

长江三峡水坝下游河道悬沙恢复和床沙补给机制

杨云平^{1,2}, 张明进¹, 李义天², 张 为², 由星莹^{2,3}, 朱玲玲⁴, 王 冬⁵

(1. 交通运输部天津水运工程科学研究所 工程泥沙交通运输行业重点实验室, 天津 300456;

2. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072; 3. 湖北省水利水电规划勘测设计院, 武汉 430064; 4. 长江水利委员会水文局, 武汉 430010; 5. 长江科学院, 武汉 430010)

摘要: 流域水库工程的修建, 将改变坝下游原有的水沙输移过程, 三峡水库蓄水作用对坝下游水沙输移的影响已初步显现。具体表现为: ① 三峡水库坝下游洪水持续时间和流量被削减, 下泄沙量大幅减少, 沿程上输沙量虽得到一定恢复, 但总量仍未超过蓄水前多年均值; ② 2003-2014年 $d > 0.125$ mm(粗)输沙量得到一定恢复, 至监测站恢复程度最大, 基本达到蓄水前均值, 在恢复后其下游该组分泥沙冲淤特性与蓄水前一致, 其中2008-2014年恢复程度弱于2003-2007年; ③ 三峡水库蓄水后坝下游 $d < 0.125$ mm(细)输沙量沿程上得到一定程度恢复, 但总量仍小于蓄水前均值; ④ 三峡水库蓄水后坝下游 $d > 0.125$ mm泥沙输移量因河床补给作用, 沿程上得到恢复, 但补给量将不超过0.44亿 t/y, 主要受制于洪水持续时间及流量均值, 而上游干流、河段间支流和湖泊分汇作用占次要地位, 而 $d < 0.125$ mm悬沙恢复受上游干流、区间支流和湖泊分汇及河床补给控制, 因河床粗化使得床沙对细颗粒悬沙的补给作用减弱; ⑤ 2003-2007年和2008-2014年两时段间宜昌至枝城、上荆江为粗细均冲, 下荆江为淤粗冲细, 汉口至大通河段为淤粗冲细, 城陵矶至汉口河段2003-2007年为淤粗冲细, 2008-2014年为粗细均冲, 这一差异受控于螺山站洪水流量持续时间和量值。

关键词: 泥沙恢复; 床沙补给; 三峡水库; 长江中下游

DOI: 10.11821/dlxb201607012

水库或大坝将河流拦腰截断, 尤其是梯级水库联合运用后强大的调度功能对河流径流起到了巨大的调节作用, 改变了坝下游天然的水文循环和泥沙输送过程^[1]。各河流上水库的运行规则不同, 其下游支流和湖泊分汇、河床冲刷、河型调整等情况各异, 且同一河流年际间水量丰枯也存在差异, 但水库修建后坝下游输沙量均存在沿程恢复, 总量上均未超过建库前多年均值。Williams等^[2]对美国21个水库进行分析, 对于冲刷过程的泥沙来源, 越靠近大坝源于河床的比重越大, 越向下游源于岸滩的比重越大。丹江口水库修建后的1970-1979年和1980-1985年坝下游各组分输沙量沿程上均得到恢复, 1980-1985年因来水量大, 恢复程度高于1970-1979年, 但量值仍小于蓄水前均值^[3]。黄河三门峡水库修建后, $d < 0.05$ mm泥沙沿程得到恢复, 0.05 mm $< d < 0.10$ mm泥沙在恢复一定距离后减小, $d > 0.10$ mm泥沙在花园口以下为增大趋势, 这可能与区间支流汇入和代表年

收稿日期: 2015-11-20; 修订日期: 2016-03-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(51579123, 51479146, 51509012); “十二五”国家科技支撑计划(2013BAB12B01); 三峡—葛洲坝枢纽坝下砂卵石河段(宜昌至昌门溪)航道治理关键技术研究(TKS05115018) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.51579123, No.51479146, No.51509012; The National Key Research & Development Programs, No.2013BAB12B01; Research on Key Techniques of Channel Regulation in The Sand-Gravel Reach (Yichang to Changmenxi) Downstream The Three Gorges-Gezhouba Projects, No. TKS05115018]

作者简介: 杨云平(1985-), 男, 黑龙江绥化人, 助理研究员, 主要从事水库下游水沙输移、地貌调整及河口海岸演变等研究。E-mail: yangsan520_521@163.com

份的选取等有关^[4]。综上,水库修建后坝下游粗、细颗粒泥沙沿程上得到一定恢复,粗颗粒泥沙在某站恢复至建库前相近水平后,其下游的输移规律与建库前一致。原因上,坝下游粗、细颗粒泥沙恢复程度取决于径流总量和过程、床沙组成及支流湖泊分汇等,而床沙补给能力受制于河床组成、水动力及可冲刷层厚度等。

2003年6月三峡水库蓄水至今,已积累了大量观测资料,中国学者基于这些资料展开了相关的研究工作。在总量上,长江中下游输沙量为减少趋势^[5-6],向下游减幅逐渐减小,而含沙量的减小趋势一直延续至河口区域^[7-8]。在分组沙输移上,基于三峡水库蓄水前数据,预测蓄水后坝下游河床将冲刷,沙量恢复过程中各粒径组输沙量不会超过建库前均值^[9],这一预测成果在三峡水库蓄水后2003-2011年得到验证^[10-11]。在泥沙恢复机理上:2003-2007年实测数据分析表明,三峡水坝下游发生长距离冲刷的主要原因是床沙补给不足,尤其是床沙中细颗粒泥沙^[10];基于2003-2011年数据的分析,长江中游 $d < 0.125\text{ mm}$ 粒径输沙量在沿程上缓慢恢复,但量值远小于蓄水前均值,为坝下游长距离冲刷的根本原因,在坝下游200 km内 $d > 0.125\text{ mm}$ 泥沙恢复较快,即三峡水库蓄水后冲刷主要集中在荆江河段^[11]。河床组成上,长江中下游河床表层床沙为粗化趋势,近坝段的0~200 km河段内粗化较为明显^[12]。三峡水库水位的提高对坝下游流量过程的调节程度增强,其洪、枯季节流量分配^[13],洪水流量持续时间^[14]等变化将改变下游水体对泥沙的输移能力,但流量过程变化对不同颗粒泥沙输移量的影响,在已有研究中考虑不足。随着蓄水年份增加,坝下游河床组成不断调整,通过粗细交换作用限制了床沙对悬沙的补给量,流量过程变化也限制了床沙对悬沙的补给能力。同时长江中下游存在湖泊分汇和支流入汇等作用,也会影响长江干流的泥沙输移量。鉴于上述问题,本文选取1987-2014年作为研究时段,研究长江中下游干流、支流和湖泊分汇等水文站径流、输沙量、悬沙和河床颗粒组成等变化过程和规律,揭示三峡水坝下游的悬沙恢复和床沙补给机制。

1 研究区域与资料来源

1.1 研究区域

三峡水库坝下游宜昌至大通河段长度1183 km,依据河床组成划分为砂卵石和沙质河段,其中宜昌至枝城为砂卵石河段,长度为61 km,枝城至大埠街为砂卵石向沙质的过渡段,长度为56.4 km,大埠街至大通为沙质河段,长度为1065.6 km(图1)。研究河段内干流有宜昌、枝城、沙市、监利、螺山、汉口和大通等水文站;洞庭湖分流为松滋口、太平口和藕池口,习称洞庭湖三口;洞庭湖、汉江和鄱阳湖入江水文控制站分别为城陵矶站、皇庄站和湖口站。

1.2 资料来源与时间特征划分

收集1987-2014年长江三峡大坝下游干流、支流及湖泊分汇流水文站的水文泥沙、悬沙级配数据,宜昌至大通站区间河床沉积物颗粒和组成数据,宜昌至大通河段的冲淤量年际变化数据(表1)。时间划分上,1987-2002年代表蓄水前时段,2003-2014年为蓄水后时段。2003-2007年为围堰蓄水和初期蓄水阶段,蓄水水位为135~156 m,2008年蓄水水位为172.8 m,2009年后蓄水水位均为175 m,2008-2014年为试验性蓄水阶段。各阶段差异主要体现在对流量过程调节和拦沙的程度上,有助于认识三峡水库水沙调节作用对坝下游悬沙恢复、床沙补给过程影响的差异性。不同粒径组泥沙输移量为泥沙级配曲线上大于、小于或介于某粒径级区间的泥沙量,在长江中下游悬沙中悬移质和床沙质划分粒径为 $d = 0.125\text{ mm}$ 。

