沉积动力过程研究。E-mail xuxiaojun365@sina.com
通讯作者: 杨世伦, 教授。E-mail shyang@sklec.ecnu.edu.cn
① 长江水利委员会. 长江泥沙公报. 2003~2006.

室内实验时, 每个样品取 2 g 左右置于烧杯, 加入蒸馏水和分散剂, 超声震荡 30 min, 使样品颗粒得以充分分散, 用激光粒度仪进行样品粒度分析, 计算各个样品的粒度参数, 包括平均粒径、中值粒径、标准偏差、偏态、峭度等。按沉积物调查规范分类, 算出粗砂 (> 0.5 mm)、中砂 (0.25~0.5 mm)、细砂 (0.063~0.25 mm)、粉砂 (0.004~0.063 mm)、

粘土 (< 0.004 mm) 等各组分的体积百分含量。对于较大的砾石, 则用游标卡尺进行长、宽、厚三维尺寸测量, 取其均值作为颗粒直径。通过计算各取样断面南、中、北的取样点平均粒度数据求出各取样断面的平均粒径。回归趋势分析采用 Excel 软件。三峡水库蓄水前的沉积物粒度资料引自王张桥^①, 其取样和分析方法与本文一致。

表 1 长江中下游河床沉积物采样断面及粒度参数 (断面平均)
Table 1 Sampling site and sediment parameters in the middle and lower Changjiang (Yangtze) River channel

断面序号	断面名称	距三峡大坝	平均粒径	平均粒径	分选系数/标准	偏度 SKI
		距离 (km)	(mm)	(Φ)	偏差 (Φ)	(Φ)
1	宜昌	36	24.60	-4.621	未测	未测
2	枝城	81	0.433	1.208	0.591	-0.056
3	七星台	134	0.339	1.561	0.579	-0.107
4	沙市	184	0.284	1.816	0.601	-0.027
5	石首	275	0.276	1.857	0.448	0.091
6	监利	337	0.250	2.000	0.457	0.166
7	城陵矶上	412	0.194	2.366	0.918	0.336
8	城陵矶下	422	0.173	2.531	1.153	0.301
9	南门洲	478	0.203	2.300	0.635	0.184
10	嘉鱼	520	0.231	2.114	0.650	0.168
11	牌洲镇	574	0.145	2.786	1.136	0.347
12	鹦鹉洲	645	0.153	2.708	1.066	0.254
13	汉口	655	0.231	2.114	1.004	0.320
14	鄂州	746	0.192	2.381	0.572	0.146
15	茅山港	797	0.246	2.023	0.604	0.044
16	武穴	851	0.145	2.786	1.204	0.451
17	九江	898	0.083	3.591	1.661	0.443
18	孤山	956	0.174	2.523	0.985	0.102
19	华阳港	1003	0.256	1.966	0.732	0.094
20	安庆	1046	0.107	3.224	1.642	0.448
21	安庆-大通	1105	0.291	1.781	0.538	0.112
22	大通	1138	0.149	2.747	1.050	0.023
23	丁家洲尾	1190	0.127	2.977	1.024	0.334
24	芜湖	1235	0.176	2.506	0.880	0.343
25	牛轭湖	1286	0.162	2.626	0.871	0.376
26	南京	1332	0.145	2.786	1.323	0.260
27	世业洲头	1377	0.161	2.635	0.526	0.197
28	镇江	1412	0.132	2.921	1.101	0.111
29	三江营	1467	0.131	2.932	0.877	0.357
30	徐六泾	1615	0.140	2.837	0.778	0.334

3 结果与讨论

3.1 当前长江中下游河床沉积物粒度特征

1) 纵向变化。总体来说, 长江中下游河床沉积物呈向下游变细的趋势, 越近河口, 变化越缓慢。宜昌断面沉积物均为砾石, 直径介于 20~60 mm, 枝城 (距三峡大坝 81 km) 以下河床沉积物中物质组

