

## 三峡水库 2003 年蓄水以来库区干流泥沙淤积初步分析

胡江<sup>1,2</sup> 杨胜发<sup>1</sup> 王兴奎<sup>2</sup>

(1. 重庆交通大学 国家内河航道整治工程技术研究中心 重庆 400074;

2. 清华大学 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室 北京 100084)

摘要: 基于三峡水库 2003 年蓄水至 2010 年间的实测资料, 对库区干流的泥沙淤积量、淤积分布及断面淤积方式进行了详细分析。结果表明, 三峡水库干流河道泥沙淤积主要发生在常年库区内, 平面上呈不连续分布, 其断面淤积形态主要有三种。三峡库区干流泥沙淤积分布与河道的平面形态以及断面的平均水深和平均流速等参数关系密切, 本文统计分析得出了发生泥沙淤积时断面平均流速与水深间的经验关系。

关键词: 三峡水库; 库区干流; 泥沙淤积

中图分类号: TV145.1

文献标识码: A

文章编号: 0468-155X(2013)01-0039-06

## 1 概述

三峡工程举世瞩目, 规模宏大, 涉及面广, 其防洪、发电及航运等综合效益巨大。2003 年 6 月, 三峡水库开始 135m 蓄水, 在 2006 年 9 月以后实现了 156m 蓄水, 2008 年 9 月后又实现了 175m 试验性蓄水, 并在 2010 年 10 月 26 日坝前水位首次达到 175m。

三峡水库蓄水以后, 库区河段水深大幅增加, 比降减小, 流速减缓, 河面变宽。一方面, 航道条件大幅改善, 在汛后蓄水期万吨级船队实现了汉渝直达, 直接促进了三峡库区航运的飞速发展, 对国民经济建设起到了巨大的促进作用; 但另一方面, 蓄水造成大量泥沙淤积在库区内, 将减少水库的有效库容, 抬高上游洪水位, 并对干流航道及沿线的港口码头、取水口等设施的正常使用造成一定的影响。因此, 三峡水库的泥沙淤积一直是各方关注的重点问题。

20 世纪 80-90 年代期间, 国务院三峡办泥沙专家组和三峡开发总公司组织南京水利科学研究所、清华大学、长江科学院等国内有关科研部门和高校, 采用 1961-1970 年十年水沙系列循环, 通过物理模型及一维数学模型对三峡水库不同蓄水方案的泥沙淤积总量、淤积量的分布及淤积引起的水库洪水位抬高问题进行大量研究<sup>[1-2]</sup>, 其丰富的研究成果对三峡水库的建设起到了关键性的作用。20 世纪 90 年代以来, 长江流域上游水沙条件发生了显著的变化, 相比 1961-1970 年系列, 1991-2000 年系列的来沙量明显减少; 同时, 三峡水库运行方案也进行了调整; 而考虑到金沙江上游溪洛渡、向家坝水库群修建后, 原有研究成果所依赖的水沙边界条件变化更大。因而, “十五”期间, 多家科研单位及高校联合, 在增加 1991-2000 年系列水沙条件、三峡水库新的运行方案、金沙江上游向家坝等水库建库的条件以及 2003 年三峡蓄水后实测资料验证的基础上, 对三峡水库的库区泥沙淤积问题重新进行了详细的研究, 获得了较多新的认识<sup>[3-4]</sup>。基于三峡水库的重要性, 多个单位的专家学者针对三峡水库的泥沙淤积问题, 从不同的角度进行过大量的专题研究, 在认知规律的同时还解决了一些工程实际的需要<sup>[5-12]</sup>。

从三峡水库 2003 年蓄水至今的大量实测资料分析表明, 三峡水库作为大型山区河道型水库, 成库

收稿日期: 2011-12-08

基金项目: 国家科技支撑计划项目“三峡水库常年回水区航运工程建设关键技术研究”(2011BAB09B01); 重庆市自然科学基金 (cstc2011jjA1167)

作者简介: 胡江(1977-), 男, 四川绵阳人, 博士, 副教授, 主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail: hujiang77@163.com

初期表现出的泥沙淤积规律与原来的研究成果有所出入。本文基于长江委和长江航道局近年来对三峡水库的实测资料<sup>[13,14]</sup>，从淤积量、淤积区域的平面分布、淤积形态及淤积判别等方面初步分析了干流泥沙淤积特性，为科学合理的决策及进一步研究提供参考。

