

## 三峡大坝下游粗细颗粒泥沙输移规律及成因\*

杨云平<sup>1</sup>, 张明进<sup>1</sup>, 李松喆<sup>2</sup>, 朱玲玲<sup>3</sup>, 由莹莹<sup>4</sup>, 李侃禹<sup>5</sup>, 余新明<sup>5</sup>

(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: 天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072)

(3: 长江水利委员会水文局, 武汉 430010)

(4: 湖北省水利水电规划勘测设计院, 武汉 430064)

(5: 长江航道局, 武汉 430010)

**摘要:** 以三峡下游河段为研究对象, 利用 1987—2014 年原型观测数据, 分析粗细颗粒在时间和空间的输移过程, 并以水文站作为划分单元探讨其成因。三峡水库蓄水后坝下游  $d \leq 0.125$  mm (细颗粒) 各粒径组沙量沿程递增, 并小于蓄水前均值;  $d > 0.125$  mm (粗颗粒) 沙量在宜昌—监利河段得到补给, 其下游为淤积趋势, 其中 2003—2007 年至监利站恢复程度最大。在成因上: ①宜昌—沙市河段, 河床粗化限制了粗细颗粒泥沙补给, 其中细颗粒补给受制于总水量, 粗颗粒受制于大流量持续天数和量值; ②沙市—监利河段, 粗细颗粒补给均受制于总水量; ③监利—螺山河段, 洞庭湖入汇对细颗粒补给起决定作用, 河床补给量中洪水年大于中枯水年, 粗颗粒为淤积趋势, 且中洪水年淤积量小于中枯水年; ④螺山—汉口河段, 细颗粒增加受河床补给决定, 2008—2014 年补给强度弱于 2003—2007 年, 2010 年前后粗颗粒泥沙由淤转冲, 与大流量持续天数和量值增加有关; ⑤汉口—九江河段, 细颗粒泥沙淤积, 粗颗粒因河床冲刷得到补给, 大水年补给量高于枯水; ⑥九江—大通河段, 鄱阳湖入汇和河床补给对细颗粒增加的贡献比例为 1:2.82, 河床冲刷对粗颗粒泥沙起补给作用, 受大流量持续天数和量值影响。

**关键词:** 分组沙; 输移规律; 成因分析; 三峡大坝; 长江中下游

## Transport patterns of the coarse and fine sediments and its causes in the downstream of the Three Gorges Dam

YANG Yunping<sup>1</sup>, ZHANG Mingjin<sup>1</sup>, LI Songzhe<sup>2</sup>, ZHU Lingling<sup>3</sup>, YOU Xingying<sup>4</sup>, LI Kanyu<sup>5</sup> & YU Xinming<sup>5</sup>

(1: Key Laboratory of Engineering Sediment, Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, Ministry of Transport, Tianjin 300456, P.R.China)

(2: State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, P.R.China)

(3: Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, P.R.China)

(4: Hubei Provincial Water Resources and Hydropower Planning Survey and Design Institute, Wuhan 430064, P.R.China)

(5: Changjiang Waterway Bureau, Wuhan 430010, P.R.China)

**Abstract:** Building reservoirs affects the process of water and sediment transport in the basin of the dam. The impact of the Three Gorges Reservoir (TGR) on sediment transport in the downstream has appeared. After the TGR impoundment, the total sediments in the downstream have been reduced. Sediments grouped with  $d \leq 0.125$  mm (fine particle) were increasing along the path, but the average amount was still less than the amount before the reservoir impoundment. Sediments grouped with  $d > 0.125$  mm (coarse particle) have been recharged in the Yichang to Jianli section, but downstream of Jianli has a trend of deposition. In specific, the coarse sediment in the Yichang to Jianli section in 2003–2007 was above the value before the TGR impoundment, but increasing of

\* 国家重点基础研究发展计划(2016YFC0402106)、国家自然科学基金项目(51579123, 51579185, 51339001)、中央级公益性科研院所基本科研业务费项目(TKS160103, TKS150102)和水利部公益性行业科研专项(201401021)联合资助。2016-08-25 收稿; 2016-11-02 收修改稿。杨云平(1985~), 男, 助理研究员; E-mail: yangsan520\_521@163.com.

the sediments concerning both coarse and fine sediments in 2008–2014 less than that in 2003 to 2007. Sediment retaining by the Dam is the major reason for the reduction of sediment in the downstream. However, the retaining in different reaches of the River is impacted by coarsening of the riverbed, the discharge, flow process, conditions of lake functioning and recharging from the tributaries. The main conclusions from our study are: (1) In the Yichang to Shashi section, the riverbed is relatively coarse that limits the recharge of coarse sediment, where the supplied fine sediment is controlled by the discharge by the duration of flood and its magnitude. (2) In the Shashi to Jianli section, recharging of both coarse and fine sediments is controlled by amount of total discharge; (3) In the Jianli to Luoshan section, the flow recharge from the Dongting Lake plays the most important roles on sediment recharging. Sediments supply from riverbed is higher in flood years than that from the dry years. The coarse sediment tends to deposit and the deposit amount in dry years is larger than that in flood years. (4) In the Luoshan to Hankou section, the recharge of fine sediment is controlled by supply from the riverbed. The recharging in 2008–2014 is more than that in 2003–2007. In about 2010, the coarse sediments were transited from depositing to scouring that is probably caused by the increasing of continuous large flow days. (5) In the Hankou to Jiujiang section, more fine sediments appear to deposit. The coarse sediment is recharged by the scouring of the riverbed and there were more coarse sediments recharged from the riverbed in the flood years than that in the dry years. (6) In the Jiujiang to Datong section, the rate of the fine sediment recharge from Poyang Lake to that from the riverbed was 1:2.82. It is obvious that the sediment from scouring of riverbed contributed more to coarse sediment transportation and the contribution is mainly affected by magnitude and continuous days of large flow.

**Keywords:** Grouped sediment; transportation characteristics; genetic analysis; Three Gorges Dam; the middle and lower reaches of Yangtze River

流域水库或大坝的修建,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<sup>[1]</sup>.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,但总量上均未超过建库前多年均值.一般而言,水库下游非均匀沙恢复饱和系数的数量级一般可达 $10^{-3} \sim 10^{-1}$ ,且随着泥沙粒径的增大而减小,也随着河床冲刷历时增加、床沙粗化程度提高而呈递减趋势<sup>[2]</sup>.汉江丹江口水库修建后坝下游泥沙得到恢复,其中1980—1985年期间因来水量大,恢复程度高于1970—1979年期间,但量值仍小于蓄水前均值<sup>[3]</sup>.黄河三门峡水库坝下游 $d \leq 0.05 \text{ mm}$ 沙量沿程上得到持续恢复, $0.05 \text{ mm} < d \leq 0.10 \text{ mm}$ 沙量在恢复一定距离后减小, $d > 0.10 \text{ mm}$ 泥沙在花园口以下为增大趋势,这可能与区间支流汇入有关<sup>[4]</sup>.综上,水库修建后坝下游粗细颗粒泥沙沿程上均能得到恢复,受流量、河床组成、分汇流等影响,恢复程度存在差异.