成以中、细砂占绝对优势, 细砂占整个沉积物组成的 43% 左右, 中砂占 30% 左右, 各断面平均粒径变化于 0.083 mm (3.59 Φ) 和 0.43 mm (1.22 Φ) 之间, 分选系数 σ 的范围为 0.4~1.66 Φ, 偏度 SKI 的变化范围为 -0.11~0.45 Φ。

断面平均粒径在宜昌、枝城、七星台、沙市、石首、监利和城陵矶上分别为 24.6、0.43、0.34、0.28、

① 王张桥. 三峡封坝前长江中下游河床沉积物分布及河床稳定性模拟研究. 华东师范大学硕士学位论文, 2006.

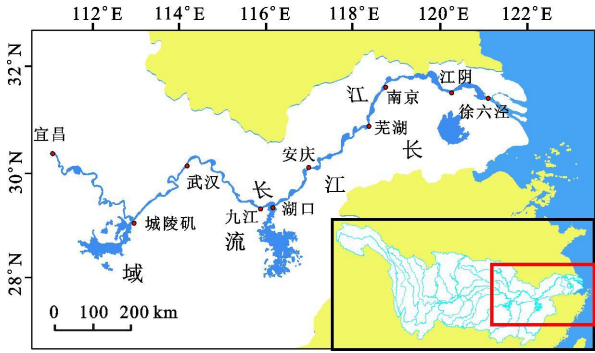


图 1 研究区域示意图
Fig 1 Sketch of study area

0.27, 0.25和 0.19 mm (- 4.62, 1.22, 1.56, 1.84, 1.89, 2.00和 2.40 Φ)。城陵矶以下尽管沉积物粒度有波动起伏(可能与支流汇入、河道弯曲和相对的深、浅段相间等有关),但幂回归拟合趋势线仍呈向下游变细的缓慢趋势(图 2)。根据 Church and Kellerhals的河床沉积物向下游沿程变细理论,河床沉积物的颗粒大小与河流水动力相适应。水动力越强,沉积物越粗,反之沉积物越细^[4-5]。长江愈往下游,比降愈小,流速也越小^[3],与之相适应的河床沉积物也越细。但是,从具体的取样断面粒度数据来看,“沿程细化”只是一种趋势性的、较宏观的现象。河流的实际情况由于受多方面因素的影响会出现局地的异常^[4-6]。例如洞庭湖出口处由于受到洞庭湖细颗粒泥沙的汇入,加之出湖水流速较小,细颗粒悬浮泥沙容易沉积下来,致使城陵矶下站点所采的沉积物颗粒明显较上、下游河道细,以粉砂粘土为主,与洞庭湖湖区的物质组成较为相近。汉口站取样断面两岸有堤坝约束,局部水动力较强,加之人为挖砂等影响,致使沉积物粒径明显粗化(明显较上、下游各 100 km 的断面粗)。九江断面由于位于沙洲尾部,受到岛影缓流作用的影响,水流变缓,细颗粒泥沙易在此沉积,因此底床沉积物粒径小,是 30 个取样断面中最细的(只有 0.083 mm / 3.59 Φ)。此外,宜昌断面沉积物在沿程变化趋势上异常地粗,反映了其受到三峡水库蓄水后坝下游强烈侵蚀的影响。三峡水库一、二期蓄水位分别为 135 (2003 年)和 156 m (2006 年),比蓄水前的自然河道水位提高 1 倍左右。蓄水后,出库水体形成巨大落差,坝下游水流异常湍急,加之出库水体含沙量较蓄水前降低一半以上,坝下数十千米河道范围内出现强烈侵蚀,砂、泥甚至较细的砾石被淘浑一空,留下的只有粗砾。这些局部的异