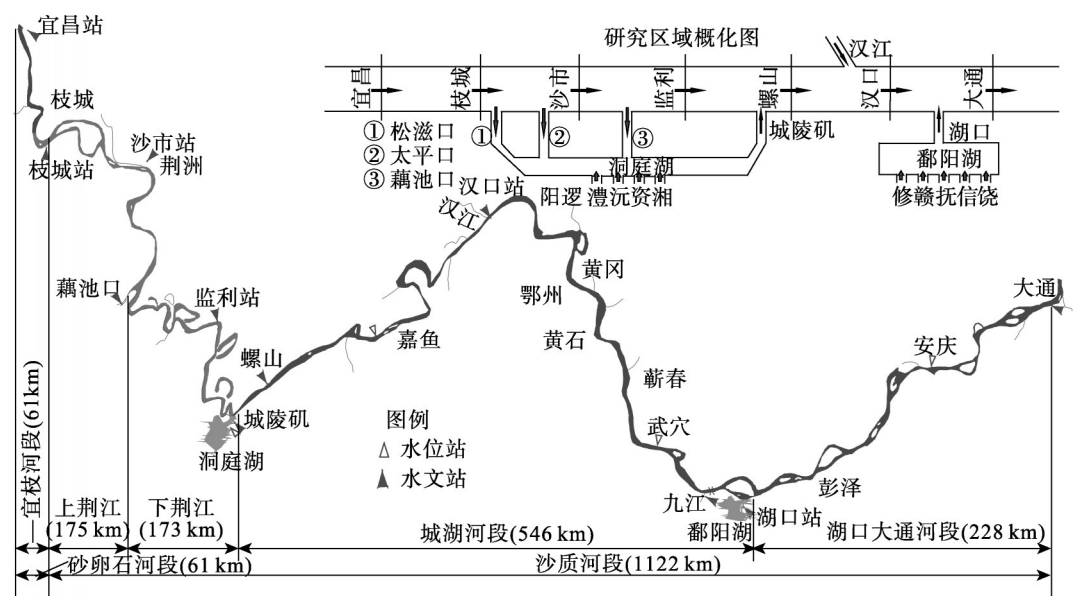


图1 三峡水库坝下游区域图

Fig. 1 The survey area of the downstream river basin of the Three Gorges Project (TGP)

表1 长江中下游水文泥沙实测数据来源

Tab. 1 Source of measured hydrological and sediment data for the middle and lower reaches of the Yangtze River				
序号	水文站点	资料内容	资料长度	数据来源
1	宜昌、枝城、沙市、监利、螺山、汉口、大通	水量、输沙量、流量、悬沙和床沙级配	1987-2014年	长江中下游区域水文年鉴
2	松滋口、太平口、藕池口(洞庭湖三口)、城陵矶、湖口	水量、输沙量、流量、悬沙级配	1987-2014年	长江中下游区域水文年鉴 长江航道规划设计研究院
3	宜昌一大通全河段	典型河段或断面床沙级配	2002-2014年	长江中下游区域水文年鉴 长江航道规划设计研究院

1.3 水文泥沙特征

1987-2014年三峡水库坝下游宜昌、枝城、沙市、监利、螺山、汉口和大通水文站的水量和输沙量变化规律为（图2）：各水文站水量最大年份为1998年，最小年份为2006年；2003-2014年平均水量低于1987-2002年，减幅在5%~10%；三口分流比为减少趋势，城陵矶入江水量占螺山站比例减小，汉江水量占汉口站比例先增大后减小，鄱阳湖入江水量占大通站比例先减小后增大；各站输沙量整体为减少趋势，2003-2014年较1987-2002年减幅在58%~90%，宜昌站减幅最大，向下游减幅减小；洞庭湖三口分沙比减小，城陵矶站沙量占螺山站比例增大，汉江入长江沙量占汉口站比例先增大后减小，鄱阳湖入长江沙量占大通站比例先增大后减小。

三峡水库坝下游水量和输沙量的变化受制于降雨、城市水消耗、三峡大坝、其他大坝及水土保持等因素影响^[15]。2003-2005年、2006-2007年和2008-2012年，三峡水库蓄水作用使得宜昌站沙量较无三峡水库的还原值减少63%、84%和87%，汉口站为43%、58%和59%，大通站为35%、45%和49%^[16]。2003-2012年与1993-2002年比较，降雨因素、城市水消耗、三峡大坝、其他大坝及水土保持对水量减小的贡献比例分别为61%、2%、3%、5%和9%，对沙量减少的贡献比例分别为14%、1%、65%、10%和10%^[15]。在特枯水文年，如2006年，受降雨减少的影响坝下游水量减幅更为明显，沙量在降雨因素和三

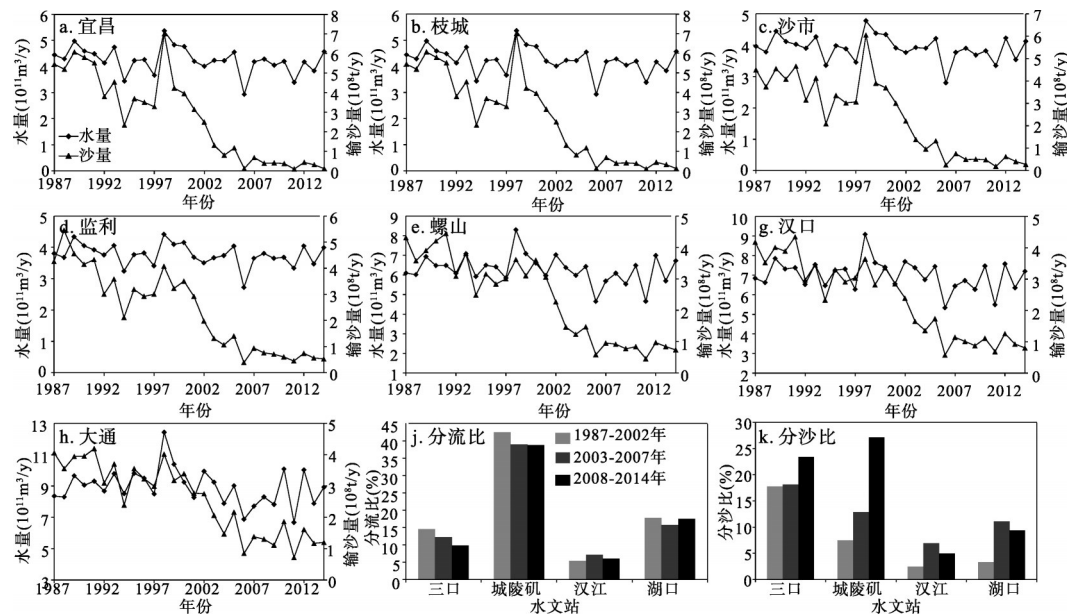


图2 长江中下游水、通量变化

Fig. 2 The variation of water and sediment flux in the middle and lower reaches of the Yangtze River

峡水库拦蓄作用下,减少也较为突出,使得2006年为三峡水库蓄水后水量和沙量最小的年份^[17]。综上,降雨因素对水量减少的贡献最大,三峡大坝拦沙作用对输沙量减少的贡献最大。

2 长江三峡水库坝下游悬沙恢复过程研究

2.1 三峡水库坝下游悬沙中值粒径变化

1987-2002年、2003-2007年和2008-2014年三峡水库坝下游干流、支流和湖泊水文控制站的中值粒径变化规律为(图3):宜昌站先减小后增大,枝城站略有减小,沙市、监利和螺山站先增大后减小,汉口站增大趋势,大通站略有增大;洞庭湖三口先减小后增大,城陵矶站增大趋势;汉江皇庄站先增大后减少,其数值远大于螺山站和汉口站,由于汉江水量和输沙量占汉口站比例较小,同时皇庄站至入江口门段悬沙组成不断调整,粗颗粒泥沙淤积,细颗粒泥沙冲刷^[18],因其输沙量较小,对长江干流悬沙颗粒的影响也较小;湖口站悬沙中值粒径小于0.006 mm, $d > 0.125$ mm 沙量悬沙比例为1.23%,即都