三峡水库蓄水后坝下游总沙量为减少趋势,与全球大型水库蓄水后下游泥沙输移规律一致<sup>[5]</sup>,其影响因素从大到小为三峡水库蓄水、水土保持、江湖关系等<sup>[6-7]</sup>.针对粗、细颗粒泥沙输移特性的研究,三峡水库蓄水前预测成果认为,坝下游各粒径组沙量均得到恢复,但总量不会超过建库前均值<sup>[8]</sup>,2003—2011年期间坝下游沙量沿程增加趋势,与预测基本一致<sup>[9-10]</sup>.2003—2007年实测数据显示,近坝段长距离冲刷的原因是床沙中细颗粒泥沙补给不足<sup>[9]</sup>.2003—2011年期间 $d \leq 0.125 \text{ mm}$ 沙量在沿程上缓慢恢复,在坝下游200 km内 $d > 0.125 \text{ mm}$ 泥沙恢复较快,说明蓄水后强冲刷发生在荆江河段<sup>[10]</sup>.长江宜昌—武汉<sup>[11]</sup>、黄河三门峡—利津河段<sup>[12]</sup>河道冲淤对不同粒径组泥沙响应关系不同,粒径越大两者的相关性越强,且单位来沙量改变引起的河道冲淤量越大,即河道冲淤不仅取决于来自本河段上游的泥沙数量,也取决于泥沙的粒度组成.三峡水库蓄水位由135 m逐渐提升至175 m,改变了坝下游径流的洪季和枯季分配比例<sup>[13]</sup>,使得洪水流量削减及持续天数缩短<sup>[14]</sup>,改变了水流对非均匀沙的携带能力及河床冲刷能力.长江中下游床沙为粗化趋势,近坝段的0~200 km河段内粗化最为明显<sup>[15]</sup>.在河床冲淤上,2003—2007和2008—2014年时段间宜昌至枝城、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<sup>[16-17]</sup>.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.针对三峡水库蓄水后,坝下游流量过程、河床组成、湖泊分汇和支流入汇等发生调整,对于综合因素作用下粗、细颗粒泥沙输移规律的认识尚不明晰,仍需开展深入研究工作.

本文收集1987—2014年期间三峡水库进出库、坝下游干支流及湖泊水文站泥沙总量及级配、河床组成

等资料,充分考虑泥沙冲淤特性、测量粒径组及河道冲淤关系等,以  $d=0.125\text{ mm}$  为悬沙粗细颗粒划分的临界粒径,分析研究三峡大坝下游干流河段粗细颗粒泥沙输移规律,从流量过程、河床组成、江湖分汇、支流入汇等方面着手,探讨粗、细颗粒泥沙输移过程的时空差异性及其成因。

### 1 研究区域、资料来源及水文泥沙特征

#### 1.1 研究区域

宜昌至大通河段长度 1183 km,宜昌至大埠街为砂卵石河段,长度约为 116.4 km,大埠街至大通为沙质河段,长度为 1066.6 km(图 1)。研究河段内有宜昌、枝城、沙市、监利、螺山、汉口、九江和大通等水文站;洞庭湖分流口为松滋口、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、皇庄和湖口站。

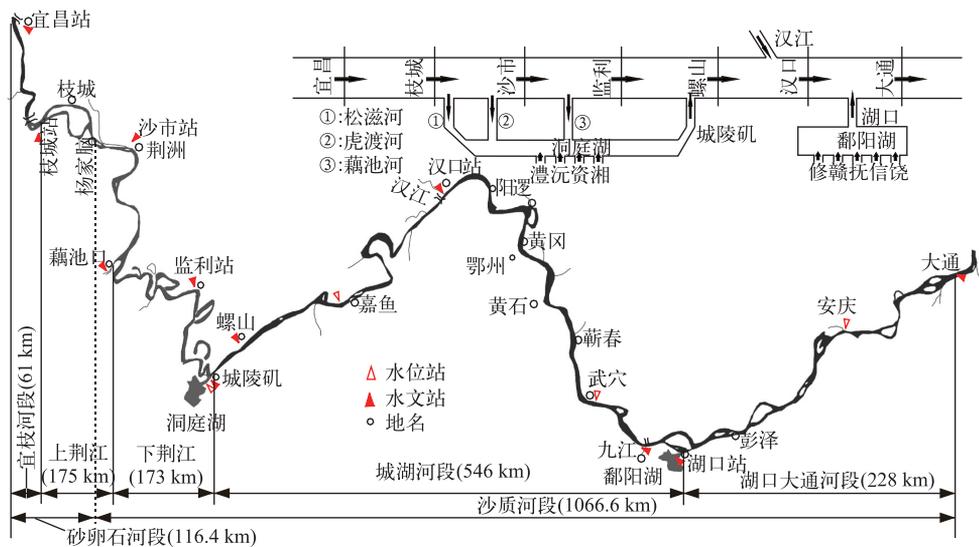


图 1 三峡大坝下游干流概略图

Fig.1 Schematic diagram of the mainstream in the downstream of the Three Gorges Dam

#### 1.2 资料来源

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数据资料,数据来源与时段见表 1。

表 1 三峡大坝下游水文泥沙观测数据来源

Tab.1 Source of sediment and hydrological data in the downstream of the Three Gorges Dam

序号	水文站	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、悬沙级配	1987—2014 年	长江中下游区域水文年鉴 长江水利委员会水文局
2	松滋口、虎渡河、藕池口	水量、输沙量、流量	1987—2014 年	
3	城陵矶 湖口站 九江站	水量、输沙量、流量、悬沙级配	2003—2014 年 2006—2014 年 2009—2012 年	长江水利委员会水文局
4	宜昌—大通全河段	断面床沙级配	2003、2007、2010 年	长江航道规划设计研究院

#### 1.3 水文泥沙特征

2003—2014 年坝下游各水文站水量和输沙量均小于 1987—2002 年均值,其中 2008—2014 年期间减幅

大于2003—2007年(图2);2003—2014年各水文站水量和输沙量减幅分别在3.5%~13.0%和53.5%~93.5%之间,向下游水量减幅略有增大,输沙量减幅缩小。已有研究表明:2003—2012年与1993—2002年期间相比较,降雨、城市水消耗、三峡大坝、其他大坝及水土保持对水量减少的贡献比例分别为61%、2%、3%、5%和9%,对输沙量减少的贡献分别为14%、1%、65%、10%和10%<sup>[6]</sup>。因此,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。

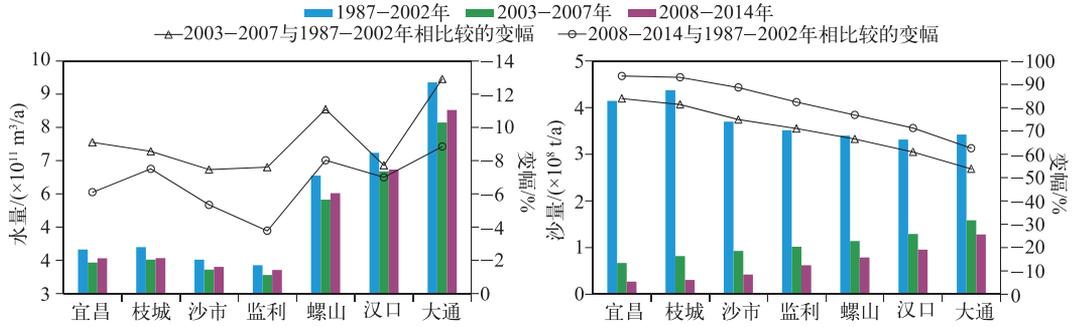


图2 三峡大坝下游水量、沙量变化

Fig.2 Changes of discharge and flux in the downstream of the Three Gorges Dam

1987—2002、2003—2007和2008—2014年期间(图3),洞庭湖“三口”分水量、分沙量及占枝城站比例均为减少趋势,城陵矶站水量和输沙量均为先减少后增加,水量占螺山站比例为减少趋势,输沙量占螺山站比例为增加趋势;汉江入汇长江的水量、输沙量及占汉口站比例为先增加后减少;湖口站水量及占大通站比例为先减少后增加,输沙量及占大通站比例为先增加后减少。

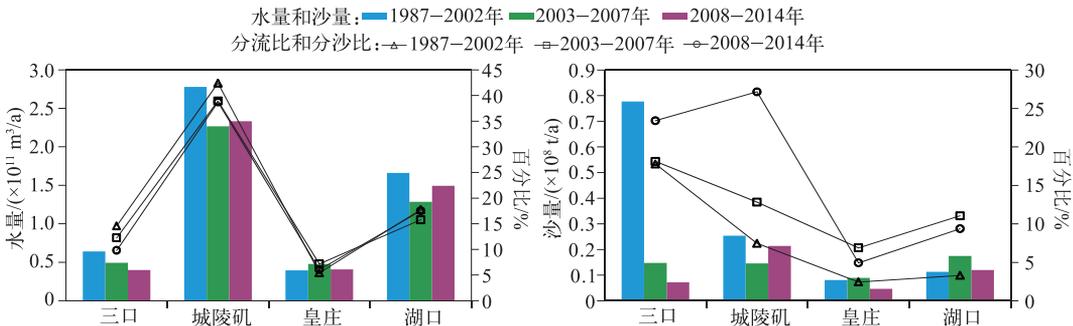


图3 三峡大坝下游支流及湖泊水量、沙量变化

Fig.3 Changes of discharge and flux in the lakes and tributary of the downstream of the Three Gorges Dam

