

文章编号:1000-5641(2016)02-0090-11

三峡建坝后长江宜昌—汉口河段水沙 与河床的应变

袁文昊, 李茂田, 陈中原, 尹道卫, 韦桃源

(华东师范大学 地球科学学部, 上海 200062)

摘要: 通过三峡建坝前后 1950—2013 年的水文、泥沙与 2003 年和 2011 年的实测河床底形资料对比, 试图讨论长江中游宜昌—汉口河段水沙及河床地形等应变量对三峡建坝的响应, 为人们理解河流水沙及河床冲淤对超大型水库应变的幅度提供具体案例。三峡建坝后, 宜昌站和汉口站年均流量由建坝前的 $13\,850\text{ m}^3/\text{s}$ 和 $22\,650\text{ m}^3/\text{s}$ (1950—2002) 减少到建坝后的 $12\,450\text{ m}^3/\text{s}$ 和 $21\,000\text{ m}^3/\text{s}$ (2003—2013), 分别减少 10.1% 和 7.2%; 年均输沙量由 5.56 亿 t 和 4.02 亿 t (1950—2002) 锐减至 0.6 亿 t 和 1.5 亿 t (2003—2013), 分别减少 89.5% 和 62.2%; 年均悬沙中值粒径则由 $35\text{ }\mu\text{m}$ (1950—2002) 和 $25\text{ }\mu\text{m}$ (1955—1975) 减少至 $4\text{ }\mu\text{m}$ 和 $15\text{ }\mu\text{m}$ (2003—2010)。同时, 水流挟沙不饱能力的增加, 引起了河床的沿程冲刷及泥沙粗化, 宜枝河段、荆江河段和城汉河段深处分别平均冲刷了 3.7 m、1.5 m 和 0.4 m, 在主槽刷深的同时, 河道浅滩有不同程度的萎缩。三峡建坝已导致中游水沙及冲淤条件发生了巨大改变。

关键词: 三峡建坝; 长江中游; 应变; 水沙过程; 动力地貌

中图分类号: P47 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1000-5641.2016.02.012

Responses of runoff-sediment flux and bedform in the Middle Yangtze River to the completion of the Three Gorges Dam

YUAN Wen-hao, LI Mao-tian, CHEN Zhong-yuan,
YIN Dao-wei, WEI Tao-yuan

(Faculty of Earth Sciences, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

Abstract: Comparison methods are used to examine the responses of hydro-sediment and river bedform after the completion of the Three Gorges Dam. Data are based on the historical data of runoff and sediment discharge (1950—2013) and in-site measured data of depth and bedload (2003, 2011). The results demonstrate that the average annual discharge at Yichang and Hankou stations has decreased 10.1% and 7.2% after the Three Gorges Dam completion. The average annual sediment flux of the Yichang and Hankou stations decreased from 556 and 402 Mt/a to 60 and 150 Mt/a, accounted for 89.5% and 62.2% of that have been trapped by the Three Gorges Dam. In addition, the average annual medium diameter of suspended sediment at Yichang

收稿日期: 2015-02

基金项目: 长江中下游典型大坝水库泥沙淤积过程中溶解硅滞留行为探究(41271520)

第一作者: 袁文昊, 男, 博士研究生, 研究方向为河流动力地貌学. E-mail: yuanwh9815@163.com.

通信作者: 李茂田, 男, 副教授, 研究方向为河流动力地貌学. E-mail: mtlit@sklec.ecnu.edu.cn.

and Hankou stations has decreased from $35\ \mu\text{m}$ and $25\ \mu\text{m}$ to $4\ \mu\text{m}$ and $15\ \mu\text{m}$, but the bed load has become coarser and coarser. The depth at the thalweg has also increased to $0.4\sim 3.7\ \text{m}$ due to the bed erosion after the Three Gorges Dam impoundment.

Key words: completion of the Three Gorges Dam; Middle Yangtze River; response; runoff and sediment processes; dynamical geomorphology

0 引言

河流过程是一个水流、泥沙和河床地貌三者之间相互作用、互为因果的系统过程,水流和泥沙共同塑造河床地貌,河床地貌又反过来约束水流和泥沙运动^[1-4]. 人类为利用河流资源,自古以来就在河流上建坝进行拦、调、蓄、排水^[4-5]. 截止2010年,全世界高度超过15 m的“大坝”有50 000座^[6]. 大坝在带来航运、发电、防洪等社会效益的同时,也改变着流域水文、泥沙的自然过程,导致河床地貌冲淤向新的方向发展^[4,7]. 深入认识大坝对流域自然过程的干扰度,并且分析流域环境对这种干扰的适应过程,是人类开发利用河流的前提和共同课题^[6,8-9].

长江长6 300多km,流域面积180万 km^2 ,年径流量9 600多亿 m^3 ,长江是中国乃至东亚最基本自然生态和社会经济基础^[10-11]. 长江从上游流经三峡以后,比降迅速降低到 $2\times 10^{-5}\sim 3\times 10^{-5}$,由高山峡谷变为冲积平原,千万年来,河床不断淤积形成著名善淤善决的地上悬河—荆江,水涝灾害频发^[12-13]. 三峡大坝是世界上最大的水利工程,从1912年提议建设以来,其对长江尤其是下游荆江河段的冲淤影响就饱受争议. 自2003年大坝建成以来,人们更是聚焦在大坝对下游荆江河段水沙及河床冲淤的具体影响^[11,14]. 本文在前期研究的基础上^[15-16],对比建坝前后1950—2013年的水文、泥沙与2003年、2011年实测河床底形资料,尝试讨论长江中游宜昌—汉口河段水沙及河床冲淤等具体的应变量对三峡建坝的响应,为人们理解河流水沙及河床冲淤对超大型水库应变的幅度提供典型的案例或尺度.