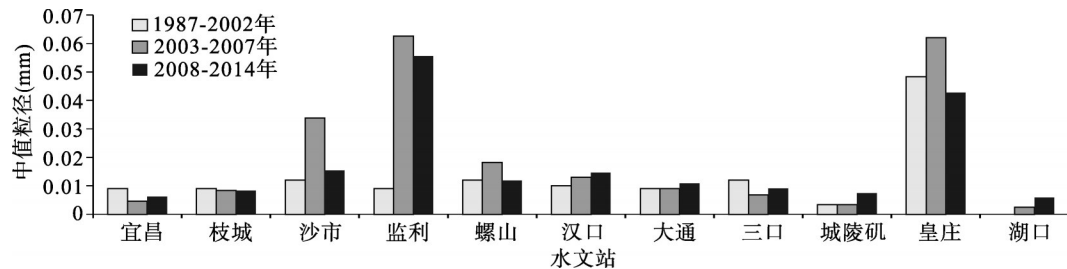


图3 1987-2014年三峡水库坝下游悬沙中值粒径变化

Fig. 3 Median size variation of suspended sediments in the downstream of TGP during 1987-2014

阳湖入江悬沙颗粒较细, 基本不参与造床作用, 随水流下泄至大通站, 使得大通站悬沙中值粒径略低于汉口站。

2.2 三峡水库坝下游分组悬沙恢复过程

分析表明(图4a): 2003-2014年 $d > 0.125$ mm输沙量低于1987-2002年均值; 与1987-2002年相比较, 2003-2007年宜昌站至沙市站 $d > 0.125$ mm输沙量大幅减少, 监利站变化不大, 螺山站和汉口站甚至出现了高于蓄水前的情况, 表明 $d > 0.125$ mm输沙量在监利站至汉口站之间已完全恢复, 大通站为减少趋势; 与2003-2007年相比较, 2008-2014年 $d > 0.125$ mm输沙量宜昌站—汉口站为减少趋势, 大通站略有增加; 分析2008-2014年和2003-2007年水量和 $d > 0.125$ mm悬沙输沙量关系, 2003-2007年水量低于2008-2014年, 但 $d > 0.125$ mm悬沙输沙量(除大通站)均低于2003-2007年, 即总水量多寡不是 $d > 0.125$ mm输沙量增减的主控因素。

分析表明(图4b): 1987-2002年 $d < 0.125$ mm输沙量较大, 沿程上先增加后减少, 监利站以下输沙量差异较小; 2003-2007年和2008-2014年 $d < 0.125$ mm输沙量在沿程均为增加趋势, 量值上2008-2014年低于2003-2007年。整体上, 2003-2007年和2008-2014年 $d < 0.125$ mm输沙量值均低于1987-2002年均值, 这一现象与全球大型河流筑坝后下游输沙量小于蓄水前多年平均值的规律一致^[3-4]。

2.3 三峡水库坝下游不同组分输沙量与流量过程关系

分析坝下游各水文站在1987-2002年、2003-2007年和2008-2014年月均流量和输沙量关系(图5), 各水文站枯水期输沙量略有减少, 随着流量增加输沙量增加, 但时间上仍为减少趋势。2008-2014年总水量高于2003-2007年, 而 $d > 0.125$ mm和 $d < 0.125$ mm的悬沙输沙量均为减少趋势, 两者是矛盾的。因此, 在三峡水库蓄水后, 由于坝下游流量年内过程被调节, 需充分考虑这一变化对输沙量的影响。

以幂函数曲线拟合三峡水库坝下游干流各水文站 $d > 0.125$ mm输沙量与月均流量关系(图6a), 分析表明: 枝城至监利河段 $d > 0.125$ mm输沙量随流量增加逐渐恢复, 且沿程上为增加趋势, 且流量越大恢复程度越高。监利至汉口河段受洞庭湖入汇影响, 由于城陵矶站 $d > 0.125$ mm输沙量很少, 2003-2009年该粒径组泥沙输移量为25万t, 其含沙量近乎于零。因此, 在相同月均流量下, 螺山站 $d > 0.125$ mm输沙量低于监利站, 汉口站 $d > 0.125$ mm输沙量与流量关系与螺山站保持一致。汉口至大通河段, 鄱阳湖入汇长江的泥沙主要为细颗粒部分, 2009-2014年湖口站 $d > 0.125$ mm悬沙总输沙量94.46万t(年均15.74万t), 占大通站总输沙量比例几乎为零, 由于鄱阳湖入汇长江使得大通站水量增加, 该组分泥沙淤积, 综合作用使得大通站小于汉口站。以幂函数曲线拟合坝下游水文站 $d < 0.125$ mm输沙量与月均流量关系(图6b), 分析表明: 在相同流量下, 枝城

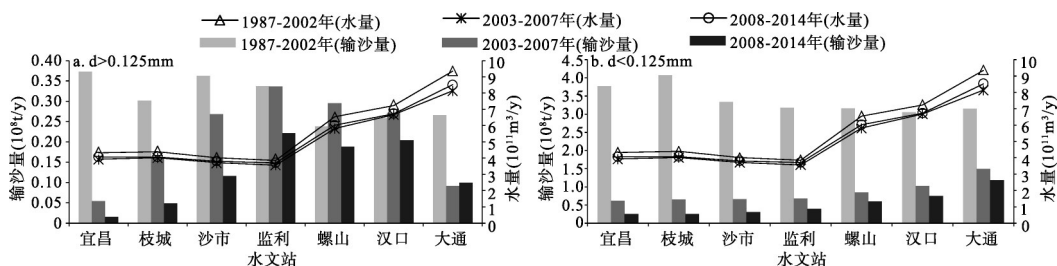


图4 1987-2014年三峡水库坝下游 $d < 0.125$ mm和 $d > 0.125$ mm悬沙输移过程

Fig. 4 The transport processes of suspended sediments ($d < 0.125$ mm and $d > 0.125$ mm) in the downstream of TGP during 1987-2014

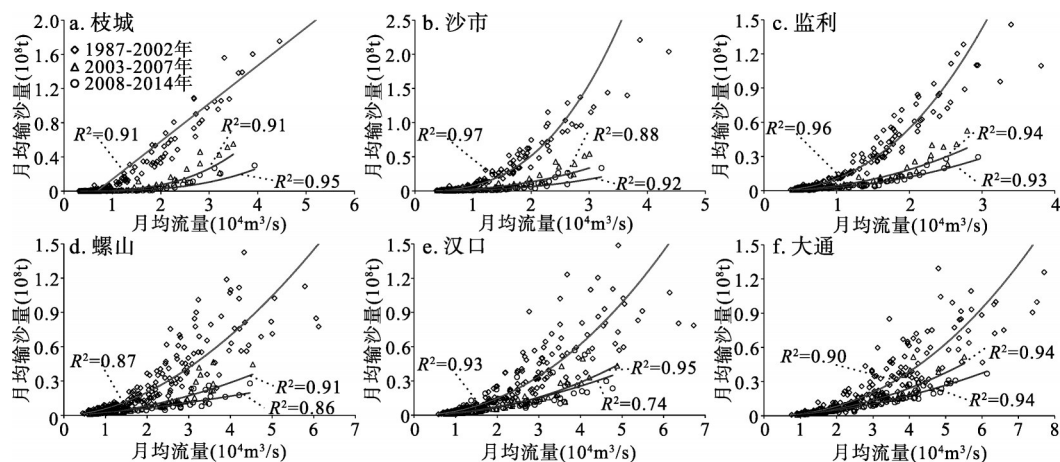
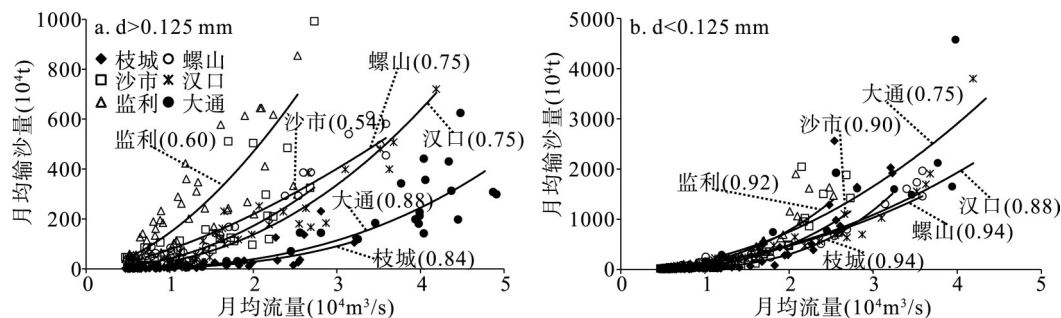