1987—2002、2003—2007和2008—2014年期间坝下游悬沙中值粒径沿程上先增大后减小,三峡水库蓄水后监利站中值粒径最大(图4)。年际变化上,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,汉口和大通站略有增大;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。汉江皇庄站悬沙中值粒径高于汉口站,但汉口站与上下游水文站的差异较小,主要是皇庄站输沙量占汉口站比例较小,对汉口站悬沙粒度的影响相对较小;同时皇庄站—入江口门河段粗颗粒泥沙淤积,细颗粒泥沙冲刷,使得对汉口站悬沙粒径的影响进一步减弱。

## 2 长江三峡大坝下游不同粒径组泥沙的输移规律

### 2.1 不同粒径组泥沙的输移过程

以  $d \leq 0.031 \text{ mm}$ 、 $0.031 \text{ mm} < d \leq 0.063 \text{ mm}$ 、 $0.063 \text{ mm} < d \leq 0.125 \text{ mm}$ 、 $0.125 \text{ mm} < d \leq 0.25 \text{ mm}$  和  $d > 0.25 \text{ mm}$

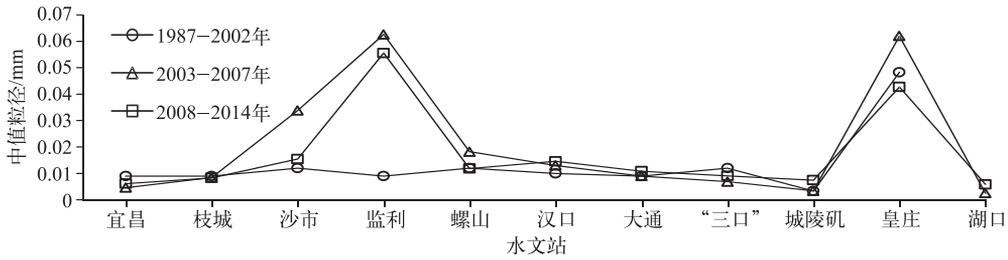


图4 三峡大坝下游悬沙中值粒径变化(1987—2014年)

Fig.4 Change of median diameter of suspended sediment in the downstream of the Three Gorges Dam during 1987—2014

粒径区间划分悬移质粒度,空间上输移规律为(图5):1987—2002年期间  $d \leq 0.031\text{mm}$  输沙量在宜昌—枝城—螺山—大通河段经历了增加—减少—再增加的过程,2003—2007年期间宜昌—枝城—监利—大通河段为增加—减小—再增加的过程,2008—2014年期间宜昌—大通河段为增加趋势. 1987—2002年期间  $0.031\text{mm} < d \leq 0.063\text{mm}$  输沙量在宜昌—枝城—螺山、螺山—汉口—大通均为先增加后减少,2003—2007,2008—2014年两时段在宜昌—监利—螺山—大通为增加—减小—增加的变化过程. 1987—2002年期间  $0.063\text{mm} < d \leq 0.125\text{mm}$  输沙量在宜昌—枝城—螺山、螺山—汉口—大通河段均为先减少后增加趋势,2003—2007年期间宜昌—汉口—大通为先增加后减小趋势,2008—2014年期间为增加趋势. 1987—2002年期间  $0.125\text{mm} < d \leq 0.25\text{mm}$  输沙量在宜昌—枝城—监利为先减少后增加,监利—螺山—汉口—大通河段减少—增加—减少的变化趋势;2003—2007年期间宜昌—监利—大通河段为先增加后减少趋势,2008—2014年期间宜昌—监利—螺山、螺山—汉口—大通河段均为先增加后减少趋势. 1987—2002年期间  $d > 0.25\text{mm}$  输沙量在宜昌—枝城—沙市、沙市—监利—螺山、螺山—汉口—大通均为先减少后增加趋势,2003—2007年期间宜昌—枝城—大通为先增加后减少,2008—2014年期间宜昌—监利—大通为先增加后减少趋势.

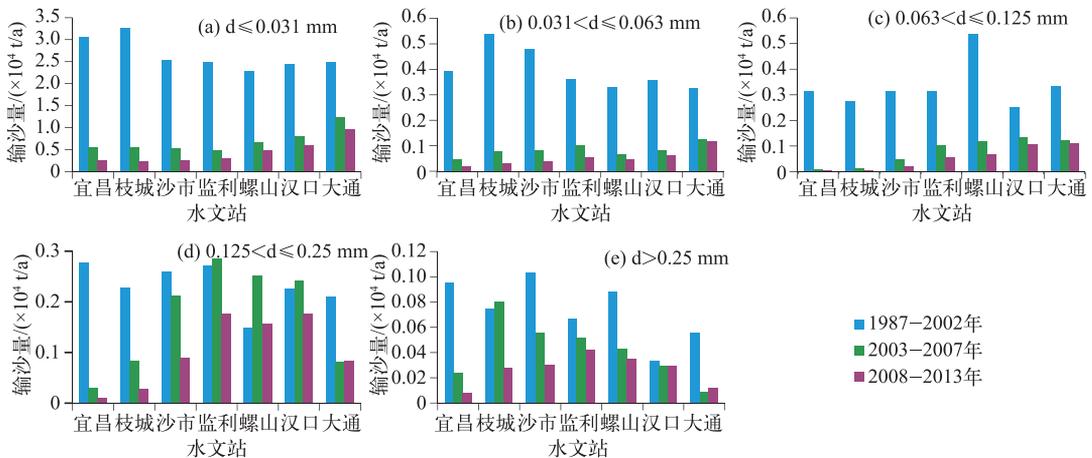


图5 三峡大坝下游不同粒径组泥沙的输移过程

Fig.5 Transport process of different particle sizes of sediment in the downstream of the Three Gorges Dam

在时间上,  $d \leq 0.125\text{mm}$  各粒径组区间输沙量 2008—2004年  $<$  2003—2007年  $<$  1987—2002年;2003—2007年期间  $0.125\text{mm} < d \leq 0.25\text{mm}$  输沙量在监利、螺山和汉口站高于1987—2002年,而2008—2014年小于2003—2007年和1987—2002年;2003—2007年期间  $d > 0.25\text{mm}$  输沙量在枝城站略高于1987—2002年,2008—2014年期间除大通站外均低于2003—2007和1987—2002年.