1 研究区域、资料和方法

1.1 研究区域

三峡水库大坝位于宜昌上游约46 km处,设计的蓄水水位为175 m,水库回水河段长566 km,平均宽约1 110 m,面积1 084 km^2 ,平均水深约70 m,坝前最大水深170 m左右. 三峡水库总库容 $393\times 10^8\ \text{m}^3$,其中调节库容 $165\times 10^8\ \text{m}^3$,约占坝址处年径流量 $4\ 510\times 10^8\ \text{m}^3$ 的3.7%,季节调水频繁^[17](见图1).

三峡大坝下游的宜昌至汉口河段为长江中游河段,全长626 km. 其中宜昌至枝城的宜枝河段,是由基岩峡谷型河流向冲积平原型河流的过渡河段. 枝城至城陵矶河段是著名的荆江河段,长约340 km,以藕池口为界可进一步划分成上、下荆江河段. 荆江河段为微弯型河道或者曲流河段,河流蜿蜒曲折,善淤善决,洪涝灾害频发,以至于河流两岸修建了巨大的荆江大堤以防洪减灾. 在荆江大堤的南岸有松滋、太平、藕池3个分流口使长江水可以分泄到洞庭湖,在洞庭湖区,与属于洞庭湖水系的湘、资、沅、澧水等支流汇合后,再在城陵矶重新汇入长江干流. 长江经过城陵矶以后折向东北,在到达武汉附近时汉江水系也汇入长江^[12-14,18](见图1).

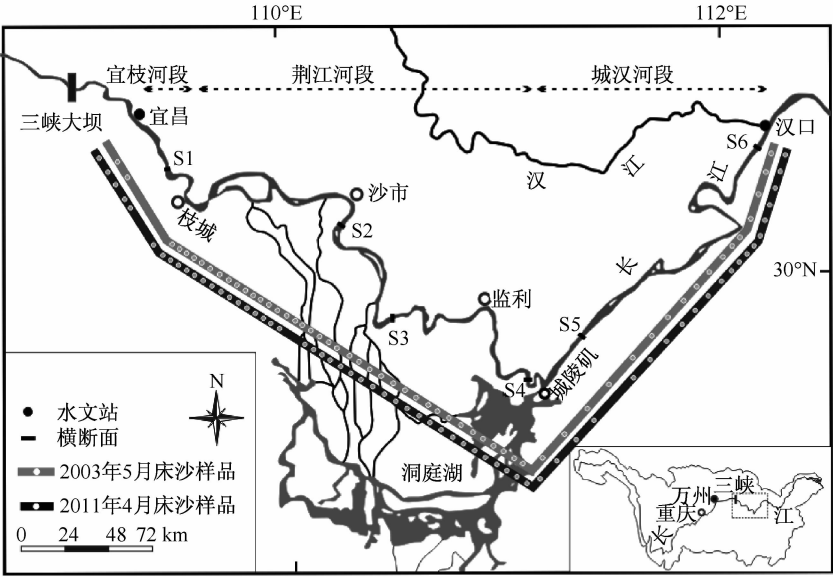


图 1 长江三峡大坝及下游宜昌—汉口河段示意图

Fig. 1 The sketch of the Three Gorges Dam and Yichang-Hankou reach

1.2 水位、流量、输沙量、悬沙、床沙粒度及河道底形资料

本文利用三峡大坝上游 290 km 的万州水文站 2011 年逐日水位资料来说明三峡水库蓄、排水的方式^[19]. 收集并对比三峡大坝下游的宜昌、汉口两个控制水文站建坝前后的水文和泥沙资料, 定量说明大坝建成后下游河段水文、泥沙应变幅度. 建坝前的流量、悬沙浓度及粒度资料主要来自长江水利委员会 1950—1988 年水文资料年报^[20], 为逐日数据; 建坝后的流量、悬沙浓度及粒度资料来自 2003—2010 年《中国河流泥沙公报》, 为逐月数据^[21].

除上述水沙资料, 我们分别于 2003 年 5 月和 2011 年 4 月对宜昌—汉口河段从下向上每隔 10~15 km 进行了水深测量和底沙样品的采集, 前后分别采集 71 个和 62 个航道中泓床沙样品, 采集样品在实验室用激光粒度仪进行粒度分析. 水深测量用多普勒剖面流速仪 (ADP) 进行测量, 所有实测水深数据均根据宜昌、沙市、汉口水文站在测量期间的水位数据 (85 高程) 对进行了修正 (见图 1).

河床横断面底形资料采用长江水利委员会在 2000—2010 年间对中游河道横断面的监测资料, 自上游至下游, 分别搜集了 6 个典型断面 (S1—S6), 建坝前后的底形资料, 对比横断面应变特征^[21] (见图 1).

2 结 果

2.1 三峡水库水位变化

2011 年库区内万县水文站逐日水位资料显示 (见图 2), 三峡水库的蓄、排水年内变化有如下特征: 1 月至 5 月末, 水库放水, 水位由 175 m 逐渐降到 145 m 防洪限制水位, 下游流量大于 6 000 m³/s, 比自然径流增加 1 000~3 000 m³/s; 6 至 9 月上旬汛期, 无洪水期间, 水库维持在 145 m 运行, 洪水期间, 水库拦洪蓄水, 洪峰过后放水降至 145 m 运行, 整个洪峰期间能削峰 10 000~32 000 m³/s; 9 月中旬至 10 月, 水库逐步蓄水至 175 m, 下泄流量比自

然流量减少 3 000~6 000 m³/s. 11—12 月,水库维持高水位运行.