## 2 三峡水库干流河道概况

三峡水库坝址位于湖北省宜昌市秭归县，2010年汛后坝前达到175m水位以后，回水至重庆市江津区红花碛河段，库区干流总长约664km；汛期，三峡水库按照145m水位运行，回水至长寿附近，距坝里程约527km。三峡库区长江干流河道简图见图1所示。



图1 三峡库区长江干流河道简图  
Fig.1 Scheme of Yangtze River above Three Gorges Project

三峡水库为大型的山区河道型水库，库区干流长江自西向东蜿蜒于低山丘陵地带之中，属典型的山区河流。其洪水陡涨陡落，天然情况下洪枯水流量相差超过20倍，水位涨落变幅达30m；江面坡陡流急，汛期水面平均比降约为0.25‰，表面流速达3m/s，在峡谷河段最大比降可达1.5‰，表面流速超过5m/s；河床宽窄相间，其河道最宽处近1700m，而最窄处仅250m左右，形成了包括三峡在内的多个峡谷段；河床断面呈典型的“V”型或“U”型，河床地形沿程起伏较大，整体落差约140m，深泓线最大高差约210m。

## 3 成库以来干流泥沙淤积总量

三峡水库自2003年蓄水至2010年11月，其间共经历了135-139m、156-144m和175m试验性蓄水三个阶段。根据期间的库区实测资料分析，干流泥沙淤积总量变化过程及沿程分布趋势表现为：

- (1) 在135-139m蓄水期间，三峡水库干流河段总共淤积泥沙约5.411亿m<sup>3</sup>，其中丰都以下的常年回水区淤积量约为5.396亿m<sup>3</sup>，占总量的99.7%；丰都至涪陵间的变动回水区仅占总量的0.3%。
- (2) 在156-144m蓄水期结束时，库区干流泥沙淤积总量约为6.654亿m<sup>3</sup>，其中涪陵李渡以下的常年回水区淤积量约为6.602亿m<sup>3</sup>，占总量的99.2%；李渡至铜锣峡的变动回水区占淤积总量的0.8%。
- (3) 至2010年10月份坝前水位达到175m后，库区干流泥沙淤积总量约为11.95亿m<sup>3</sup>，其中长寿以下的常年回水区淤积量约为11.83亿m<sup>3</sup>，占总量的99.0%；长寿以上的变动回水区河段仅零星淤积了约0.12亿m<sup>3</sup>，占总量的1.0%。

图2统计了三峡水库蓄水以来不同阶段淤积量的沿程分布情况，可以看出，随着水库水位的逐步抬高，库区干流泥沙累积性淤积逐步加大，其中，156-144m蓄水结束后干流泥沙淤积总量较135-139m蓄水期增加了22.9%，而至2010年坝前水位达到175m后，泥沙淤积总量迅速增大，较156-144m蓄水结束时增大了98.0%，接近翻番。

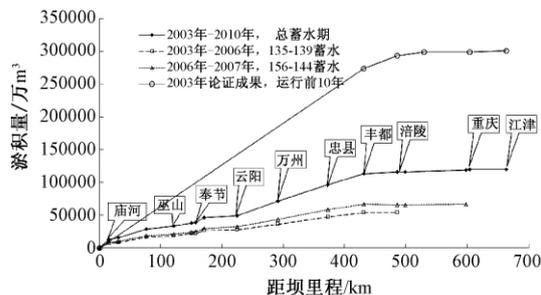


图2 三峡蓄水后库区长江干流淤积量的沿程分布  
Fig.2 Sedimentation amount along mainstream of TGR

根据1988年三峡水库泥沙研究的成果，在水库运行前10年，库区干流泥沙淤积总量约为30.1亿m<sup>3</sup>，接近目前实际淤积量的3倍。尽管三峡水库运行至今未及10年，但是其淤积总量表现出的规律是水位抬升初期淤积量大，以后逐年减缓，因而总的来看，其实际淤积泥沙较以往研究成果大大减少，水库运行效果较预期的更好。