2.2 三峡水库蓄水后典型年份粗、细颗粒泥沙输移过程

2006 和 2011 年为典型的枯水年(图 6a),  $d \leq 0.125 \text{ mm}$  含沙量变化分析表明:2011 与 2006 年相比较,宜昌、枝城、沙市、螺山和大通站均减小,监利和汉口站增加;2011 年与 2006 年  $d > 0.125 \text{ mm}$  含沙量相比较,各水文站均有减小趋势。2011 年水量与 2006 年相比较,宜昌、枝城、沙市和监利站均增加,螺山、汉口和大通站变化较小。2010 年和 2012 年为典型洪水年(图 6b),  $d \leq 0.125 \text{ mm}$  含沙量变化分析表明,2012 年与 2010 年相比较,宜昌—汉口站均为增加趋势,大通站为减少趋势; $d > 0.125 \text{ mm}$  含沙量宜昌、枝城、沙市和大通站减少趋势,螺山和汉口站为增加趋势,2012 年沿程各水文站的水量均略大于 2010 年。

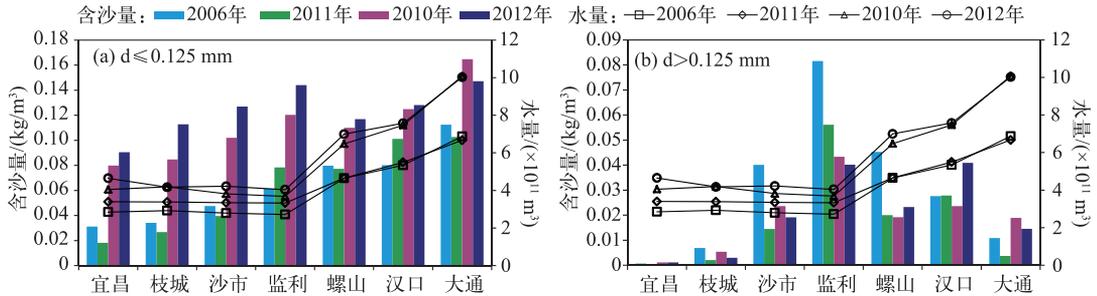


图 6 三峡大坝下游典型年份分组泥沙输移过程

Fig.6 Transport process of different particle sizes of sediment in the downstream of the Three Gorges Dam in the hydrological typical years

进一步对比洪水年份和枯水年份,以 2006 和 2010 年为例,分析表明:各水文站  $d \leq 0.125 \text{ mm}$  含沙量 2010 年均高于 2006 年,这一原因首先是上游含沙量较高,含沙量沿程恢复程度 2006 年强于 2010 年;各水文站  $d < 0.125 \text{ mm}$  含沙量除大通站外,其余各站均为 2006 年高于 2010 年,说明虽然 2006 年为枯水年流量偏小,但是河床粗颗粒泥沙补给充足。

2.3  $d > 0.125 \text{ mm}$ (粗)和  $d \leq 0.125 \text{ mm}$ (细)泥沙输移特性

$d > 0.125 \text{ mm}$  和  $d \leq 0.125 \text{ mm}$  泥沙输移规律在沿程上和时间内存在明显差异,下面以这两组泥沙做重点分析。在时间上(图 7a, 7c):2003—2007、2008—2014 年两时段各水文站  $d \leq 0.125 \text{ mm}$  输沙量和含沙量均小于 1987—2002 年期间;2003—2007 年期间宜昌—监利之间  $d > 0.125 \text{ mm}$  逐渐恢复,监利站输沙量和含沙量与 1987—2002 年期间持平或略有增加,2008—2014 年期间宜昌—监利之间该组泥沙虽有恢复,但量值上小于 1987—2002、2003—2007 年两时段。在空间上(图 7b, 7d):1987—2002 年期间  $d \leq 0.125 \text{ mm}$  输沙量在宜昌—枝城—沙市之间为先增加后减少,沙市—大通之间变化不大;2003—2007 和 2008—2014 年期间  $d \leq 0.125 \text{ mm}$  输沙量沿程逐渐增加,含沙量宜昌—监利之间增加,在监利—螺山之间略有减小,螺山—大通之间为增加趋势;宜昌—监利之间  $d > 0.125 \text{ mm}$  输沙量和含沙量在 1987—2002 年期间为减小趋势,蓄水后两时段为增加趋势,蓄水前后监利—大通之间均为减少趋势。

3 三峡大坝下游粗、细颗粒泥沙输移过程差异性成因探讨

影响三峡水库坝下游粗细颗粒泥沙输移的直接因素为三峡水库拦沙,间接因素为河床粗化、总水量、年内流量过程、支流及湖泊分汇作用等。

3.1 三峡水库拦蓄作用对粗、细颗粒泥沙输移过程的影响

2003 年以来三峡进出库的  $d \leq 0.125 \text{ mm}$  沙量均减少,库区淤积比例增加,即  $d \leq 0.125 \text{ mm}$  泥沙主要淤积在库区(图 8);入库的  $d > 0.125 \text{ mm}$  沙量无明显趋势性变化,出库沙量减少,库区淤积比例增加,2005—2014 年期间比例为 96.9%,即该组泥沙主要淤积在库区(图 8)。因此,三峡水库拦蓄了大量的粗颗粒和细颗粒泥沙,是坝下游粗细颗粒泥沙量减少的主要原因。在近坝段宜昌—监利河段内,2003—2007、2008—2014 年期间宜昌站粗颗粒沙量分别为  $0.054 \times 10^8$  和  $0.016 \times 10^8 \text{ t/a}$ ,监利站分别为  $0.337 \times 10^8$  和  $0.221 \times 10^8 \text{ t/a}$ ,2 个时期监利站粗颗粒沙量来自于区间河床补给量分别为  $0.283 \times 10^8$  和  $0.205 \times 10^8 \text{ t/a}$ ,河床补给比例分别为

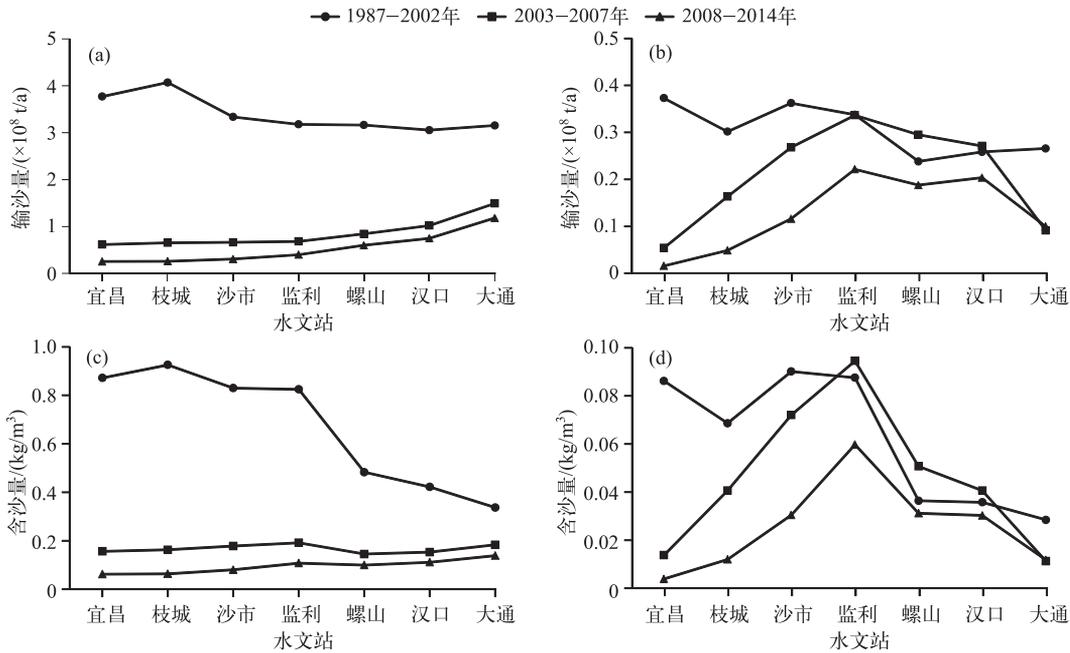


图7 三峡大坝下游  $d \leq 0.125$  mm (a, c) 和  $d > 0.125$  mm (b, d) 输沙量和含沙量变化

Fig.7 Changes of sediment load and sediment concentration from sediment group with  $d \leq 0.125$  mm (a, c) and  $d > 0.125$  mm (b, d) in the downstream of the Three Gorges Dam

85.3%和 92.8% ;2003—2007、2008—2014 年期间宜昌站细颗粒沙量分别为  $0.62 \times 10^8$  和  $0.25 \times 10^8$  t/a, 监利站分别为  $0.66 \times 10^8$  和  $0.41 \times 10^8$  t/a, 两时期监利站细颗粒沙量来自于区间河床补给量分别为  $0.04 \times 10^8$  和  $0.16 \times 10^8$  t/a, 河床补给比例分别为 6.1% 和 39.0%。 综上, 监利站粗细颗粒沙量来自于河床补给比例增加, 但粗颗粒泥沙年均补给量减少, 细颗粒泥沙年均补给量增加, 这可能与河床组成和流量过程等有关, 后面将重点分析。