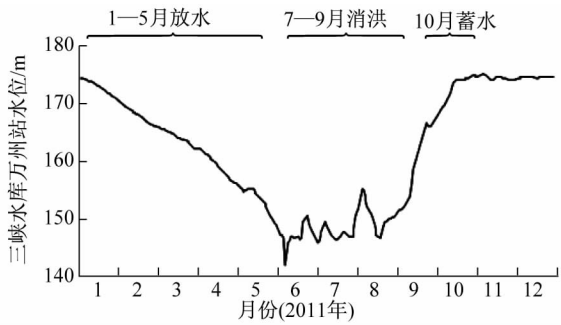


图 2 三峡水库万州站 2011 年水位过程线

Fig. 2 Variation of water level at the Wanzhou station in the Three Gorges Reservoir in 2011

2.2 宜昌—汉口流量应变

宜昌、汉口站 1950—2013 年的年径流量变化表明,建坝后水库下游年径流量小幅减少. 宜昌站建坝前 1950—2002 年年均流量 13 850 m³/s,建坝后 2003—2013 年年均流量 12 450 m³/s,减少幅度 10. 1%; 汉口站建坝前 1950—2002 年年均流量 22 650 m³/s,建坝后 2003—2013 年年均流量 21 000 m³/s,减少幅度 7. 2%(见图 3A).

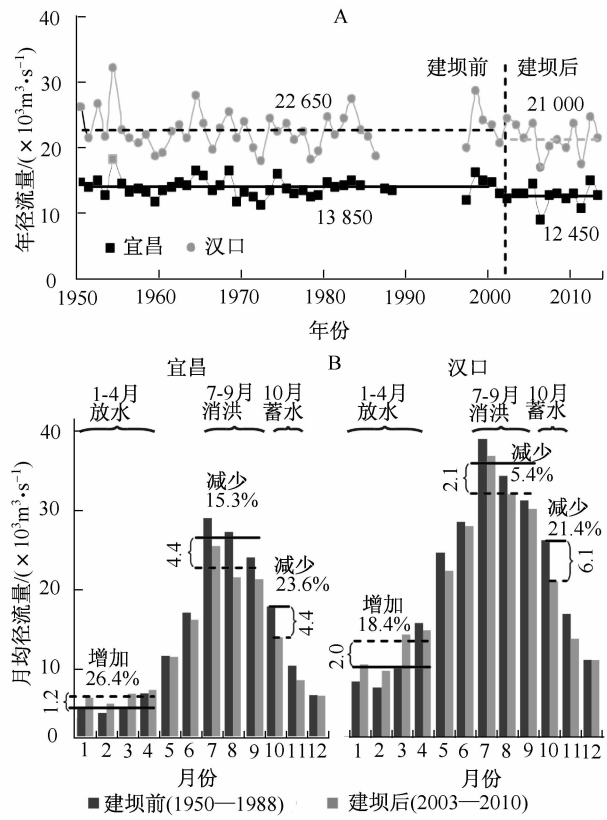


图 3 三峡封坝前后宜昌和汉口站径流量变化

Fig. 3 Changes in runoff at the Yichang and Hankou stations before and after the Three Gorges Dam completion

建坝后,随着三峡水库年内季节性的蓄排水,其下游的流量随之出现季节性的应变. 1—4 月份三峡水库排水,坝下游宜昌—汉口流量比建坝前自然流量增加. 其中,宜昌、汉口站 1—4 月份月均流量增加 $1\,234\text{ m}^3/\text{s}$ 和 $2\,006\text{ m}^3/\text{s}$,增幅分别为 26.4%和 18.4%. 7—9 月份,水库根据洪水过程蓄排水进行消峰,坝下游宜昌—汉口流量比建坝前自然流量减少. 宜昌、汉口站 7—9 月份月均流量减少了 $4\,436\text{ m}^3/\text{s}$ 和 $2\,083\text{ m}^3/\text{s}$,降幅分别为 15.3%和 5.4%; 10 月份,三峡水库为发电和改善航运条件进行蓄水,坝下游宜昌—汉口流量比建坝前自然流量减少,宜昌、汉口站 10 月份月均流量分别减少 $4\,436\text{ m}^3/\text{s}$ 和 $6\,095\text{ m}^3/\text{s}$,降幅分别为 23.6%和 15.8%(见图 3B).

2.3 宜昌—汉口输沙量应变

宜昌、汉口站 1950—2010 年的年输沙量变化表明,建坝后水库下游年输沙量大幅度减少. 宜昌站建坝前 1950—2002 年年均输沙量 5.56 亿 t,建坝后 2003—2010 年年均输沙量仅 0.6 亿 t,减少幅度 89.0%; 汉口站建坝前 1950—2002 年年均输沙量 4.02 亿 t,建坝后 2003—2013 年年均输沙量 1.5 亿 t,减少幅度 62.2%(见图 4A).