常说明由于支流汇入、人类采砂以及大坝修建等可导致河床沉积物“沿程细化”趋势的复杂化。

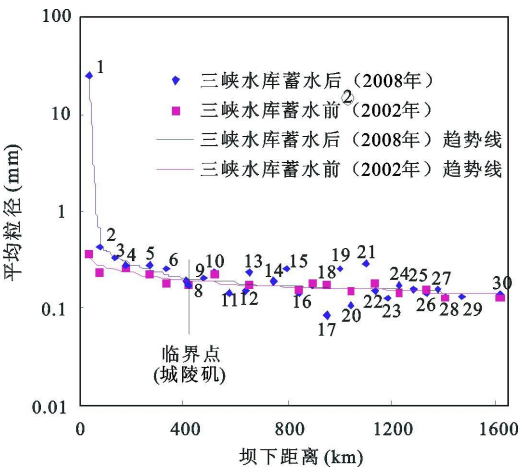


图 2 长江中下游断面平均粒径的纵向变化
(2002 年资料引自上页脚注①)
Fig 2 Changes in section average of mean grain size along the middle and lower reaches of the Changjiang River

自三峡大坝蓄水以来,城陵矶以上干流河道经过强烈冲刷,河床沉积物只剩下侵蚀残留的粗颗粒物,构成较单一,因此分选性很好,标准偏差 σ 很小(平均只有 0.53)。而通常来说,在两种截然不同的物源交汇处,沉积物的分选性较差^[7]。实测发现,在城陵矶下口段、汉口断面处,由于两种不同粒径的沉积物在此交汇(洞庭湖、汉江、鄱阳湖汇入长江的沉积物明显较干流的细),分选性较差,沉积物标准偏差处于较高值(分别为 1.15 与 1.00)。

2) 横向变化。根据取样点的水深数据看,一般而言,南岸水深较北岸大,河道主泓偏向南岸。这符合科氏力定律,即北半球河流主泓有右偏趋势(面向下游),长江总体上为自西向东流,右岸即南岸。与此相对应的是,总体而言南岸沉积物较北岸粗(图 3),南岸平均粒径为 0.21 mm,北岸为 0.16 mm(河中部为 0.24 mm)。在汉口、孤山、大通、南京、镇江等断面,南北岸粒径差异严重,出现了南岸一侧为粘土质粉砂而北岸一侧为粗砂的现象。

3.2 三峡水库蓄水前后河床沉积物粒度的对比
1) 三峡大坝 - 城陵矶河段。在该河段的宜昌、枝城、沙市、石首、监利和城陵矶上断面,三峡水库蓄水后的断面平均粒径与蓄水前的平均粒径比值分别是 68.7(24.6 mm / 0.36 mm)、1.91(0.43

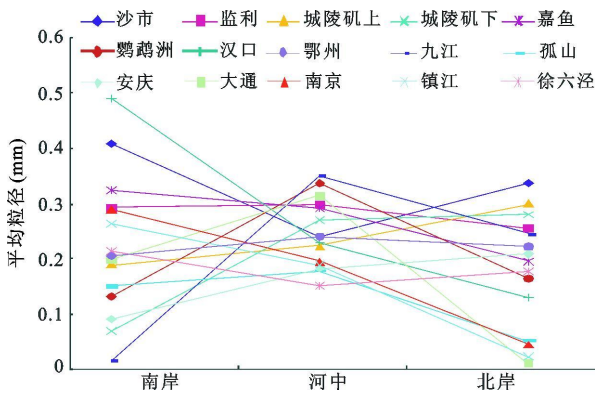


图 3 代表性断面河床沉积物平均粒径的横向变化

Fig. 3 Breadthwise distribution of mean grain size from the river channel in the middle and lower Changjiang River