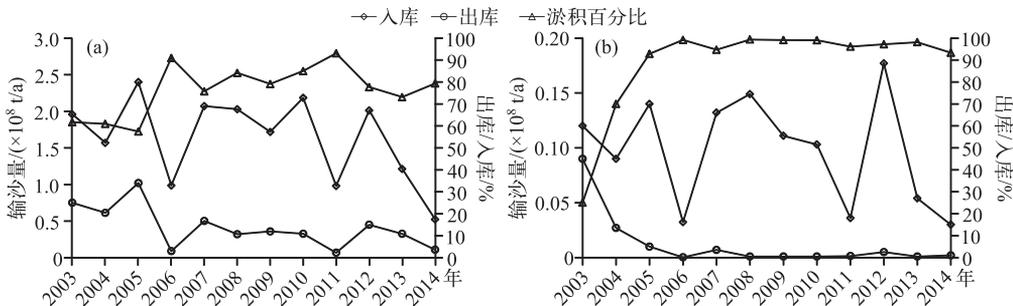


图8 三峡水库  $d \leq 0.125$  mm (a) 和  $d > 0.125$  mm (b) 泥沙进出库比例变化

Fig.8 The ratios of inflow sediment to outflow sediments with particle sizes grouped into  $d \leq 0.125$  mm (a) and  $d > 0.125$  mm (b) of the Three Gorges Reservoir

### 3.2 床沙粗化对粗、细颗粒泥沙输移过程的影响

2003、2007 和 2010 年为粗化趋势(图 9), 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, 螺山以下河段整体上略有粗化。 其中坝下游床沙引起河床糙率增加(表 2), 考虑纵向形态阻力和河势调整阻力的影响, 其综合阻力为增大趋势<sup>[18]</sup>, 阻力的增加会削弱河床对粗、细颗粒泥沙的补

给强度,沙质河段粗化程度较小,床沙粗化后对悬沙补给的影响较小。

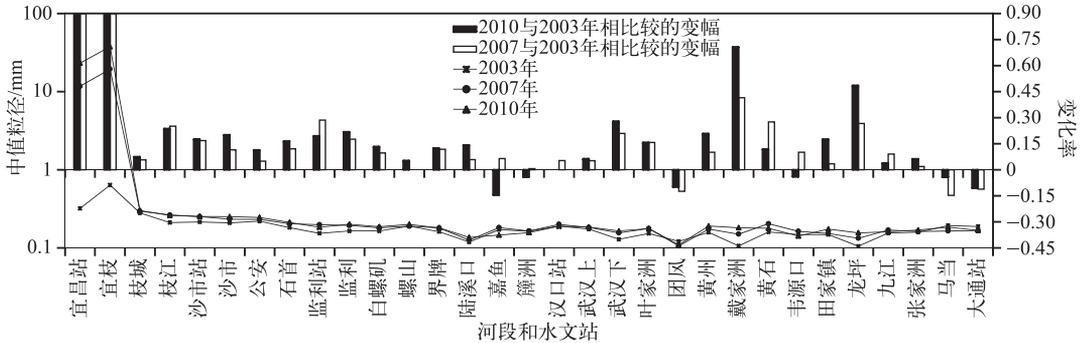


图9 三峡大坝下游河段床沙中值粒径变化

Fig.9 Change of median diameters for riverbed sediment in the downstream of the Three Gorges Dam

表2 河床粗化引起的糙率变化<sup>[17]</sup>

Tab.2 Roughness change caused by riverbed coarsening

	砂卵石河段		沙质河段	
河段	宜昌—枝城	枝城—大埠街	大埠街—城陵矶	城陵矶—湖口
增加倍数	1.91	1.65	1.03	1.02

3.3 流量过程变化对粗、细颗粒泥沙输移过程的影响

无论是粗颗粒还是细颗粒泥沙,输移量最大值均发生在大流量时期. 2006年沙市站  $Q > 15000 \text{ m}^3/\text{s}$  流量天数为 26 d, 2011年为 76 d, 天数明显增加, 但宜昌—沙市河段内  $d > 0.125 \text{ mm}$  和  $d \leq 0.125 \text{ mm}$  沙量均为减少趋势(图 10). 2006年和 2011年沙市站最大流量均小于  $25000 \text{ m}^3/\text{s}$ (接近平滩流量), 高滩基本不过水, 水流冲刷集中在平滩河槽, 因深槽中  $d \leq 0.125 \text{ mm}$  泥沙比例较少, 使得 2011年细颗粒沙量小于 2006年. 持续天数的增加有利于河床上  $d > 0.125 \text{ mm}$  组分泥沙冲刷补给, 由于河床粗化使得河道阻力增加, 减弱了水流对河床的冲刷能力, 使得 2011年  $d > 0.125 \text{ mm}$  沙量小于 2006年. 2010年沙市站  $Q > 15000 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $Q > 25000 \text{ m}^3/\text{s}$  (接近平滩流量) 流量天数分别为 110、25 d, 2012年分别为 132、37 d, 天数也明显增加, 但宜昌—沙市河段内  $d > 0.125 \text{ mm}$  沙量为减少趋势,  $d \leq 0.125 \text{ mm}$  沙量均为增加趋势. 大流量时期水流漫过边心滩的时间较长, 不饱和水流对高滩的冲刷时间增加, 使得 2012年  $d \leq 0.125 \text{ mm}$  沙量高于 2010年, 由于河床粗化使得河道阻力增加, 减弱了水流对河床的冲刷能力, 使得  $d > 0.125 \text{ mm}$  沙量 2012年小于 2010年. 宜昌—沙市河段包含砂卵石、砂卵石过渡段, 沙质河段较短, 无论是枯水年还是洪水年, 河床粗化引起的床面阻力增加, 限制了水流对河床的冲刷能力, 使得河床对  $d > 0.125 \text{ mm}$  沙量补给减少, 洪水年份河床对  $d \leq 0.125 \text{ mm}$  沙量补给大, 主要是漫滩水流使得高滩冲刷所致, 但补给量也受制于大流量持续天数.

宜昌—监利河段选取  $Q \geq 2.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{s}$ , 螺山站  $Q \geq 3.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{s}$ , 汉口站  $Q \geq 3.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{s}$ , 大通站  $Q \geq 4.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{s}$  作为中洪水流量(图 11). 2008—2014年期间坝下游宜昌、枝城、沙市、监利和汉口站大于某流量天数和天数内均值流量均低于 2003—2007年期间, 螺山和大通站 2008—2014年高于 2003—2007年期间. 在无支流、湖泊汇入的水文站区间, 2008—2014年期间粗细颗粒沙量小于 2003—2007年, 这与区间大流量持续天数和量值相对应.