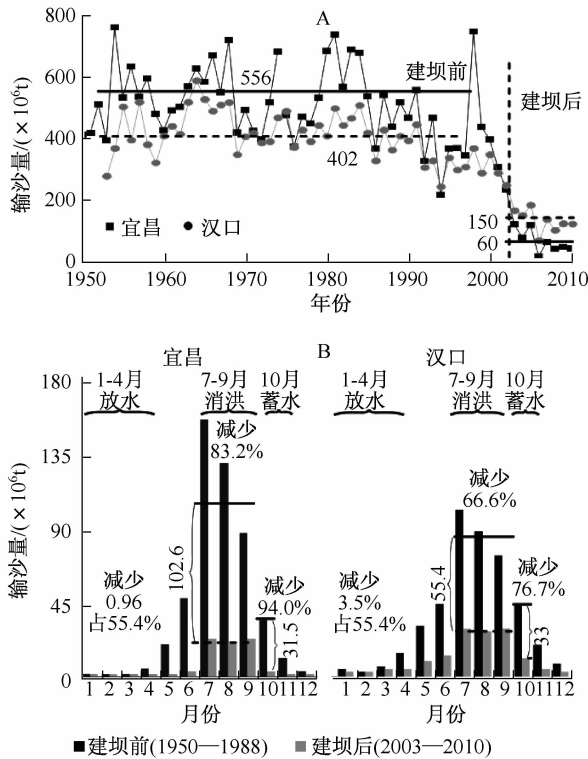


图4 三峡封坝前后宜昌、汉口站输沙量变化

Fig. 4 Changes of suspended sediments of the Yichang and Hankou stations before and after the Three Gorges Dam completion

建坝后,随着三峡水库年内季节性的蓄排水,其下游的输沙量也随之出现季节性的应变. 1—4 月份尽管三峡水库排水,坝下游宜昌—汉口输沙量比建坝前自然输沙仍然减少. 其中,宜昌站 1—4 月份月均输沙量减少 $9.6 \times 10^5\text{ t}$,减少幅度 55.4%; 汉口站 1—4 月份月均输沙量减少 $3.5 \times 10^6\text{ t}$,减少幅度 51.6%. 7—9 月份,水库根据洪水过程蓄排水进行消

峰,坝下游宜昌—汉口输沙量比建坝前自然输沙量更是大幅度减少. 其中,宜昌 7—9 月份月均输沙量减少 1.03 亿 t,减少幅度 83.2%;汉口站同期月均流量减少 0.55 亿 t,减少幅度 66.6%. 10 月份,三峡水库为发电利航进行蓄水,坝下游宜昌—汉口输沙量比建坝前自然输沙量仍然大幅减少,其中,宜昌 10 月份月均输沙量减少 0.32 亿 t,减少幅度 94.0%;汉口站同期月均流量减少 0.33 亿 t,减少幅度 76.7%(图 4B).

2.4 宜昌—汉口悬沙和床沙粒径应变

总体上,宜昌、汉口站 1955—2010 年年均悬沙中值粒度呈现减小趋势,而且在 1986 年葛洲坝封坝,2003 年三峡封坝后均呈现明显的下跌. 宜昌站年均悬沙中值粒径从 1960s 的均值 35 μm 减小到 1970s 的均值 25 μm ,1986—2002 年减小到均值 8 μm ,2003—2010 年减小到均值 4 μm (见图 5A). 汉口站年均悬沙中值粒径从 1955—1975 年年均值 25 μm 减小 2003—2010 年年均值 15 μm (见图 5A).

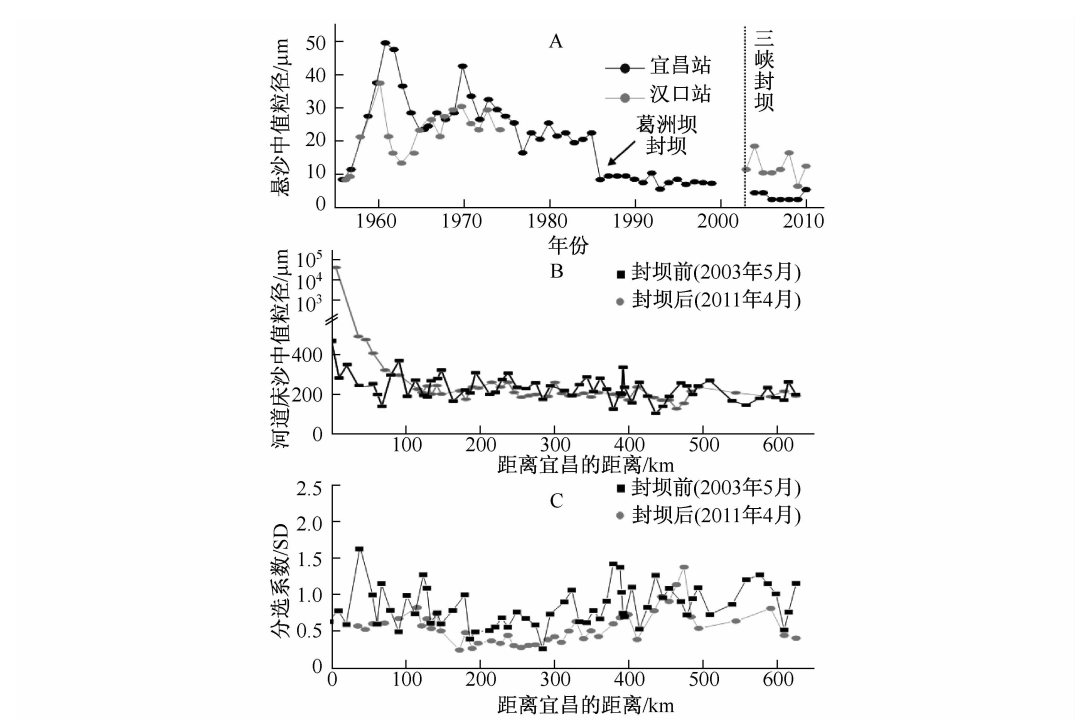


图 5 三峡封坝前后宜昌、汉口悬沙及沿程床沙粒径变化

Fig. 5 Variations in grain-size characteristics of suspended and bed loads from Yichang to Hankou stations before and after the Three Gorges Dam completion.