## 4 干流泥沙淤积的分布特性

### 4.1 泥沙淤积的平面分布

图3描绘了三峡水库自2003年蓄水以来干流泥沙主要淤积区域的平面分布。从泥沙淤积的沿程

分布来看,在常年库区内泥沙淤积也并不是大面积、连续性的分布,而是重点淤积在近坝段、连续弯曲河段、宽谷段、支流河口以及分汊河道的洲尾等,而坝址 15km 以外库区内的顺直及窄槽型河段基本不淤或微淤甚至出现冲刷。

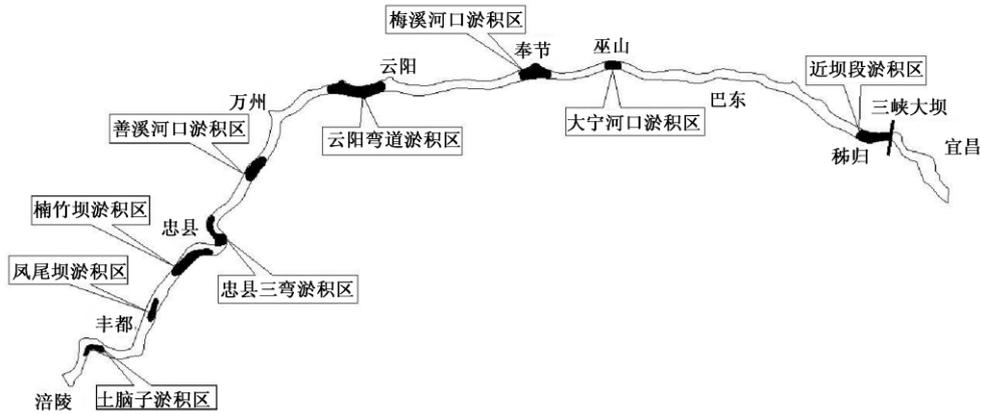


图 3 三峡蓄水后库区长江干流重点淤积区域平面分布示意图  
Fig. 3 Main area of sedimentation along mainstream of TGR

从统计结果来看,当前,三峡库区泥沙淤积分布表现出典型的点状淤积,在近坝段(坝前 15km)、巫山大宁河口、奉节梅溪河口、云阳连续弯道、万州善溪河口、忠县黄花城连续弯道、楠竹坝连续弯道、丰都凤尾坝洲尾以及土脑子弯道 9 处约占库区干流总长 1/6 的河道,淤积了超过总量 70% 的泥沙,淤积速率及淤积强度均较大。其中忠县黄花城河段目前最大淤积厚度已经超过 50m,13km 河段淤积量达到 1.03 亿  $m^3$ ,相当于库区总淤积量的 1/11 (如图 4)。

#### 4.2 泥沙淤积的断面形态

目前,三峡库区河床的淤积形态主要表现为三种类型。一是河槽的平淤,如图 5 所示。此淤积方式主要分布于库区内泥沙淤积较为严重的地区,如近坝段、云阳河段、黄花城河段等,随着水库运行年限的增加,河床逐年平行抬升,主槽慢慢消失。

第二种为沿湿周淤积,此淤积方式分布于库区开阔段内,如图 6 所示。由于河床断面较宽,边坡较缓,水流分散,流速降低,泥沙容易沿河床断面发生淤积,泥沙淤积的厚度则与该断面所处位置以及水流挟沙力沿断面的分布有关。

第三种淤积方式为近岸主槽淤积或者边滩淤积,这种淤积方式主要出现在弯曲河段凸岸下首,因处于回流缓流区,泥沙更加容易淤积在该区域,典型的如丰都上游的土脑子河段,历来就是泥沙淤积的重点区域,如图 7 所示。