3.4 江湖交换及支流入汇作用对粗、细颗粒泥沙输移过程的影响

将宜昌—大通河段划分为宜昌—沙市、沙市—监利、监利—螺山、螺山—汉口、汉口—九江—大通河段. 江湖关系及支流入汇作用对不同河段单元粗、细颗粒泥沙输移的影响如下:

(1) 宜昌—沙市河段. 三峡水库蓄水后沙市站  $d > 0.125 \text{ mm}$  和  $d \leq 0.125 \text{ mm}$  输沙量高于宜昌站, 表明区间河床补给量大于松滋口和太平口的分沙量, 即河床冲刷补给能力决定着区间的补给量. 2008—2014年期

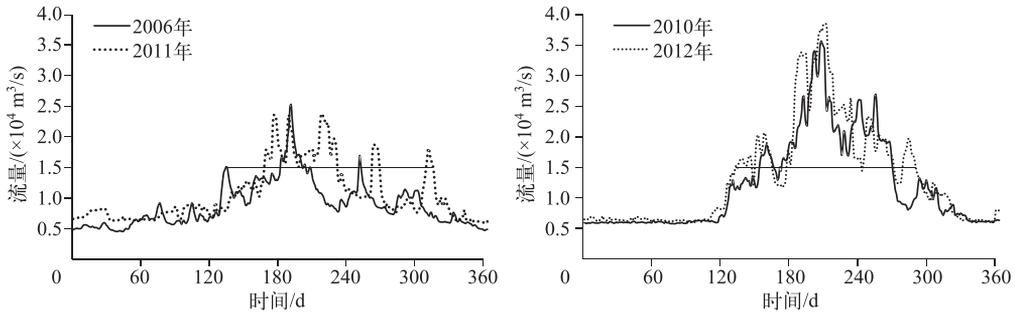


图 10 三峡水库蓄水后沙市水文站典型年份流量变化过程

Fig.10 Discharge changes in typical hydrological years in the Shashi hydrological station after the Three Gorges Reservoir impoundment

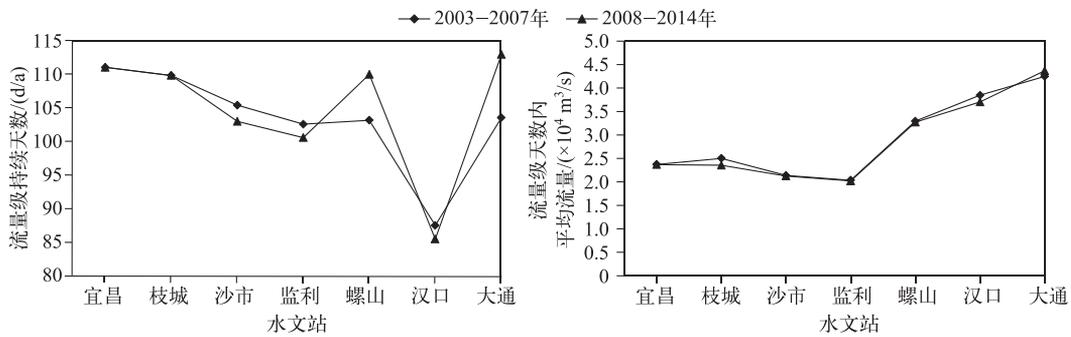


图 11 三峡大坝下游中洪水流量及持续天数变化

Fig.11 Change of flood discharge and duration in the downstream of the Three Gorges Dam

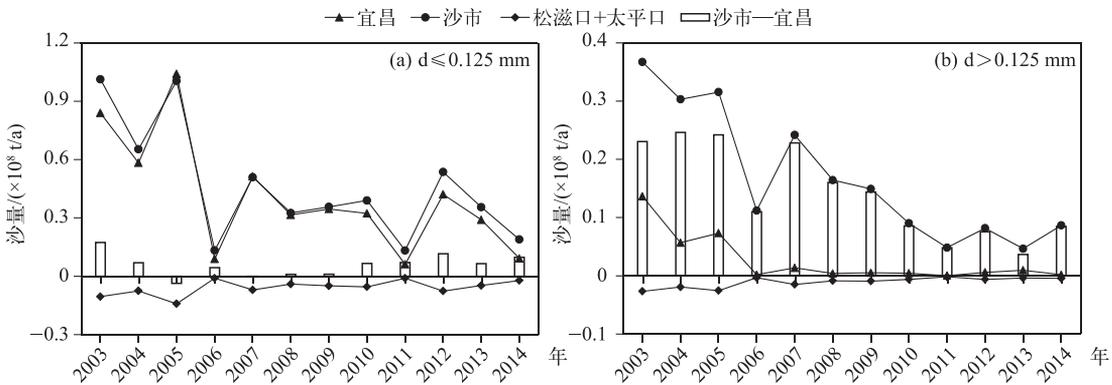


图 12 宜昌—沙市河段粗、细颗粒泥沙冲淤量变化

Fig.12 Change of quantity of scouring and sedimentation for coarse and fine sediment in Yichang to Shashi section

间  $d \leq 0.125 \text{ mm}$  输沙量补给高于 2003—2007 年,与总水量的变化规律一致。统计表明,宜昌—沙市河段内的边滩和心滩面积为减少趋势<sup>[19]</sup>,即河床对细颗粒泥沙的补给主要来自于滩地。2008—2014 年期间  $d > 0.125 \text{ mm}$  输沙量补给低于 2003—2007 年,与河床粗化和大流量持续天数及量值变化规律一致。综上,宜昌—沙市

河段细颗粒泥沙补给来自于滩地,受总水量的影响较大,作用于滩地水流冲刷时间增加得到补给,粗颗粒泥沙补给受制于大流量持续天数及量值的影响。

(2)沙市—监利河段. 三峡水库蓄水后监利站  $d>0.125\text{ mm}$  和  $d\leq 0.125\text{ mm}$  沙量均高于枝城站,表明区间河床补给量大于藕池口的分沙量,即河床冲刷补给能力决定着区间的补给量(图 13).  $d\leq 0.125\text{ mm}$  和  $d>0.125\text{ mm}$  沙量 2008—2014 年期间均高于 2003—2007 年,与总水量变化趋势一致. 虽然河床表现为粗化趋势,但为沙质河床,粗细颗粒泥沙的补给来源充足,由于沙市—监利河段间藕池口分沙作用的存在,沙市—监利河段间粗细颗粒泥沙的补给量主要受制于水量多寡,其次是河床粗化及大流量持续天数及量值等因素。

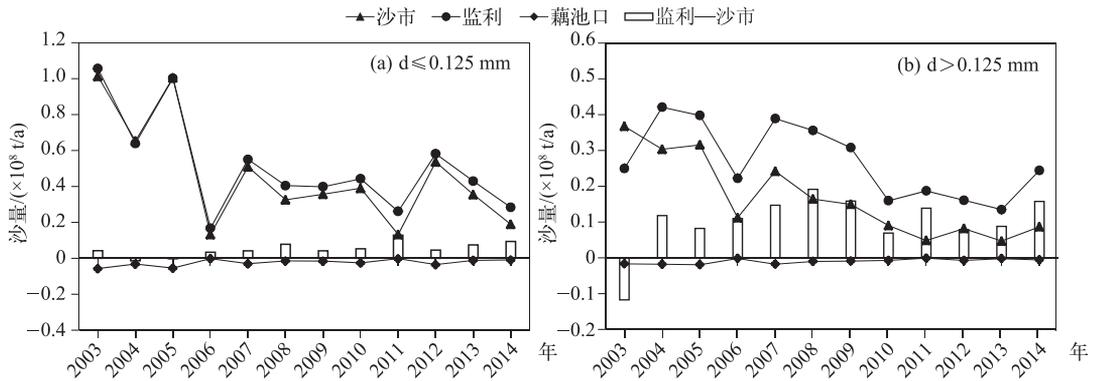


图 13 沙市—监利河段粗细颗粒泥沙冲淤量变化

Fig.13 Change of quantity of scouring and sedimentation for coarse and fine sediment in Shashi to Jianli section

(3)监利—螺山河段. 洞庭湖城陵矶站沙量与螺山—监利站之间  $d\leq 0.125\text{ mm}$  冲淤量关系(图 14a),两者表现出正相关关系,中洪水年份的补给量大于中枯水年份,约 2/3 的年份补给量均大于城陵矶站  $d\leq 0.125\text{ mm}$  的来沙量. 从 2003—2014 年平均值上看,河床补给作用占监利—螺山站之间河段  $d\leq 0.125\text{ mm}$  泥沙增量的 9.4%,即监利—螺山之间  $d\leq 0.125\text{ mm}$  泥沙的补给主要来自于洞庭湖入汇,河床补给占次要作用.  $d>0.125\text{ mm}$  泥沙在监利—螺山之间主要为淤积趋势(2003 年除外),中洪水年的淤积量小于中枯水年,表明中洪水年大流量对  $d>0.125\text{ mm}$  泥沙起到较强的携带作用(图 14b).