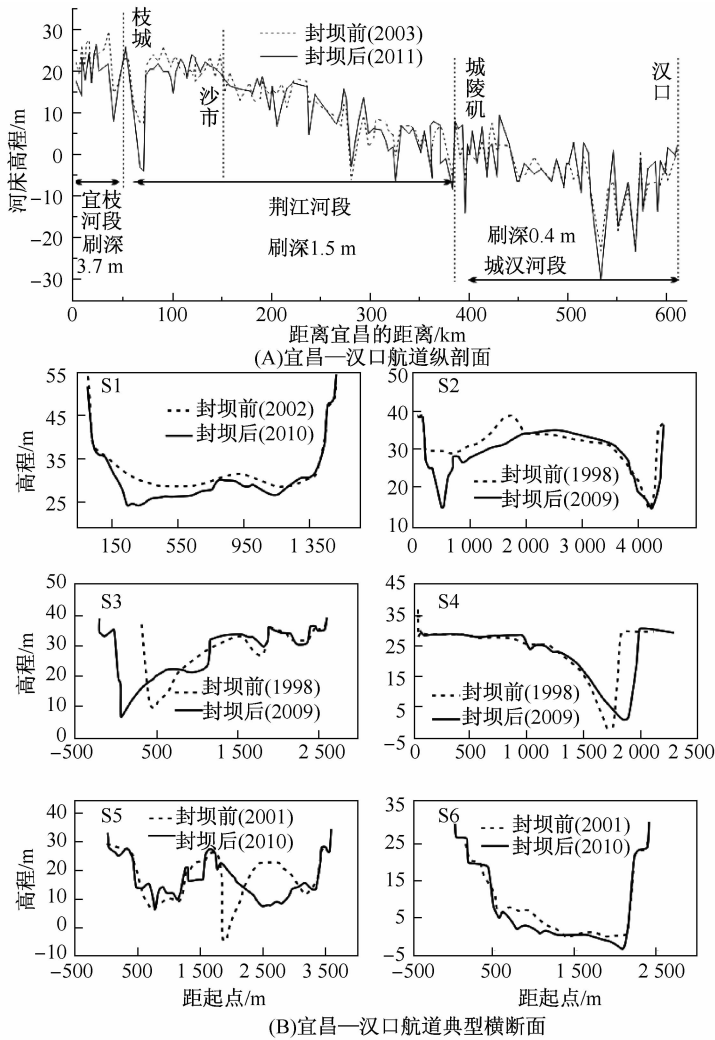
宜昌—汉口河段大部分河床都是由中值粒径在 200~300 μm 的中沙和细沙组成. 自上游至下游沿程变细. 三峡封坝后,靠近大坝的宜枝河段(距离宜昌 0~75 km)床沙普遍迅速粗化,中值粒径由建坝前的 300 μm 粗化到 450 μm (见图 5B). 宜昌附近河床,床沙中的中沙部分已被冲刷殆尽,河床组成以砾石为主,粒径可以达到 6.8 cm. 距离宜昌 100 km 以下一直到汉口的中游河段,床沙中值粒径和建坝前的情况相当,在 200 μm 左右波动(见图 5B).

床沙的分选系数反映了床沙的均匀程度,本文采用 Folk 和 Ward^[22] 的粒度统计方法对

床沙分选系数进行统计. 三峡封坝前,宜昌—汉口河段床沙分选系数在 0.7~1.2,分选差到分选中等. 三峡封坝后,床沙的分选系数变为 0.5~1.0,分选性有所提高,其中尤其以宜枝河段的泥沙分选程度提高最为明显(见图 5C).

2.5 宜昌—汉口河床底形应变

三峡封坝后,整个中游河段呈现出不同程度的刷深. 宜枝河段的刷深表现尤其明显,河床高程平均降低了 3.7 m,一些河段的刷深甚至可以达到 10 m 以上. 荆江河段,河床的冲刷逐渐减弱,河床的冲刷与淤高交替出现,整个河段平均刷深 1.5 m. 城汉河段,刷深进一步减弱,河床的冲刷与堆积仍交替出现,河床高程相比建坝之前平均刷深只有 0.4 m(见图 6A).



注:横断面数据来自《中国河流泥沙公报》

图 6 三峡封坝前后中游河段纵剖面 and 典型横断面对比

Fig. 6 Comparison of the longitudinal sections and typical cross-sections of the Middle Yangtze River before and after the Three Gorges Dam completion

三峡封坝后,中游河段的冲淤在横断面上也有明显表现. 靠近大坝的宜枝河段,横断面

以河槽刷深为主,浅滩也有刷深,如 S1 断面河槽的深泓处下切了近 5 m. 荆江河段,河床横断面形态多为不规则的 W 形、偏 V 形或 U 形,三峡封坝后其冲淤过程主要表现为主槽的刷深且横向偏移,浅滩略有淤高,例如 S2 断面主河槽刷深达 10 m 上,S3,S4 主槽刷深的同时横向迁移近 300~500 m,浅滩淤高 2~5 m 不等. 城汉河段,河道横断面岸线稳定,主槽和浅滩冲刷减弱,S5 主槽刷深横移,S6 主槽刷深 2~3 m(见图 6B).