mm / 0.23 mm)、1.13 (0.28 mm / 0.25 mm)、1.23 (0.28 mm / 0.22 mm)、1.37 (0.25 mm / 0.18 mm) 和 1.06 (0.19 mm / 0.18 mm), 反映在坝下 400 多 km 的范围内, 水库蓄水后河床沉积物全面粗化, 越靠近大坝, 粗化越显著 (图 2)。这无疑与水库蓄水以来坝下游河床的侵蚀有关。据长江水利委员会的测量, 2003 ~ 2006 年宜昌至城陵矶河段的冲刷量达到 $1.28 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^①, 相当于每年每公里河段侵蚀 $8.4 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。除了紧靠大坝的河床冲刷至仅存残留粗砾后难以继续下蚀外, 宏观上侵蚀的强度自大坝向下游逐渐减弱。例如, 三峡大坝至枝城河段 2003 年侵蚀 $40 \times 10^4 \text{ m}^3 / \text{km}$, 是沙市河段 (长 50 km) (2003 ~ 2006 年) 的 1.7 倍^①, 是整个宜昌至城陵矶河段 (2003 ~ 2006 年) 的 4 倍。

2) 城陵矶以下河段。2008 年取样分析结果与三峡水库蓄水前相比, 城陵矶至徐六泾河段河床沉积物没有明显的规律性变化。尽管有些断面差异显著, 但由幂回归拟合的蓄水前后沉积物粒径沿程变化的两条趋势线几乎重合。这可能反映 2008 年的该河段的沉积环境与三峡水库蓄水前相比没有根本性的变化。据统计分析结果, 三峡水库蓄水后城陵矶至汉口在 2003 ~ 2006 年间累计侵蚀量为 $0.24 \times 10^8 \text{ m}^3$, 但每年每公里平均侵蚀只有 $3.3 \times 10^4 \text{ m}^3$, 仅相当于宜昌至城陵矶河段的侵蚀率的 40%。另外从干流经四口 (松滋口、虎渡口、藕池口和安乡口) 进入洞庭湖的泥沙有减少的趋势, 湖区局部冲刷强度加大^[14~16], 就意味着将有更多的湖区的细颗粒通过河湖交换从城陵矶进入干流河道。这种河湖交换机制在一定程度上削弱了由于

侵蚀作用而导致的城陵矶至汉口河段沉积物本来就不甚明显的粗化现象。三峡水库蓄水前后, 汉口以下河段没有发生明显的冲淤变化, 其河道稳定性较高, 基本上起着过水过沙通道的作用^[11]。

4 结 论

三峡水库蓄水以来, 一方面由于大部分泥沙沉积在水库内, 出库水体含沙量急剧下降, 另一方面因水库水位抬高 1 倍, 出库水体形成巨大落差, 坝下游一定范围内水动力明显加强, 从而导致水体挟沙能力明显超过其含沙量, 水体未饱和而引起河床侵蚀。侵蚀带走河床沉积物中相对较细的组分而留下相对较粗的颗粒, 从而造成沉积物粗化, 这种粗化现象可延伸至城陵矶 (据三峡大坝约 400 km) 附近, 而在城陵矶以下河段沉积物粒径的沿程变化趋势与三峡水库蓄水前基本一致。目前三峡大坝至宜昌段近 40 km 范围内河床沉积物均由侵蚀残留的粗砾组成, 受侵蚀作用影响, 宜昌至城陵矶河道沉积物也逐步粗化, 进一步加大了这一区域的侵蚀难度, 导致水体未饱和状态向下游延伸。由此而导致的强烈侵蚀带以及与之相对应的河床沉积物粗化带的下限从城陵矶逐步向下游移动, 将使得中下游河道的稳定性以及安全性受到巨大的挑战。

致谢: 现场取样得到何青教授、顾靖华老师、刘红博士、史本伟博士等的帮助, 论文构思过程中得到张经教授的指点, 特致谢忱!