图5 三峡水库坝下游水文站月均输沙量与流量相关关系

Fig. 5 Relationship between sediment discharge and flow flux in the downstream of TGP

图6 三峡水库蓄水后坝下游 $d > 0.125$ mm 和 $d < 0.125$ mm 输沙量与流量关系Fig. 6 Relationship between sediment flux of $d > 0.125$ mm and $d < 0.125$ mm and flow flux in the middle and down reaches of TGP

至监利河段该粒径组输沙量沿程上为增加趋势,说明该粒径组输沙量在各级流量下均有明显恢复;从各站点不同流量来看,随着流量增大 $d < 0.125$ mm 输沙量为增加趋势;监利至汉口河段,受洞庭湖汇流影响,螺山站 $d < 0.125$ mm 输沙量明显低于监利站;受汉江入汇影响,汉口站 $d < 0.125$ mm 输沙量绝大多数数据点位于螺山站下方;汉口至大通河段,受鄱阳湖汇流影响,入汇泥沙主要为 $d < 0.125$ mm 的细颗粒,湖口站含沙量低于汉口站,在河床补给和湖泊入汇等作用使得大通站 $d < 0.125$ mm 输沙量高于汉口站。

2.4 三峡水库坝下游悬沙恢复与流量过程作用机制

由于长江中下游泥沙输移集中在汛期,且粗颗粒泥沙集中在大流量时期,进一步考察年内流量过程变化。长江中下游不同河段洪水流量存在一定差异,宜昌—监利河段选取 $Q \geq 2.5 \times 10^4$ m³/s,螺山站 $Q \geq 3.0 \times 10^4$ m³/s,汉口站 $Q \geq 3.5 \times 10^4$ m³/s,大通站 $Q \geq 4.5 \times 10^4$ m³/s 作为洪水流量。坝下游2008-2014年大于某流量天数内的均值流量低于2003-2007年,使得洪水期输沙能力减弱,同时各站(除螺山站、大通站外)持续天数呈减少趋势,综合作用下使得2008-2014年 $d > 0.125$ mm 泥沙输移量低于2003-2007年(图7)。

长江中下游 $d < 0.125$ mm 泥沙来源主要是上游流域、支流入汇和河床补给等。以宜昌站代表上游来沙量,1987-2002年,枝城站占宜昌站百分比增加,枝城以下无论是支流入汇还是湖泊分汇作用, $d < 0.125$ mm 泥沙占宜昌站小于该粒径级泥沙百分比均减少

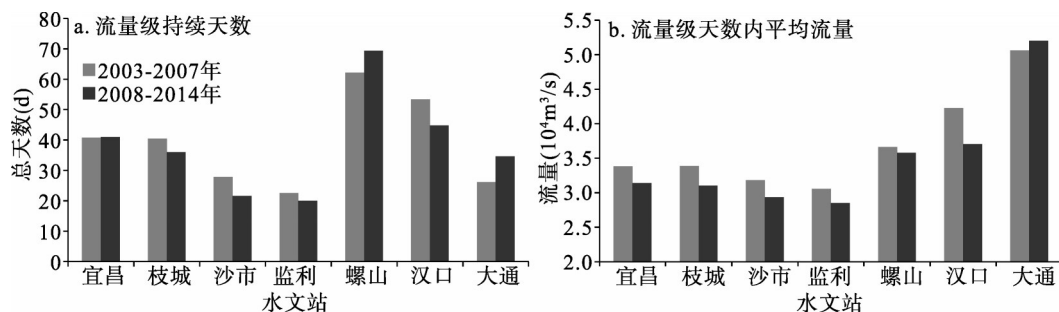
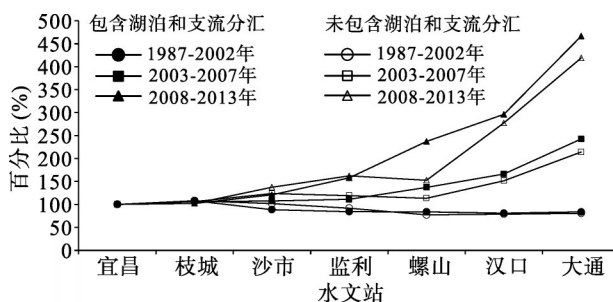


图7 2003-2014年三峡水库坝下游各水文站洪水流量及持续时间变化

Fig. 7 Flow and duration variation of the floods at the hydrologic stations in the downstream of TGP during 2003-2014

(图8)。2003-2007年和2008-2014年两个时间段, $d < 0.125$ mm 悬沙输移量变化规律为: 宜昌至枝城河段略有增加, 这与蓄水前1987-2002年规律是一致的; 枝城至监利河段为恢复趋势, 若无洞庭湖三口分流作用, 该组泥沙恢复的程度将增大; 监利至大通河段为沿程恢复趋势, 2008-2014年恢复程度高于2003-2007年, 由于宜昌站2008-2014年 $d < 0.125$ mm 泥沙量大幅减少, 虽然长江中下游悬沙恢复程度大, 干流区间河床冲刷补给对悬沙恢复起到一定积极作用, 但2008-2014年的年均输沙量仍低于2003-2007年。

图8 1987-2014年三峡水库坝下游支流和湖泊分汇对干流 $d < 0.125$ mm 悬沙的补给过程Fig. 8 Suspended sediment ($d < 0.125$ mm) compensation from the tributaries and lakes in the downstream of TGP during 1987-2014

3 三峡水库坝下游床沙补给机制研究

3.1 三峡水库坝下游床沙颗粒变化过程

图9绘制了三峡水库坝下游河床中值粒径变化过程, 2003年、2007年和2010年为粗化趋势, 宜昌至枝城河段粗化程度最大, 枝城至螺山河段为普遍粗化, 向下游粗化程度减弱, 螺山站以下河段整体为粗化趋势, 其粗化与细化交替发生。一般而言, 河床粗化不利于 $d > 0.125$ mm 和 $d < 0.125$ mm 泥沙的恢复。

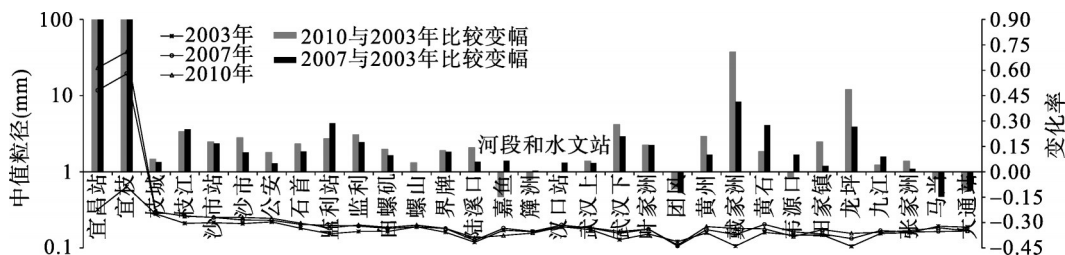


图9 2003年、2007年和2010年三峡水库坝下游河段床沙中值粒径变化

Fig. 9 Median size variation of the bed sands in the downstream of TGP in 2003, 2007 and 2010

3.2 三峡水库坝下游床沙补给过程研究

在三峡水库坝下游河床质组成上(图10),近坝段 $d < 0.125$ mm组分为减少趋势,宜昌至枝城河段甚至近于零,表明这一河段河床中 $d < 0.125$ mm床沙对悬沙的补给作用减弱,甚至出现不再补给悬沙的现象,使得本河段 $d < 0.125$ mm悬沙输移量呈减少趋势,且不能恢复至蓄水前均值。枝城以下河段床沙中 $d < 0.125$ mm百分比虽存在减小趋势,但比例基本在10%以上,对悬沙仍起到补给作用。因此,蓄水后坝下游床沙中 $d < 0.125$ mm的百分比减小,若上游来沙量持续处于较低水平,坝下游 $d < 0.125$ mm悬沙输沙量沿程上虽得到一定恢复,但输沙量难以恢复至蓄水前均值。 $d > 0.125$ mm百分比为增大趋势,该组分泥沙对悬沙起到补给作用取决于洪水持续时间和流量,三峡水库蓄水后坝下游洪水持续时间和流量均为减少趋势,表明对该组分泥沙的补给动力减弱,其输沙量将进一步减少。