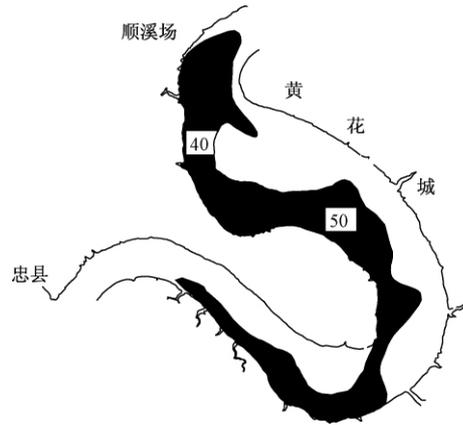


图 4 黄花城河段淤积分布图  
Fig. 4 Sedimentation distribution at Huanghuacheng reach

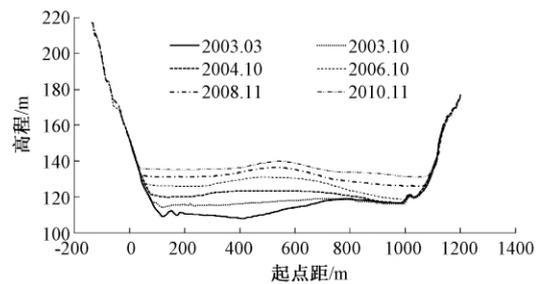


图 5 典型断面河槽平淤形态 (云阳河段,距坝里程 240.6km)  
Fig. 5 Parallel deposition section (Yunyang reach 240.6km above dam site)

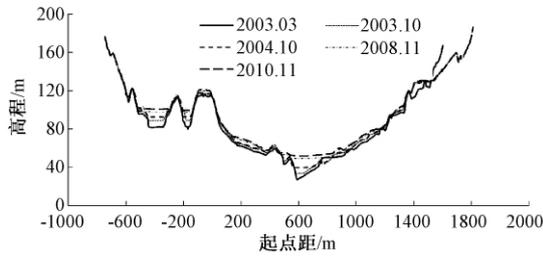


图6 典型断面沿湿周淤积形态(距坝里程3.4km)  
Fig. 6 Deposition along wetted perimeter  
(3.4km above damsite)

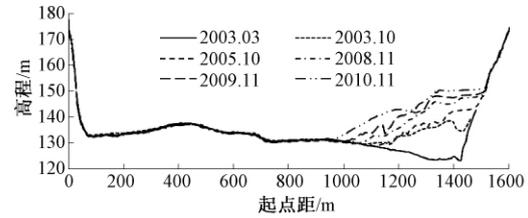


图7 典型断面近岸主槽淤积形态  
(土脑子河段,距坝里程356.9km)  
Fig. 7 Deposition in main channel near river bank  
(Tunaozi reach, 356.9km above damsite)

## 5 河道断面参数与泥沙淤积的关系分析

悬移质泥沙大规模输移一般集中发生于汛期,成库以后汛期至汛末是泥沙发生淤积的主要时期,汛期不同河段的流速、水深分布同该河段泥沙淤积间具有密切的关系。由于三峡成库以后常年库区河段受回水影响,水流速度大幅减缓,流速分布趋于均匀化,为简化分析方法,采用断面平均流速和平均水深作为统计分析的参数。

现有的河流动力学研究成果表明,汛期常遇流量主要反映汛期的造床作用,选择该频率洪水下库区各断面的水流条件组合同淤积之间的关系分析三峡干流河道的淤积较为合理。根据三峡成库以后常年库区内247个断面统计,迄今为止共有160个断面发生淤积,87个断面没有发生淤积,而变动回水区内的107个断面则没有出现明显的泥沙累积性淤积。统计分析常年库区内247个断面及变动回水区内的107个断面在汛期常遇流量时的平均流速和水深,并将其组成的数据对进行分析,结果表明,其淤积规律同所在库区内的位置以及水深的分布有密切的联系,并在不同的水深段表现出不同的特性,因而考虑将整个库区划分为三段分析其淤积规律。

### 5.1 常年库区深水段

云阳以下,断面平均水深基本上大于50m。在该河段内共有84个断面发生淤积,62个断面未发生淤积,其随水深及流速的分布如图8所示。对比淤积与不淤积断面的水深及流速关系可以发现,其边界的趋势线并不是一条直线。淤积边界随着水深的增加,发生淤积的临界流速逐渐减小;趋势线在水深小的时候变化快,水深大时变化幅度趋缓,而在水深超过100m以后,其接近于常数值,可以做出一条用幂函数表达的曲线来表示发生断面淤积的临界条件

$$U = 16.5H^{-\frac{2}{3}} \quad (1)$$

式中 $U$ 、 $H$ 分别表示断面平均流速和水深,上式适用条件为常年库区水深大于50m。由图8及公式(1)可知,在常年库区的深水段内,发生淤积的最大临界流速为1.2m/s。