3 讨 论

3.1 三峡水库对径流的影响

三峡水库完全改变了库区的水位过程. 库区万州水文站 2011 年的水位变化结果表明,三峡水库首先普遍抬升库区的水位,淹没 500 多 km 的自然河道,使库区水位在 145~175 m 之间波动. 其次库区的季节性蓄排水使河道水位由自然“洪高枯低”模式转变为相反的“洪低枯高”模式(见图 2). 这必将对库区河道自然生态系统产生深远的影响.

三峡水库蓄水对下游年径流量的改变并不显著. 尽管三峡建坝后,宜昌、汉口站年均径流量略有减少(见图 3A),但这一趋势分析的结果显示这一变化并不具有显著性^[15-16],而宜昌、汉口站十年中流量的年际变幅均能达到 10% 以上,比蓄水前后产生的变幅更大,因此推测气候因素可能对长江中游地区的径流量改变更具主导性. 长江等东亚季风区河流年径流量 90% 来源于大气降水,因此建坝后年径流量减少变化很可能与近十年来全球气候变化有关^[23-24].

三峡水库显著改变了坝下游季节性流量,减小洪峰流量、增加枯水流量和增加中水持续时间. 首先水库通过蓄水对洪水 and 上游大流量进行消峰、错峰,显著减小坝下游河道洪峰流量. 7—9 月份消峰使下游月均流量减少幅度 5.4%~15.3%,10 月份蓄水使下游月均流量减少 16%~24%(见图 3B). 2012 年 7 月 24 日三峡水库上游洪峰流量达 71 200 m³/s,经三峡水库调节后流量减小到 43 000 m³/s,消峰 28 000 m³/s,占洪峰流量的 39.2%^[25]. 其次,水库通过放水显著增加了坝下游枯水 and 中水流量及持续时间. 1—4 月份三峡水库排水使坝下游流量比建坝前 18.4%~26.4%(见图 3B). 水库消峰蓄水导致大流量形态由“尖瘦”变为“肥胖”,极端大流量和频率减小,导致下游河漫滩发生洪水漫滩的几率大幅下降,河漫滩面积减小,河漫滩生态系统脆弱性增加^[26-27],同时,枯水及中水流量的增加及持续时间的增加将使河槽的冲淤幅度增加. 坝下游典型断面的刷深的结果也证明了这一点(见图 6B). 因此三峡水库虽然通过蓄水消峰能显著防洪减灾,但下游径流的季节调整必将对下游河道的主槽及河漫滩演变产生深远影响^[28].

3.2 三峡水库对坝下游悬沙、床沙的影响

三峡水库大幅度减少了坝下游河道的年输沙量和月输沙量. 宜昌—汉口河段年均输沙量由建坝前的 4.0 亿~5.6 亿 t 减少到 0.6 亿~1.5 亿 t,减少幅度为 62.2%~89.5%(图 4A). 宜昌—汉口河段 1—4 月份月均输沙量减少 $9.6 \times 10^5 \sim 3.5 \times 10^6$ t,减少幅度 51.6%~55.4%; 7—9 月份月均输沙量减少 0.55 亿~1.03 亿 t,减少幅度 66.6%~83.2%; 10 月份月均输沙量减少 0.32 亿~0.33 亿 t,减少幅度 76.7%~94.0%(见图 4B). 为什么三峡水库对年径流量的影响很小,却对年输沙量和月输沙量产生巨大的影响呢? 其主要原因有两个,一个是长江上游水库及采砂活动导致入库泥沙大量减少. 三峡集团的《长江三峡水利枢纽工程竣工环境保护验收调查报告》显示,自 2003 年三峡蓄水至 2012 年,三峡入库年输

沙量为 2.03 亿 t, 仅有论证设计阶段的 42%。其二是水库调蓄过程导致泥沙沉积。洪季的大坝拦水蓄水迅速抬高水位, 降低径流比降, 导致流速迅速减小, 水流挟沙能力大幅降低, 大量悬沙沉降沉积于库区, 而枯季水库排水时, 由于水位限制在有效库容水位和死库容水位之间, 径流难以将洪季淤积的泥沙冲刷输送到下游河道, 悬沙不断淤积在库区, 导致下游河道尽管径流量通过排水得到补充, 悬沙含量和输沙量却大幅度减少^[29-33]。实际上, 水坝导致流域输沙量普遍降低是全球范围的现象。埃及尼罗河的阿斯旺高坝建坝后, 其下游 41.5 km 的 Gaffra 站的洪季含沙量由建坝前 4.89 kg/m^3 下降到 0.06 kg/m^3 ^[34]。美国科罗拉多河 Glen Canyon 大坝修建后, 坝下 Lees Ferry 站年均输沙量从建坝前的 $57 \times 10^6 \text{ t}$ 减少到建坝后的 $0.24 \times 10^6 \text{ t}$ ^[35]。中国永定河 1956 年修建了官厅水库之后, 下游的含沙量减少建坝前的十分之一^[36]; 黄河的三门峡水库汉江的丹江口水库修建后, 都引起下游含沙量和输沙量的大幅下降^[37-38]。另外, 水坝修建后, 对下游径流量和输沙量影响的不均衡性也是普遍现象, 比如, Flaming Gorge 水库修建后, 下游的径流量没有很大变化, 但是输沙量却减少了 50%^[39]。