参考文献:

- [1] Yang S L, Zhang J Dai S B et al Effect of deposition and erosion within the main river channel and large lakes on sediment delivery to the estuary of the Yangtze River [J]. Journal of Geophysical Research 2007, 112 F02005 1-13.
- [2] Yang S L, Zhang J Zhu J et al Impact of Dams on Yangtze River Sediment Supply to the Sea and Delta Wetland Response [J]. Journal of Geophysical Research 2005, 110 F03006 1-12.
- [3] Yang S L, Zhang J Xu X J Influence of the Three Gorges Dam on downstream delivery of sediment and its environmental implications Yangtze River [J]. Geophysical Research Letters 2007, 34 1-5.
- [4] Church M, Kelkhal R On the statistics of grain size variation along a gravel river [J]. Canadian Journal of Earth Science 1978, 15(15): 1151-1160.
- [5] Rice S, Church M. Which tributaries disrupt downstream fining along gravel-bed rivers [J]. Geomorphology 1998, 22(1): 39-

① 长江水利委员会. 长江泥沙公报. 2003~2006.

56

[6] Surian N. Downstream variation in grain size along an Alpine river: analysis of controls and processes [J]. Geomorphology, 2002, **43**(1): 137~ 149

[7] 何华春, 丁海燕, 张振克, 等. 淮河中下游洪泽湖湖泊沉积物粒度特征及其沉积环境意义 [J]. 地理科学, 2005, **25**(5): 590~ 596

[8] 杨世伦. 海滨沼泽沉积物特征 [J]. 地理科学, 1987, **7**(4): 374~ 382

[9] 李子君, 李秀彬. 近 45 年来降水变化和人类活动对潮河流域年径流量的影响 [J]. 地理科学, 2008, **28**(6): 809~ 818

[10] 高华中, 姚亦锋. 近 50 年来人类活动对博斯腾湖水位影响的量化研究 [J]. 地理科学, 2005, **25**(3): 305~ 309

[11] 吴小根, 王爱军. 人类活动对苏北潮滩发育的影响 [J]. 地理科学, 2005, **25**(5): 614~ 620

[12] 马小凡, 郭晓泽, 王 菊, 等. 水坝工程建设与生态保护的利弊关系分析 [J]. 地理科学, 2005, **25**(5): 621~ 625

[13] 杜景龙, 杨世伦. 长江口北槽深水航道工程对周边滩涂冲淤影响研究 [J]. 地理科学, 2007, **27**(3): 390~ 394

[14] 张 仁. 长江三峡工程的泥沙问题 [J]. 中国三峡建设, 2007, (1): 5~ 9

[15] 洪 林, 董磊华, 李文哲. 三峡工程建库后对洞庭湖水位、泥沙和水质的影响分析 [J]. 中国水利, 2007, (6): 13~ 14

[16] 李景保, 尹辉卢, 卢承志, 等. 洞庭湖区的泥沙淤积效应 [J]. 地理学报, 2008, **63**(5): 514~ 523

Variation in Grain Size of Sediment in Middle and Lower Changjiang River Since Impoundment of Three Gorges Reservoir

XU Xiao-jun^{1,2}, YANG Shi-lin¹, ZHANG Zhen¹

(1 State Key Labotory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062;
2 Shanghai Pudong Institute of Education Development, Shanghai 200135)

Abstract As the core of fluvial geomorphology, sediment parameters reflect the sedimentary environment in river system. The impoundment of the Three Gorges Dam (TGD) is a doubtless inducement of the erosion of the middle and lower Changjiang (Yangtze) River channel. Compared the sediment samples data collected before TGD and after TGD, we dig out some rules which reflect the impact of the TGD. The results show that 1) caused by the erosion, the grain size of sediment coarsened intensively from Yichang to Chenglingji. Where closed to TGD, the tendency of coarsening behaves more apparent. 2) The variation in grain size seems to be inconspicuous from Chenglingji to river mouth during 2002–2006. 3) The sediment component tends to be finer along the river downstream to river mouth.

Key words sediment; grain size; Three Gorges Dam; Changjiang River