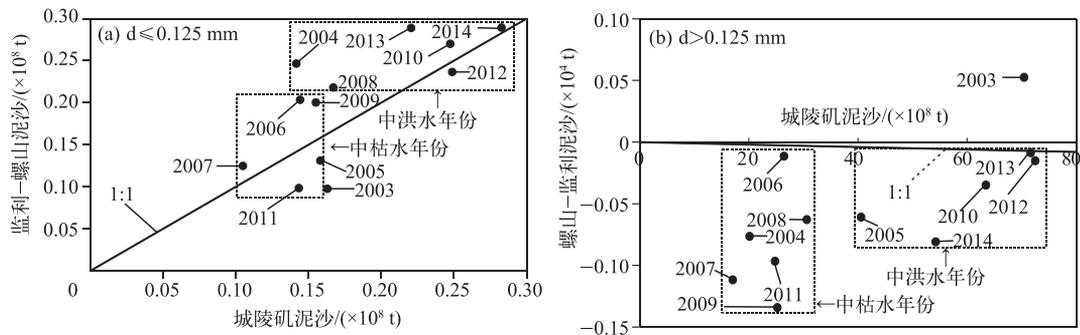


图 14 洞庭湖入汇对监利—螺山河段泥沙输移过程的影响(将三峡水库蓄水后螺山站流量进行排序,以平均值作为分界,大于平均流量定义为中洪水年份,小于平均流量为中枯水年份,2004、2006、2007、2009、2011 和 2013 年为中枯水年份,2003、2005、2008、2010、2012 和 2014 年为中洪水年份;大通站与螺山站划分年份相同)

Fig.14 Impact of confluence from Lake Dongting on the sediment transporting process in Jianli to Luoshan section

(4)螺山—汉口河段. 螺山—汉口河段存在汉江入汇,其入汇口门在汉口站以上约 1.5 km,对整个河段的冲淤影响较小,将汉口站粗细颗粒沙量扣除汉江入汇量,分析螺山—汉口河段粗细颗粒泥沙输移过程(图

15). 分析表明:2003—2014 年期间,  $d \leq 0.125$  mm 泥沙在螺山—汉口河段河床对其起到补给作用, 年均补给量 2008—2014 年略低于 2003—2007 年;  $d > 0.125$  mm 泥沙在 2003—2009 年期间螺山—汉口河段为淤积趋势, 2010—2014 年期间为河床冲刷补给趋势. 在三峡水库蓄水前,  $d > 0.125$  mm 泥沙在螺山—汉口河段为淤积趋势, 在 2003—2007 年期间延续了淤积的趋势, 但淤积量有所减少<sup>[9]</sup>, 但 2010 年以来转为河床冲刷补给, 主要受来流过程的影响. 上文 3.3 小节分析得到, 2008—2014 年期间螺山站  $Q \geq 2.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{s}$  流量均值和持续天数均为增加趋势, 在螺山站沙量持续锐减的条件下, 洪水流量持续天数增加使得水流对河床冲刷动力增强, 致使 2010 年以来  $d > 0.125$  mm 泥沙在螺山—汉口河段冲淤特性发生转变.

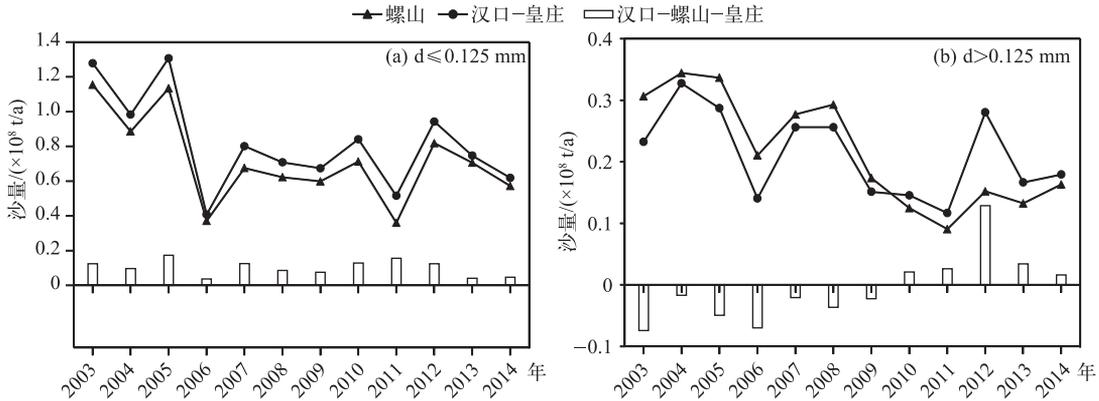


图 15 螺山—汉口河段粗细颗粒泥沙冲淤量变化

Fig.15 Change of quantity of scouring and sedimentation for coarse and fine sediment in Luoshan to Hankou section

(5) 汉口—九江河段. 汉口—九江河段 (图 16), 2007—2012 年期间九江站  $d \leq 0.125$  mm 低于汉口站, 表明该河段内细颗粒泥沙为淤积趋势; 九江站  $d > 0.125$  mm 沙量高于汉口站, 说明 2007—2012 年期间河床对粗颗粒泥沙为补给趋势. 整体上, 在汉口—九江河段内, 细颗粒泥沙淤积, 粗颗粒泥沙冲刷. 粗细颗粒泥沙淤积量上, 大水年份细颗粒泥沙淤积量高于中枯水年份, 粗颗粒泥沙冲刷量大水年份高于中枯水年份, 主要与大流量数值及持续天数有关.

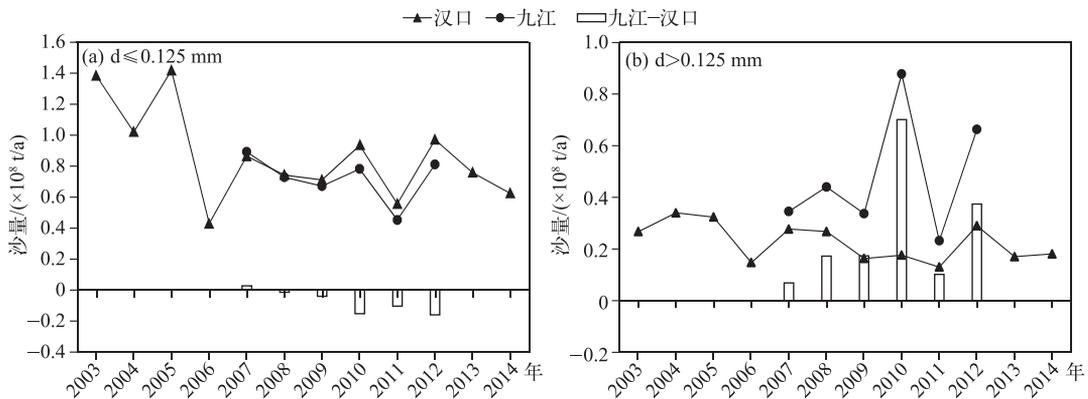


图 16 汉口—九江河段粗细颗粒泥沙冲淤量变化

Fig.16 Change of quantity of scouring and sedimentation for coarse and fine sediment in Hankou to Jiujiang section

(6) 九江—大通河段. 九江—大通河段 (图 17), 细颗粒泥沙为补给趋势, 且中洪水年份高于中枯水年份, 在量值上高于鄱阳湖入汇的细颗粒泥沙量, 但鄱阳湖入汇水量多少为区间细颗粒泥沙补给的决定因素,

这与文献[9]的研究结论一致;粗颗粒泥沙为淤积趋势,鄱阳湖入汇的粗颗粒沙量极少,对淤积的贡献程度较小,但中洪水淤积量小于中枯水,鄱阳湖入汇水量虽增加了大通站水量、大流量数值及天数,使得淤积量减少,但未能改变泥沙的冲淤特性. 在 2007—2012 年期间,鄱阳湖入汇细颗粒沙量为  $0.76 \times 10^8$  t,河床冲刷量为  $2.14 \times 10^8$  t,鄱阳湖入汇和河床冲刷对九江—大通细颗粒泥沙补给量的贡献比例为 1:2.82.