由于水流处于不饱和状态,河床表层床沙逐渐冲刷补给悬沙,但补给量和强度除受制于水动力强弱和河床组成,其补给量还受制于河床可冲层厚度。宜昌至枝城为砂卵石河段,从图11可以看出,该河段河床上 $d < 0.125$ mm组分基本为零,2009年测次显示,床沙中 $0.125 \text{ mm} < d < 0.50 \text{ mm}$ 组分冲刷殆尽。宜昌至枝城河段床沙对悬沙细颗粒补给量极小,粗颗粒泥沙虽存在补给,但河道深槽的补给已基本完成。图11c为砂卵石向沙

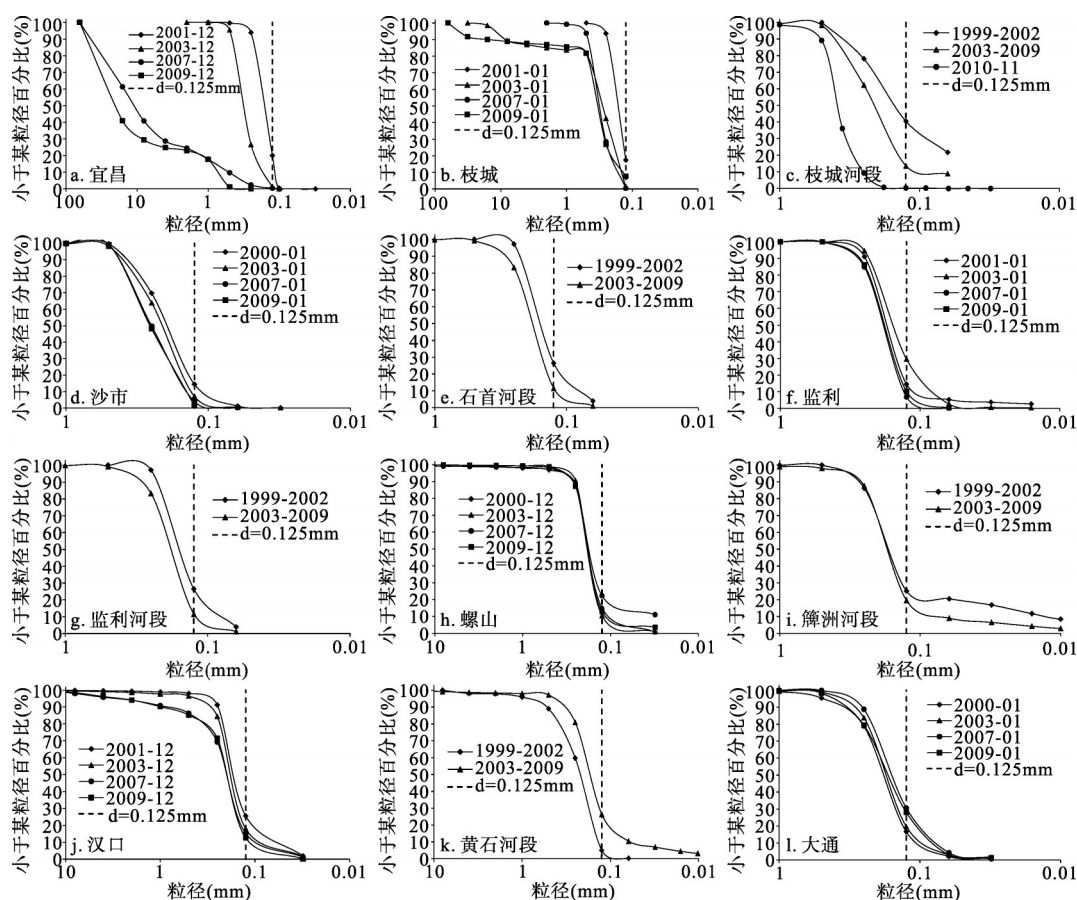


图10 三峡水库坝下游河床表层床沙质百分比变化

Fig. 10 Surface bed load variations in the downstream of TGP

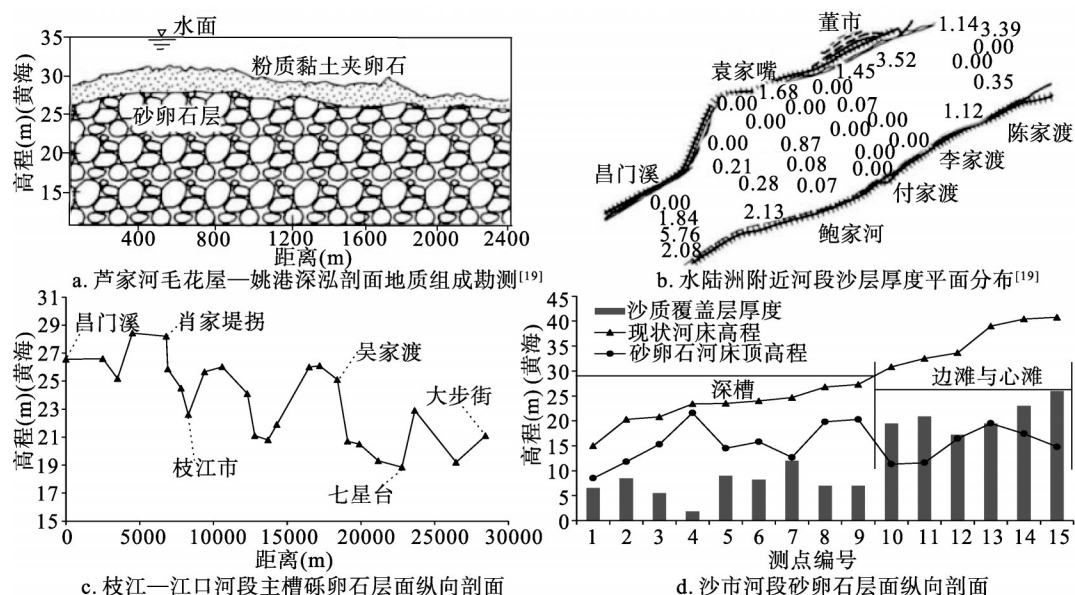


图11 长江中游河床地质组成

Fig. 11 Geological composition of the river bed in the middle reaches of the Yangtze River

质河段过渡区域沙质和砂卵石覆盖层变化, 枝城至昌门溪河段为砂卵石向沙质的过渡段, 芦家河处于砂卵石河段末端, 蓄水前河床表层可冲层厚度较小, 下层存在大量砂卵石, 随着河道冲刷的持续, 下层砂卵石层对粗颗粒泥沙补给减少。水陆洲附近可冲层厚度在深槽出现为零的情况, 岸滩冲刷层仍较厚。枝城至芦家河河段, $d > 0.125 \text{ mm}$ 和 $d < 0.125 \text{ mm}$ 的悬沙均得到恢复, 蓄水后荆江河段崩岸频繁^[20], 进一步说明补给泥沙来自岸滩变形或是崩退。枝江至江口河段主槽砂卵石覆盖层顶高程逐渐减小, 可冲层厚度逐渐增加, 近年来该河段深泓下切, 卵石层上的沙质层逐渐减小, 对悬沙的补给量也将不足。沙市河段沙质冲刷层厚度深槽小于 10 m, 边滩和心滩沙质覆盖层仍较厚, 即在沙质河段粗颗粒泥沙的补给仍较为充足。

3.3 三峡大坝下游河床调整与悬沙恢复和床沙补给关系分析

三峡水库坝下游宜昌至大通河段可划分为宜昌至枝城、上荆江(枝城至藕池口)、下荆江(藕池口至城陵矶)、城陵矶至汉口、汉口至湖口和湖口至大通河段。整理上述河段平滩河槽单位河长冲淤强度数据(图12), 主要分析如下:

(1) 宜昌至枝城河段, 1987-2002年、2003-2007年和2008-2014年均均为冲刷, 冲刷强度蓄水后高于蓄水前, 2008-2014年弱于2003-2007年。主要原因是砂卵石河段床沙大幅粗化, 河床中 $d < 0.125 \text{ mm}$ 泥沙组分近乎为零, 对该组分悬沙的补给严重不足; 同时洪水流量持续天数和流量均值减少, 对河床上 $d > 0.125 \text{ mm}$ 泥沙的冲刷能力减弱, 使得床沙对该组分悬沙补给作用减弱, 也是原因之一。

(2) 上荆江河段, 位于枝城站

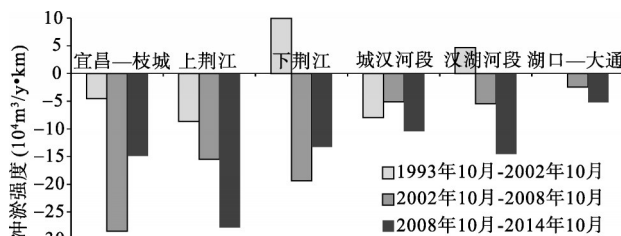


图12 三峡水库坝下游河段冲淤强度变化

Fig. 12 Erosion and deposition intensity variation in the downstream of TGP

和监利站区间, 上荆江河床冲刷强度为增大趋势, 这一河段 $d > 0.125 \text{ mm}$ 悬沙逐渐恢复, 由于洞庭湖分汇流对该组分悬沙的恢复影响较小, 即这一河段 $d > 0.125 \text{ mm}$ 输沙量的增加主要来自于河床冲刷补给。 $d < 0.125 \text{ mm}$ 泥沙逐渐得到恢复, 说明上荆江河段河床泥沙为粗细均冲, 即为三峡水库蓄水后冲刷较大且集中的区段。

(3) 下荆江河段, 位于监利站和螺山站区间, $d > 0.125 \text{ mm}$ 悬沙恢复程度减弱, 1987-2002年、2003-2007年和2008-2014年螺山站 $d > 0.125 \text{ mm}$ 输沙量均低于监利站, 3个时段 $d > 0.125 \text{ mm}$ 泥沙均为淤积, 说明当 $d > 0.125 \text{ mm}$ 泥沙恢复至蓄水前相近水平后, 其下游河段该组泥沙的冲淤特性与蓄水前相一致。河段之间存在洞庭湖入汇, 1987-2002年、2003-2007年和2008-2014年螺山站—城陵矶站—监利站 $d < 0.125 \text{ mm}$ 量值差分别为-0.268亿 t/y、0.015亿 t/y和0.006亿 t/y, 即蓄水前为淤积趋势, 蓄水后为冲刷趋势。下荆江河段泥沙冲淤在1987-2002年为粗细均淤积, 2003-2007年和2008-2014年为淤粗冲细, 由于监利站洪水流量持续天数和流量均值减少, 同时河床粗化使得细颗粒泥沙补给不足, 综合作用使得2008-2014年下荆江河段冲刷强度较2003-2007年有所减弱。

(4) 城陵矶至汉口河段, 位于螺山站和汉口站区间, 1987-2002年、2003-2007年和2008-2014年河床均为冲刷趋势。悬沙中 $d > 0.125 \text{ mm}$ 泥沙1987-2002年为冲刷趋势, 2003-2007年为淤积趋势, 2008-2014年为冲刷趋势。2008-2013年螺山站 $Q > 35000 \text{ m}^3/\text{s}$ 流量持续时间和量值较2003-2007年增加, 使得两时期冲淤性质发生变化。这一点认识与以往研究认识不一致, 主要是以往研究中资料限于2007年以前^[10], 或是将蓄水后2003-2011年作为整体^[11], 一定程度上掩盖了洪水流量对其影响。考虑汉江入汇, 其中汉江入汇口在汉口站以上1.15 km, 依据输沙量法计算城陵矶至汉口河段冲淤关系, 汉口站需扣除汉江入汇长江皇庄站沙量。1987-2002年、2003-2007年和2008-2014年汉口—汉江皇庄—螺山站 $d < 0.125 \text{ mm}$ 量值差分别为-0.189亿 t/y、0.089亿 t/y和0.124亿 t/y, 蓄水前为淤积趋势, 蓄水后为冲刷趋势。城陵矶至武汉河段泥沙冲淤特性为蓄水前1987-2002年冲粗淤细, 2003-2007年为淤粗冲细, 2008-2014年为粗细均冲, 引起蓄水后2003-2007年和2008-2014年粗细颗粒泥沙冲淤规律的改变, 主要是洞庭湖和长江干线流量共同作用下, 螺山站洪水流量持续天数增加, 但均值流量略有减少, 综合条件下洪水持续天数内的总水量为增加趋势, 增加了冲刷动力, 使得泥沙冲淤规律由2003-2007年的“淤粗冲细”转变为2008-2014年的“粗细均冲”。由于螺山站洪水水量的增加, 因城陵矶至汉口河段为沙质河床, 河床泥沙补给量充足, 出现2008-2014年冲刷强度高于2003-2007年的现象。

(5) 汉口至大通河段, 位于汉口站和大通站区间, 1987-2002年为淤积趋势, 但幅度有限, 2008-2014年冲刷强度高于2003-2007年。由于鄱阳湖入江泥沙主要为细颗粒悬沙, 汉口至大通区间 $d > 0.125 \text{ mm}$ 泥沙冲淤不考虑鄱阳湖入汇的影响。大通站—湖口站—汉口站 $d > 0.125 \text{ mm}$ 悬沙1987-2002年、2003-2007年和2008-2014年量值差分别为+0.01亿 t/y、-0.18亿 t/y和-0.07亿 t/y, 蓄水前为微冲趋势, 蓄水后为淤积趋势。对于 $d > 0.125 \text{ mm}$ 悬沙蓄水前后冲淤性质的转变, 已有研究认为蓄水后 $d > 0.125 \text{ mm}$ 泥沙淤积为区间径流量较蓄水前减少所致^[10]。大通站—湖口站—汉口站 $d < 0.125 \text{ mm}$ 输沙量在1987-2002年、2003-2007年和2008-2014年的量值差分别为-0.013 t/y、0.295 t/y和0.312亿 t/y, 表明蓄水前为微淤趋势, 蓄水后为冲刷趋势。总体上, 蓄水前汉口至大通河段泥沙冲淤较小, 处于相对平衡状态, 蓄水后为冲刷趋势。依据输沙量平衡方法计算汉口至大通河段冲淤强度, 结果表明, 1987-2002年、2003-2007年和2008-2014年平均冲淤量分别为-0.006亿 t/y、0.12亿 t/y和0.21亿 t/y, 2008-2014年冲刷量高于2003-2007年, 与河道

冲刷强度相对应。汉口至湖口河段和湖口至大通河段河床冲刷强度存在一定差异,在汉口至湖口河段沿程上细颗粒泥沙冲刷得到一定恢复,在湖口以下由于鄱阳湖入汇一部分细颗粒泥沙,湖口至大通河段不饱和水体含沙量增大,使得对河床冲刷强度减弱,综合作用下湖口—大通河段在冲淤强度上弱于汉口至湖口河段。

分析可知,宜昌至大通区间各河段的泥沙冲淤量与河床冲淤强度对应关系较好,结合蓄水后洪水流量持续时间和量值,解释了蓄水后2003-2007年和2008-2014年冲淤的差异性。但是在泥沙冲淤和河床冲淤量值上的差异较大,原因可能为河道采砂和航道疏浚等综合作用所致。河道采砂在一定程度上加剧河床冲刷、拓宽及河道比降的调整,采砂作业“去粗留细”会促进床沙粗化进程^[21]。整理长江干线2004-2011年中下游河道采砂数据(表2),可以发现,采砂占较大比重,如2009年采砂量占大通站年总输沙量的63.2%,并且采砂并非全部集中在平滩河槽以下,这一比例会有所减小。同时长江中下游航道管理与维护部门进行了大量疏浚,在不利年份疏浚量仍较大(表3)。在采砂和疏浚作用下,使得地形法和输沙量法计算得到河床冲淤强度数值不一致,甚至出现结果相差较大情况。