### 5.2 常年库区浅水段

云阳以上河段断面平均水深多数小于50m。在该河段内共有76个断面发生淤积,25个断面未发生淤积,其随水深及流速的对比如图9所示。当断面平均流速小于1.2m/s时,基本上会发生泥沙淤积。当断面平均流速大于2.1m/s时,则基本上不会发生淤积。而流速介于1.2~2.1m/s之间时,其是否发生淤积与所在河段的平面形态有关,如果所在河道平面形态呈分叉、放宽或者连续弯曲,则容易发生淤积;若河道平面形态为顺直或窄槽型,则发生淤积的可能性较小。因此,常年库区浅水段泥沙淤积可以归纳为:

(1)  $U > 2.1\text{m/s}$ , 基本不会淤积;

(2)  $U \leq 1.2\text{m/s}$ , 基本会淤积;

(3)  $1.2\text{m/s} < U \leq 2.1\text{m/s}$ , 若为分叉、放宽或者连续弯曲河道,则发生淤积,否则不淤积。

### 5.3 变动回水区段

从目前变动回水区的断面资料分析来看,不管是135m阶段,还是145m阶段,变动回水区内均未出现明显的断面泥沙累积性淤积。只是在局部河段的回流区、缓流区内,汛期泥沙落淤后,因三峡水库汛后蓄水时导致每年9月份以后的走沙期消失,汛期淤积的泥沙在当年不能被带走,冲刷期延至第二年的消落期,但由于此时来流量不大,水位较低,不足以将头年的泥沙完全冲走,逐渐累积下来形成淤积。但是这种淤积与常年库区内因为蓄水导致的大量泥沙淤积有着本质的区别。因而无法给出变动回水区断面泥沙淤积的临界判别指标。

对比变动回水区内的断面平均流速可以发现,基本上都大于2.1m/s,所以可将2.1m/s作为变动回水区内不淤积的临界条件,即在变动回水区内,有如下规律:  $U \geq 2.1$  m/s 则不发生淤积(如图10)。

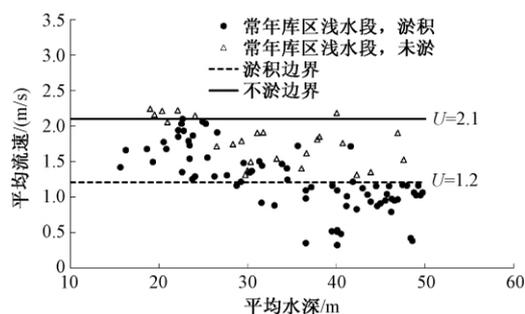


图9 常年库区浅水段淤积断面与平均水深和流速的关系  
Fig. 9 Relationship between section deposition and mean water depth and velocity in shallow water reach in permanent backwater region

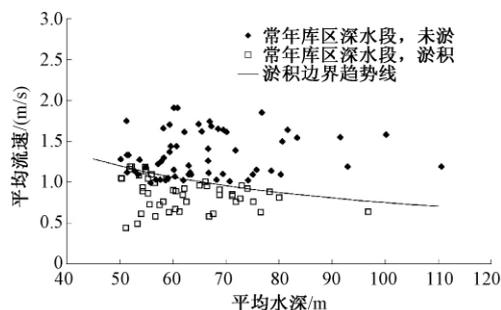


图8 常年库区深水段断面淤积与平均水深和流速的关系

Fig. 8 Relationship between section deposition and mean water depth and velocity in deep water reach in permanent backwater region

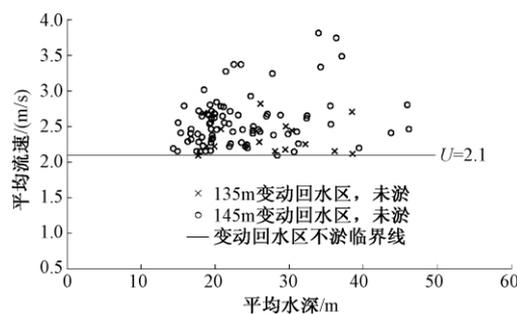


图10 变动回水区断面平均水深和流速的关系  
Fig. 10 Relationship between section deposition and mean water depth and velocity in fluctuating backwater region

## 6 结论

(1) 至2010年11月,干流河道泥沙淤积总量约为11.95亿 $m^3$ ,常年库区淤积量占到了约99%,变动回水区仅现零星淤积;

(2) 泥沙淤积呈不连续分布的特点,重点淤积区为近坝段、连续弯曲河段、宽谷段、支流河口以及分叉河道的洲尾等;