三峡水库导致坝下游河道悬沙明显细化。宜昌站和汉口站悬沙粒径在 1986 年葛洲坝封坝, 2003 年三峡封坝后均呈现明显的减小。宜昌站在 1986 年葛洲坝封坝后, 悬沙平均粒径由 1970s 的 $25 \mu\text{m}$ 减小到 1986—2002 年的均值 $8 \mu\text{m}$, 在 2003 年三峡封坝后, 悬沙平均粒径减小到 2003—2010 年的均值 $4 \mu\text{m}$; 同样, 汉口站年均悬沙中值粒径从 1955—1975 年均值 $25 \mu\text{m}$ 减小到 2003—2010 年均值 $15 \mu\text{m}$ (见图 5A)。坝上游大量悬沙因水流减弱而淤积于库区不但是坝下游河道悬沙输沙量大幅减少的直接原因, 而且也是下游河道悬沙细化的直接原因。另外, 三峡封坝后, 下游的汉口站悬沙粒径要比宜昌站粒径粗 3 倍 (见图 5A), 说明从宜昌到汉口, 悬沙中粗颗粒不断增加, 这种悬沙粗颗粒悬沙主要来源于河道床沙的冲刷和洞庭湖流域径流粗颗粒悬沙补给。实际上, 任何径流都具有挟带泥沙的能力, 其最大能力为饱和挟沙能力, 最大能力和实际能力的差值称为挟沙不饱和能力, 不饱和能力越大, 其冲刷河床能力越大^[15, 29]。当大量悬沙被拦截淤积在库区以后, 坝下游径流的挟沙不饱和能力大幅度增加, 其侵蚀河床的能力也就越大^[15]。

三峡水库导致坝下游近百公里的河床泥沙明显粗化, 分选性增加。如上所述, 坝下游径流挟沙不饱和能力的增加必然会导致其河床的冲刷侵蚀性增强, 进而也必然会导致坝下游床沙的粗化, 分选性增强。三峡封坝后, 靠近大坝的宜枝河段床沙中值粒径由建坝前的 $300 \mu\text{m}$ 粗化到 $450 \mu\text{m}$, 以及从宜昌至汉口整个河段分选系数的提高 (见图 5B 和 5C), 都表明三峡封坝后坝下游河床泥沙的粗化。

3.3 三峡水库对坝下游河床底形的影响

三峡水库导致坝下游河道不同程度的冲刷。对建坝前后, 河道中泓处的水深测量表明, 宜枝河段的刷深表现尤其明显, 河床深泓处的高程平均降低了 3.7 m, 荆江河段深泓处平均刷深 1.5 m, 城汉河段深泓处平均刷深 0.4 m (见图 6A)。三峡水库运行后, 大量悬沙淤积于库区必然导致坝下游径流挟沙不饱和能力的增加, 也必然导致其河床的冲刷侵蚀性增强, 进而导致河床刷深, 床沙粗化。河床的冲刷对三峡大坝下游的著名的地上悬河—荆江大堤的安全形成潜在的威胁, 因此三峡封坝后, 坝下游河床具体的冲淤变化备受关注^[40-44]。研究表明, 在三峡水库运行 10 年以后, 下游的河道的刷深主要集中在近坝的 100 km 内, 100 km 以下河床的粒度及冲刷深度都基本平衡。

三峡水库导致坝下游河道河槽与浅滩向不同方向发展. 三峡封坝后,宜昌至汉口河段典型断面 S1—S6 的主槽均表现出不同程度的刷深,同时浅滩也有不同程度的萎缩(见图 6B). 这种主槽的刷深和浅滩的萎缩也是三峡水库运行的结果. 如前所讨论,三峡封坝后,水库洪季消峰蓄水导致大流量形态由“尖瘦”变为“肥胖”,极端大流量和频率减小,枯季放水导致下游枯水流量增加,这两者共同导致中水流量增加及持续时间增加(见图 3B),而中水流量主要限制在河槽内,中水流量及持续时间的增加必将导致主槽冲淤幅度增加. 同时,极端大流量和频率减小必然导致下游河漫滩发生洪水漫滩的几率大幅下降,河漫滩面积减小,河漫滩生态系统脆弱性增加^[26].

4 结 论

三峡水库是世界最大的河流水利工程,建坝对下游自然生态环境的影响是国内外普遍关注问题.

首先,三峡水库改变了库区和下游径流的自然过程. 三峡水库完全改变了库区的水位过程,库区水位由“洪高枯低”模式转变为相反的“洪低枯高”模式. 三峡水库对坝下游年径流量基本没有影响,但是显著改变了坝下游季节性流量,7—9 月份减少洪峰流量幅度 5.4%~39.2%,1—4 月份增加枯水流量 18.4%~26.4%.

其次,三峡水库大幅度减少了坝下游年输沙量和月输沙量,导致坝下游河道悬沙明显细化和河床泥沙粗化. 宜昌—汉口站年均输沙量由建坝前的 4.0 亿~5.6 亿 t 减少到 0.6 亿~1.5 亿 t,减少幅度为 62.2%~89.5%. 宜昌—汉口站全年 12 个月的月均输沙量减少量在 0.01 亿~1.03 亿 t 之间,减少幅度 51.6%~94.0%. 同时,下游悬沙平均粒径由三峡封坝前的 25~35 μm 减小至 4~15 μm ,河床泥沙明显粗化,分选性增加.

另外,三峡水库导致坝下游河道刷深沿程递减,从近坝刷深 3.7 m 沿程递减 0.4 m. 在主槽刷深的同时,河道浅滩有不同程度的萎缩.

[参 考 文 献]

[1] SCHUMM S A, LICHTY R W. Time, space, and causality in geomorphology[J]. American Journal of Science, 1965, 263(2): 110-119.

[2] CHORLEY R J, SCHUMM S A, SUGDEN D E. Geomorphology [M]. New York: Muthuen, 1984.

[3] ASHWORTH P, FERGUSON R I, BRIGHTON U O. Interrelationships of channel processes, changes and sediments in a proglacial braided river[J]. Geografiska Annaler, 1986, 68(4):361-371.