表2 2004-2011年长江中下游年度采砂控制量^[22]

Tab. 2 Annual sand mining controlled amounts in the middle and lower reaches of the Yangtze River during 2004-2011

年份	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
采砂控制量(万t)	1186	1602	1240	1690	5140	7020	4430	4407

表3 2008-2013年宜昌至大通河段疏浚量^[23]

Tab. 3 Dredging amounts in the Yichang-Datong section during 2008-2013

年份	2008	2009	2010	2011	2012	2013
疏浚量(万m ³)	25.9	69.9	51.5	466.7	147.5	608.9

3.4 三峡水库及梯级水库运行后长江中下游泥沙输移趋势探讨

三峡水库拦截大量泥沙,清水下泄使得坝下游水体长期处于不饱和状态,由于悬沙输沙量沿程得到恢复,将使得坝下游河段长期处于冲刷状态。宜昌至枝城河段河床中细颗粒泥沙已冲刷殆尽,粗颗粒尤其是卵石由于洪水流量的削减,输移强度减弱,同时上层卵石对下层河床起到了隐蔽作用,增强了河床的抗冲刷能力。但若遭遇大洪水或特大洪水年份,对粗颗粒泥沙起到搬运作用,使得水流对河床的冲刷强度增加,但粗颗粒泥沙的输移距离十分有限。沙质河段河床中 $d > 0.125$ mm粗颗粒泥沙大量存在,而 $d < 0.125$ mm泥沙数量有限,使得沙质河段细颗粒悬沙输沙量恢复有限。虽然 $d > 0.125$ mm悬沙输沙量恢复速度较快,但2008-2013年较2003-2007年恢复程度有所减弱,2003-2007年冲刷最大区域在上荆江河段,2008-2014年已向下游推进,初步判断冲刷影响已影响至下荆江河段。在长江上游一系列梯级水库的相继运用后,会进一步加剧清水下泄程度,随着时间的推移,冲刷重点区域也将下移。由于沙质河段 $d > 0.125$ mm泥沙大量存在,悬沙中 $d > 0.125$ mm的输沙量仍将逐渐恢复,但由于流量调平,尤其是洪水持续时间和总量的相对减少,使得该组泥沙输移量减少。依据近期规划,三峡水库将可能实行中小洪水调度,进一步增加流量调平幅度^[24]。由于 $d > 0.125$ mm的悬沙在监利站、螺山站和汉口站均得到了较大程度的恢复,但量值上监利站最大,选取监利站为代表水文站,预估三峡水库及上游梯级水库联合运用后坝下游粗颗粒泥沙输移量。2003-2014年监利站 $d > 0.125$ mm泥沙最大输移量为0.53亿t/y,与宜昌站和三口差值代表宜昌至监利河段的河床补给量,补给量最大值为0.44亿t/y,均值为0.30亿t/y(图13)。

综上,在三峡水库及上游梯级水库运用后,三峡水库实行中小洪水调度规则^[24]、河床粗化等因素的综合作用下,长江中下游水文站 $d > 0.125$ mm悬沙最大输移量不超过0.53亿t/y,由于河床上 $d > 0.125$ mm床沙质大幅减少,河床补给量不超过0.44亿t/y(2003-2007年均值)。

4 结论

由于三峡水库蓄水的作用,对坝下游水沙输移的影响已初步显现,本文利用1987-2014年长江中下游实测数据,揭示坝下游悬沙恢复和床沙补给机制,主要结论如下:

(1) 三峡水库蓄水后,坝下游洪水流量和持续时间被大幅削减,下泄泥沙近乎清水下泄,输沙量在沿程上逐渐恢复,但总量仍未超过蓄水前多年均值。

(2) 2003-2014年三峡水库坝下游 $d > 0.125$ mm悬沙量得到一定恢复,至监利站恢复程度最大,基本恢复至蓄水前均值水平,在恢复后其下游该组分泥沙冲淤特性与蓄水前一致,其中2008-2014年恢复程度弱于2003-2007年。

(3) 2003-2007年和2008-2014年三峡水库坝下游悬沙中 $d < 0.125$ mm输沙量得到一定恢复,2008-2014年恢复程度弱于2003-2007年,但总量不会超过蓄水前均值。

(4) 三峡水库蓄水后 $d > 0.125$ mm泥沙恢复主要为河床冲刷补给,但补给量将不超过0.44亿t/y,其补给量受制于洪水持续时间及流量均值,上游干流、河段间支流和湖泊分汇作用占次要地位, $d < 0.125$ mm悬沙恢复受上游干流、区间支流和湖泊分汇及河床补给控制,由于河床粗化影响使其对悬沙补给作用减弱。

(5) 三峡水库蓄水后 $d > 0.125$ mm和 $d < 0.125$ mm泥沙的冲淤特性在不同河段存在差异,2003-2007年和2008-2014年两时段宜昌至枝城、上荆江为粗细均冲,下荆江为淤粗冲细,2003-2007年城陵矶至汉口河段为淤粗冲细,2008-2014年城陵矶至汉口河段为粗细均冲,这一差异受控于螺山站洪水流量持续时间和量值,汉口至大通河段为淤粗冲细。

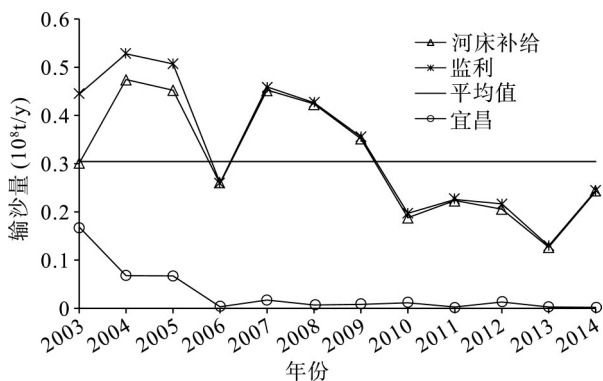


图13 2003-2014年宜昌至监利河段 $d > 0.125$ mm泥沙变化
Fig. 13 Sediment ($d > 0.125$ mm) variations in Yichang River during 2003-2014

参考文献(References)

- [1] Benn Patrick C, Erskine Wayne D. Complex channel response to flow regulation: Cudgegong River below Windamere Dam, Australia. *Applied Geography*, 1994, 14(2): 153-168. doi: 10.1016/0143-6228(94)90058-2.
- [2] Williams G P, Wolman M G. Downstream effects of dams on alluvial rivers//Geological Survey Professional Paper 1286 U. S. Government Printing Office, Washington, DC, 1984, 1286.
- [3] Hydrology Bureau, Changjiang Water Resource Commission. Analysis of river bed erosion downstream from Danjiangkou reservoir in period of retardation and period of water impoundment//Sediment Research of Three Gorge Project (7). Beijing: Beijing Intellectual Property Press, 2002: 75-82. [长江水利委员会水文局. 丹江口水库下游河道滞洪期与蓄水期冲刷对比分析//长江三峡工程泥沙问题研究(第七卷). 北京: 北京知识产权出版社, 2002: 75-82.]
- [4] Chen jianguo, Zhou Wenhao, Yuan Yuping. Transportation and adjustment of different grain sized sediment along the Lower Yellow River under typical operation modes of Sanmenxia Reservoir. *Journal of Sediment Research*, 2002(2): 15-22. [陈建国, 周文浩, 袁玉萍. 三门峡水库典型运用时段黄河下游粗细泥沙的输移和调整规律. *泥沙研究*, 2002(2): 15-22.]
- [5] Dai S B, Yang S L, Li M. The sharp decrease in suspended sediment supply from China's rivers to the sea: Anthropogenic and natural causes. *Hydrological Sciences Journal*, 2009, 54(1): 134-146. doi: 10.1623/hysj.54.1.135.
- [6] Dai S B, Lu X X, Yang S L, et al. A preliminary estimate of human and natural contributions to the decline in sediment flux from the Yangtze River to the China Sea. *Quaternary International*, 2008, 186(1): 43-54. doi: 10.1016/j.quaint.2007.11.018.