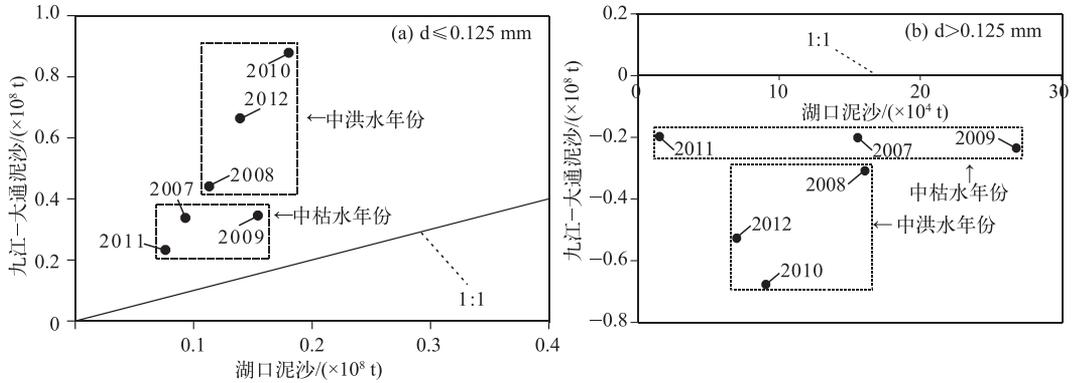


图 17 鄱阳湖入汇九江—大通河段粗细颗粒泥沙冲淤量的影响

Fig.17 Impact of confluence from the Lake Poyang on quantity of scouring and sedimentation for coarse and fine sediment in Jiujiang to Datong section

#### 4 结论

本文收集了 1987—2014 年期间三峡水库进出库、坝下游干支流及湖泊水文站泥沙总量及级配、河床组成等资料,研究了三峡大坝下游干流河段粗细颗粒泥沙输移规律,从流量过程、河床组成、江湖分汇、支流入汇等方面着手,探讨粗细颗粒沙输移的时空差异性及其成因. 主要结论为:

1) 分组沙输移规律:①三峡水库蓄水后坝下游各水文站  $d \leq 0.031$  mm、 $0.031 < d \leq 0.063$  mm 和  $0.063$  mm <  $d \leq 0.125$  mm 量均小于蓄水前,其中 2008—2014 年期间小于 2003—2007 年期间,空间上蓄水后各粒径组沙量沿程上整体为增加趋势;②三峡水库蓄水后坝下游各水文站  $d > 0.125$  mm 沙量在宜昌—监利得到有效补给,至监利站 2003—2007 年超过了蓄水前均值,2008—2014 年期间恢复程度减弱,数值低于 2003—2007 年和蓄水前均值.

2) 粗、细颗粒泥沙输移差异性的成因:①宜昌—沙市河段,河床粗化限制了粗细颗粒泥沙补给,其中细颗粒沙量补给受制于总水量,粗粒受制于大流量持续天数和量值;②沙市—监利河段,粗细颗粒泥沙补给均受制于总水量;③监利—螺山河段,洞庭湖入汇对细颗粒沙量的补给起决定作用,河床补给量中洪水年大于中枯水年,粗颗粒为淤积趋势,且中洪水年淤积量小于中枯水年;④螺山—汉口河段,细颗粒沙量增加主要受河床补给决定,且 2008—2014 年补给强度弱于 2003—2007 年,2010 年前后粗颗粒泥沙由淤积转为冲刷,与大流量持续天数和量值的增加有关;⑤汉口—九江河段,细颗粒泥沙淤积,中洪水年份淤积量大于中枯水,粗颗粒泥沙受河床补给影响为增加趋势,中洪水年份补给量高于中枯水;⑥九江—大通河段,鄱阳湖入汇和河床补给对细颗粒沙量增加的贡献比例为 1:2.82,河床冲刷对粗颗粒泥沙起补给作用,主要与鄱阳湖入汇水量多寡有关.

#### 5 参考文献

[ 1 ] Benn PC, Erskine WD. Complex channel response to flow regulation: Cudgegong River below Windermere Dam, Australia. *Applied Geography*, 1994, **14**(2): 153-168.

[ 2 ] Ge Hua, Zhu Lingling, Zhang Xibing. Analysis of no uniform sediment recovery coefficient downstream from reservoir. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2011, **44**(6): 711-715. [葛华, 朱玲玲, 张细兵. 水库下游非均匀沙恢复饱和和

- 系数特性. 武汉大学学报(工学版), 2011, 44(6): 711-715.]
- [ 3 ] Hydrology Bureau, Changjiang Water Resource Commission ed. Analysis of river bed erosion downstream from Danjiangkou reservoir in period of retardation and period of water impoundment. Sediment Research of Three Gorge Project ( Vol. 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 ] Liu Cheng, Sui Jueyi, He Yun *et al.* Changes in runoff and sediment load from major Chinese rivers to the Pacific Ocean over the period 1955–2010. *International Journal of Sediment Research*, 2013, 28(4): 486-495.
- [ 6 ] Yang SL, Xu KH, Milliman JD *et al.* Decline of Yangtze River water and sediment discharge: Impact from natural and anthropogenic changes. *Scientific Reports*, 2015, 5:12581.
- [ 7 ] 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.
- [ 8 ] 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. [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.]
- [ 9 ] Chen Fei, Li Yitian. Analysis of the characters of erosion and deposition downstream from the reservoir. *Advances in Water Resources and Hydraulic Engineering*, 2009, ( 1-6 ): 797-802.
- [ 10 ] 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.]
- [ 11 ] Zhu Lingling, Ge Hua, Zhang Xibing *et al.* Preliminary study on responses of non-uniform sediment scouring and silting in the middle Yangtze to its inflows. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2012, 30(6): 215-221. [朱玲玲, 葛华, 张细兵等. 长江中游非均匀沙冲淤对来水来沙响应初步分析. 水力发电学报, 2012, 30(6): 215-221.]
- [ 12 ] Xu Jiongxin, Hu Chunhong, Chen Jianguo. Effect of suspended sediment grain size on channel sedimentation in the lower Yellow River and some implications. *Science in China Series E: Technological Sciences*, 2009, 52(8): 2330-2339.
- [ 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.
- [ 14 ] Jiang Liuzhi, Ban Xuan, Wang Xuelei *et al.* Assessment of hydrologic alterations caused by the Three Gorges Dam in the middle and lower reaches of Yangtze River, China. *Water*, 2014, 6(5): 1419-1434.
- [ 15 ] Luo XX, Yang SL, 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*, 2013, 179(1): 126-140.
- [ 16 ] Yang Yunping, Zhang Mingjin, Li Yitian *et al.* Suspended sediment recovery and bed sand compensation mechanism affected by the Three Gorges Project. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(7): 1241-1254. [杨云平, 张明进, 李义天等. 长江三峡水坝下游河道悬沙恢复和床沙补给机制. 地理学报, 2016, 71(7): 1241-1254.]
- [ 17 ] Zhang Wei, Yang Yunping, Zhang Mingjin *et al.* Mechanisms of suspended sediment restoration and bed level compensation in downstream reaches of the Three Gorges Projects ( TGP ). *Journal of Geographical Sciences*, 2017, 27( 4 ): 463-480.
- [ 18 ] Han Jianqiao. The interaction mechanism between longitudinal water and sediment transport and channel morphology in the downstream of Three Gorges Reservoir [Dissertation]. Wuhan: Wuhan University, 2014. [韩建桥. 三峡水库下游纵向水沙输移与河道形态相互作用机制研究[学位论文]. 武汉: 武汉大学, 2014.]
- [ 19 ] Zhu Lingling, Ge Hua, Li Yitian *et al.* Branching channels in the middle Yangtze River, China. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2015, 23(2): 246-258. [朱玲玲, 葛华, 李义天等. 三峡水库蓄水后长江中游分汊河道演变机理及趋势. 应用基础与工程科学学报, 2015, 23(2): 246-258.]