[4] KORNIJÓW R. Controversies around dam reservoirs: Benefits, costs and future[J]. Ecohydrology & Hydrobiology, 2009, 9(2): 141-148.

[5] PETTS G E, GURNELL A M. Dams and geomorphology: Research progress and future directions[J]. Geomorphology, 2005, 71(1): 27-47.

[6] WWF. To dam or not to dam? Five years on from the World Commission on Dams[R/OL]. [2015-05-01]. <http://assets.panda.org/downloads/2045.pdf>.

[7] 倪晋仁, 马蔼乃. 河流动力地貌学 [M]. 北京:北京大学出版社, 1998.

[8] COMMISSION ON DAMS W. Dams and development: A new framework for decision-making[J]. Environmental Management and Health, 2001, 12(4): 444-445.

[9] SCHELLE P, COLLIER U, PITTOCK J. Rivers at risk: Dams and the future of freshwater ecosystems[C]//7th International River Symposium, Brisbane, AUS, 2004.

- [10] CHEN Z, LI J, SHEN H, et al. Yangtze River of China: Historical analysis of discharge variability and sediment flux[J]. *Geomorphology*, 2001, 41(2): 77-91.
- [11] CHEN Z, YU L, GUPTA A. The Yangtze River: An introduction[J]. *Geomorphology*, 2001, 41(2): 73-75.
- [12] YIN H, LI C. Human impact on floods and flood disasters on the Yangtze River[J]. *Geomorphology*, 2001, 41(2): 105-109.
- [13] DU Y, XUE H, WU S, et al. Lake area changes in the middle Yangtze region of China over the 20th century[J]. *Journal of Environmental Management*, 2011, 92(4): 1248-1255.
- [14] YIN H, LIU G, PI J, et al. On the river - lake relationship of the middle Yangtze reaches[J]. *Geomorphology*, 2007, 85(3): 197-207.
- [15] YUAN W, YIN D, FINLAYSON B, et al. Assessing the potential for change in the middle Yangtze River channel following impoundment of the Three Gorges Dam[J]. *Geomorphology*, 2012, 147: 27-34.
- [16] 袁文昊. 三峡建坝后长江中游河床冲淤的水沙动力过程——新物源对河口供应的预测[D]. 上海:华东师范大学, 2014.
- [17] DAI Z, LIU J T. Impacts of large dams on downstream fluvial sedimentation: An example of the Three Gorges Dam (TGD) on the Changjiang (Yangtze River)[J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 480: 10-18.
- [18] CHEN Z, WANG Z, FINLAYSON B, et al. Implications of flow control by the Three Gorges Dam on sediment and channel dynamics of the middle Yangtze (Changjiang) River, China[J]. *Geology*, 2010, 38(11): 1043-1046.
- [19] 长江水利委员会水文局. 长江水文网[EB/OL]. [2015-05-01]. <http://www.cjh.com.cn>.
- [20] 长江流域规划办公室. 长江流域水文资料: 长江中游干流区, 1950—1988[R]. 长江流域规划办公室, 1988.
- [21] 中华人民共和国水利部. 中国河流泥沙公报[EB/OL]. [2015-05-01]. <http://www.mwr.gov.cn/zwzc/hygb/zghlnsgb/>.
- [22] FOLK R L, WARD W C. Brazos River bar: A study in the significance of grain size parameters[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1957, 21:3-27.
- [23] ZHANG Q, XU C Y, ZHANG Z, et al. Spatial and temporal variability of precipitation maxima during 1960 - 2005 in the Yangtze River basin and possible association with large-scale circulation[J]. *Journal of Hydrology*, 2008, 353(3): 215-227.
- [24] FINLAYSON B L, BARNETT J, WEI T, et al. The drivers of risk to water security in Shanghai[J]. *Regional Environmental Change*, 2013, 13(2): 329-340.
- [25] 郭乐, 徐涛. 三峡水库 2012 年“7.24”洪水调度[J]. *水电厂自动化*, 2014(1): 36-38.
- [26] BRANDT S A. Classification of geomorphological effects downstream of dams[J]. *Catena*, 2000, 40(4): 375-401.
- [27] FRIEDL G, WÜEST A. Disrupting biogeochemical cycles-Consequences of damming[J]. *Aquatic Sciences*, 2002, 64(1): 55-65.
- [28] LUO X X, YANG S L, ZHANG J. The impact of the Three Gorges Dam on the downstream distribution and texture of sediments along the middle and lower Yangtze River (Changjiang) and its estuary, and subsequent sediment dispersal in the East China Sea[J]. *Geomorphology*, 2012, 179: 126-140.
- [29] 钱宁, 万兆惠. 泥沙运动力学 [M]. 北京:科学出版社, 1983.
- [30] 韩其为, 何明民. 水库淤积与河床演变的(一维)数学模型[J]. *泥沙研究*, 1987(3): 14-29.
- [31] YANG S, ZHAO Q, BELKIN I M. Temporal variation in the sediment load of the Yangtze River and the influences of human activities[J]. *Journal of Hydrology*, 2002, 263(1): 56-71.
- [32] YANG Z S, WANG H J, SAITO Y, et al. Dam impacts on the Changjiang (Yangtze) River sediment discharge to the sea: The past 55 years and after the Three Gorges Dam[J]. *Water Resources Research*, 2006, 42(4):1-10.
- [33] YANG S L, MILLIMAN J D, LI P, et al. 50,000 dams later: erosion of the Yangtze River and its delta[J]. *Global and Planetary Change*, 2011, 75(1): 14-20.