- [7] Yang Yunping, Li Yitian, Sun Zhaohua, et al. Suspended sediment load in the turbidity maximum zone at the Yangtze River Estuary: The trends and causes. *Journal of Geographical Sciences*, 2014, 24(1): 129-142. doi: 10.1007/s11442-014-1077-3.
- [8] Yang Yunping, Deng Jinyun, Zhang Mingjin, et al. The synchronicity and difference in the change of suspended sediment concentration in the Yangtze River Estuary. *Journal of Geographical Sciences*, 2015, 25(4): 399-416. doi: 10.1007/s11442-015-1176-9.
- [9] Li Yitian, Sun Zhaohua, Deng Jinyun. A study on riverbed erosion downstream from the Three Gorges Reservoir. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2003, 11(3): 283-295. DOI:10.16058/j.issn.1005-0930.2003.03.009. [李义天, 孙昭华, 邓金运. 论三峡水库下游的河床冲淤变化. *应用基础与工程科学学报*, 2003, 11(3): 283-295.]
- [10] Chen Fei, Li Yitian, Tang Jinwu, et al. Analysis of group-sized sediment transports downstream a reservoir. *Journal of Hydroelectric engineering*, 2010, 29(1): 164-170. [陈飞, 李义天, 唐金武, 等. 水库下游分组沙冲淤特性分析. *水力发电学报*, 2010, 29(1): 164-170.]
- [11] Guo Xiaohu, Li Yitian, Qu Geng, et al. Analysis of sediment transport in Middle Yangtze River after filling of the Three Gorges Reservoir. *Journal of Sediment Research*, 2014, (5): 11-17. [郭小虎, 李义天, 渠庚, 等. 三峡工程蓄水后长江中游泥沙输移规律分析. *泥沙研究*, 2014, (5): 11-17.]
- [12] 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, *Geomorphology*, 2012, 179(1): 126-140. doi: 10.1016/j.geomorph.2012.05.034
- [13] Li Qiongfang, Yu Meixiu, Lu Guobin, et al. Impacts of the Gezhouba and Three Gorges reservoirs on the sediment regime in the Yangtze River, China. *Journal of Hydrology*, 2011, 403(3-4): 224-233. doi:10.1016/j.jhydrol.2011.03.043.
- [14] Ban Xuan, Jiang Liuzhi, Zeng Xiaohui, et al. Quantifying the spatio-temporal variation of flow and sediment in the middle Yangtze River after the impoundment of the Three Gorges. *Advances in Water Science*, 2014, 25(5): 650-657. [班旋, 姜刘志, 曾小辉, 等. 三峡水库蓄水后长江中游水沙时空变化的定量评估. *水科学进展*, 2014, 25(5): 650-657.]
- [15] Yang S L, Xu K H, Milliman J D, et al. Decline of Yangtze River water and sediment discharge: Impact from natural and anthropogenic changes. *Scientific Reports*, 2015, 5: 12581. doi: 10.1038/srep12581.
- [16] Yang S L, Milliman J D, Xu K H, et al. Downstream sedimentary and geomorphic impacts of the Three Gorges Dam on the Yangtze River. *Earth-Science Reviews*, 2014, 138: 469-486. doi: 10.1016/j.earscirev.2014.07.006.
- [17] Dai Zhijun, Chu Ao, Stive Marcel, et al. Is the Three Gorges Dam the cause behind the extremely low suspended sediment discharge into the Yangtze (Changjiang) Estuary of 2006? *Hydrological Sciences Journal*, 2011, 56(7): 1280-1288. doi: 10.1080/02626667.2011.585136.
- [18] Han Qiwei. Reservoir Siltation. Beijing: Science Press, 2003: 582-607. [韩其为. 水库淤积. 北京: 科学出版社, 2003: 582-607.]
- [19] Sun Zhaohua, Li Yitian, Ge Hua, et al. Channel erosion processes of transitional reach from gravel river bed to sand bed in middle Yangtze River. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2011, 42(7): 789-797. doi: 10.13243/j.cnki.slxb.2011.07.002. [孙昭华, 李义天, 葛华, 等. 长江中游砂卵石—沙质河床过渡带冲刷趋势研究. *水利学报*, 2011, 42(7): 789-797.]
- [20] Xia Junqiang, Zong Quanli, Deng Shanshan, et al. Seasonal variations in composite riverbank stability in the Lower Jingjiang Reach, China. *Journal of Hydrology*, 2014, 519: 3664-3673. doi: 10.1016/j.jhydrol.2014.10.061.
- [21] Hu Chaoyang, Wang Erpeng, Wang Xinqiang. Analysis of channel evolution under combined action of reservoir and channel sand excavation. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2015, 26(3): 178-183. doi: 10.11705/j.issn.1672-643X.2015.03.37. [胡朝阳, 王二朋, 王新强. 水库与河道采砂共同作用下的河道演变分析. *水资源与水工程学报*, 2015, 26(3): 178-183.]
- [22] Wang Yangui, Liu Xi, Shi Hongling. Variations and influence factors of runoff and sediment in the Lower and Middle Yangtze River. *Journal of Sediment Research*, 2014(5): 38-47. [王延贵, 刘茜, 史红玲. 长江中下游水沙态势变异及主要影响因素. *泥沙研究*, 2014(5): 38-47.]
- [23] Huang Zhaobiao, Li Ming. The prototype observation report of Yichang to Anqing reaches of the Yangtze River. Wuhan: Yangtze River Channel Planning and Design Institute, 2016: 15-16. [黄召彪, 李明. 长江干线宜昌至安庆河段原型观测分析报告. 武汉: 长江航道规划设计研究院, 2015: 15-16.]
- [24] Zheng Shouren. Risk analysis of implementing middle- small flood dispatch by Three Gorges Project and countermeasures. *Yangtze River*, 2015, 46(5): 7-12. [郑守仁. 三峡水库实施中小洪水调度风险分析及对策探讨. *人民长江*, 2015, 46(5): 7-12.]

Suspended sediment recovery and bedsand compensation mechanism affected by the Three Gorges Project

YANG Yunping¹, ZHANG Mingjin¹, LI Yitian², ZHANG Wei², YOU Xingying^{2,3},
ZHU Lingling⁴, WANG Dong⁵

(1. Key Laboratory of Engineering Sediment, Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, Ministry of Transport, Tianjin 300456, China; 2. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 3. Hubei Provincial Water Resources and Hydropower Planning Survey and Design Institute, Wuhan 430064, China;
4. Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, China;
5. Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

Abstract: Construction of basin reservoir projects can change the water and sediment transport processes in the lower reaches. The effects of the Three Gorges Project (TGP) on water and sediment transport in lower reaches are emerging. Specifically: (1) The duration and volume of floods in the lower reaches of TGP declined sharply. The sediment value was of such a low concentration that the water was nearly clear. The suspended sediment discharge gradually recovered downwards but its total amount still could not outcompete the annual average of that before the impoundment of TGP. (2) The sediment with $d > 0.125$ mm recovered to some extent in 2003-2014 (more in 2003-2007 than in 2008-2014) and basically recovered to the average value before the impoundment at the Jianli Station. After recovery, its transport trend in the lower reaches was in line with that before the impoundment. (3) After the impoundment, sediment with $d < 0.125$ mm recovered to some extent but its total amount was still less than the average of before the impoundment. (4) The recovery of sediment with $d > 0.125$ mm was mainly from river-bed erosion but with an amount not exceeding 44 million t/y which was primarily limited by duration and average flow of floods and secondarily by the upper mainstream, tributaries between river sections and the sub-sink effects of lakes. Recovery of the suspended sediment with $d < 0.125$ mm was controlled by the upper mainstream, tributaries between river sections, the sub-sinks of lakes and river-bed compensation. The suspended sediment compensation from river-bed decreased due to the coarsening of bedsands. (4) In 2003-2007 and 2008-2014, both coarse and fine sands were eroded in the Yichang-Zhicheng section in the upper Jingjiang River while coarse sands deposited and fine sands eroded in the lower Jingjiang River. In the Hankou-Datong section, coarse sands deposited and fine sands eroded. From 2003 to 2007, coarse sands deposited while fine sands eroded in the Chenglingji-Hankou section. In 2008-2014, both coarse and fine sands eroded in the Chenglingji-Hankou section. The differences were caused by the duration and volume of the floods in the Luoshan Station.

Keywords: sediment recovery; bedsand compensation; Three Gorges Reservoir; middle and lower reaches of the Yangtze River