(3) 泥沙淤积的断面型式主要有河槽平淤、沿湿周淤积和近岸主槽淤积或者边滩淤积三种;

(4) 泥沙发生淤积与否与河道平面形态、断面的平均水深和平均流速有关。

三峡系大型的山区河道型水库,其蓄水后库区泥沙淤积问题一直是国内外关注的重点。尽管对三峡泥沙问题的研究从未间断过,但不管是物理模型还是数学模型,以前成果与目前的实际状态相比,在淤积总量和淤积分布上均存在一定的差别。其原因主要是近年来上游来水来沙条件改变,也有模型本身的影响。根据近年来三峡水库实测资料对数学模型进行修正,将大大提高数学模型预测三峡水库长期运行后泥沙淤积的精度。

### 参考文献:

[1] 水利电力部科学技术司. 三峡工程泥沙问题研究成果汇编(160-180米蓄水位方案) [R]. 北京: 水利电力部科学

技术司,1988.

- [2] 国务院三峡工程建设委员会办公室泥沙专家组. 长江三峡工程泥沙问题研究(1996-2000) [M]. 北京: 知识产权出版社, 2002.
- [3] 国务院三峡工程建设委员会办公室泥沙专家组. 潘庆燊. 三峡工程泥沙问题研究 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
- [4] 国务院三峡工程建设委员会办公室泥沙专家组. 长江三峡工程泥沙问题研究(2001-2005) [M]. 北京: 知识产权出版社, 2008.
- [5] 刘德春, 李俊, 张星科, 等. 三峡水库 135~139m 运行期土脑子河段冲淤条件分析 [J]. 泥沙研究, 2008(4): 31-35.
- [6] 邓金运, 李义天, 陈建, 等. 三峡水库提前蓄水对重庆河段泥沙淤积和浅滩演变的影响 [J]. 泥沙研究, 2008(3): 38-42.
- [7] 李义天, 陈建, 邓金运, 等. 上游建库对三峡水库变动回水区航道的影晌 [J]. 泥沙研究, 2008(5): 31-37.
- [8] 邓金运, 李义天, 陈建, 等. 泥沙淤积对三峡水库 9 月分旬蓄水的影晌 [J]. 水力发电学报, 2008, 27(3): 110-114.
- [9] 韩其为, 何明民. 论三峡水库泥沙淤积的控制——处理三峡水库泥沙的策略与措施 [J]. 泥沙研究, 1996(1): 1-19.
- [10] 陈建, 李义天, 孙东坡, 等. 水库调度方式对三峡水库泥沙淤积的影响 [J]. 武汉大学学报(工学版) 2008, 41(5): 18-22.
- [11] 梁栖蓉, 黄煜龄. 三峡水库泥沙淤积预估 [J]. 长江科学院院报, 1994, 11(3): 1-8.
- [12] 陈建, 李义天, 邓金运, 等. 水沙条件变化对三峡水库泥沙淤积的影响 [J]. 水力发电学报, 2008, 27(2): 97-102.
- [13] 长江水利委员会水文局. 2010 年度长江三峡工程库区泥沙冲淤分析 [R]. 武汉: 长江水利委员会水文局, 2011.
- [14] 长江航道局. 三峡工程航道泥沙原型观测 2010-2011 年度分析报告 [R]. 武汉: 长江航道局, 2011.

## Sedimentation in Yangtze River above Three Gorges Project since 2003

HU Jiang<sup>1,2</sup>, YANG Sheng-fa<sup>1</sup>, WANG Xing-kui<sup>2</sup>

(1. National Inland Waterway Regulation Engineering Research Center, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. State Key Laboratory of Hydrosience & Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Analysis based on field data of the Three Gorges Project (TGP) since 2003 shows that sedimentation in the Yangtze River above the TGP mainly deposited in the permanent backwater region. However, in the permanent backwater region the sedimentation did not spread widely and continuously. Totally, there are mainly three kinds of deposition section form. Sedimentation in the Yangtze River above the TGP has a close relationship with the plan form of the channel, the average water depth and the average cross-sectional velocity. The empirical relationship between the average water depth and the average velocity when sedimentation happening is obtained by statistic analysis finally.

**Key words:** Three Gorges Project; mainstream of reservoir; sedimentation