

# 三峡水库运用后长江中游河床冲淤调整特征流量变化对比研究

陈帆<sup>1</sup>, 孟军<sup>1</sup>, 孙凌凯<sup>1</sup>, 杨成刚<sup>2</sup>, 李雨晨<sup>3</sup>

<sup>1</sup>长江勘测规划设计研究有限责任公司, 湖北 武汉

<sup>2</sup>长江水利委员会水文局, 湖北 武汉

<sup>3</sup>武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉

收稿日期: 2022年8月15日; 录用日期: 2022年10月21日; 发布日期: 2022年10月28日

## 摘要

为对比分析三峡水库下游河床冲淤调整特征流量时空变化规律, 选取1981~2016年长江中游宜昌、枝城、沙市、监利、螺山和汉口6个主要水文站实测资料计算造床流量、有效流量和平滩流量, 并分析特征流量变化的统计特性。结果表明, 三峡水库蓄水运用后, 不同特征流量发生了差异性调整, 造床流量呈一致减小的变化趋势, 有效流量与平滩流量的变化呈明显的空间分异性; 与之相应, 不同特征流量在累计水沙输移占比、流量频率以及流量重现期等方面的变化有所不同。蓄水前后, 各水文站造床流量累计流量频率变化均较小, 有效流量累计径流占比、累计输沙占比和累计流量频率在蓄水后一致增加, 平滩流量与1.5年重现期流量大致相当。

## 关键词

造床流量, 有效流量, 平滩流量, 长江中游, 三峡水库, 重现期

## Comparative Study on the Variations in Characteristic Discharges for Channel Morphological Adjustments at the Middle Yangtze River after the Impoundment of the Three Gorges Reservoir

Fan Chen<sup>1</sup>, Jun Meng<sup>1</sup>, Ling kai Sun<sup>1</sup>, Cheng gang Yang<sup>2</sup>, Yuchen Li<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research, Wuhan Hubei

<sup>2</sup>Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan Hubei

作者简介: 陈帆, 湖北应城人, 生于1991年12月, 博士研究生, 工程师, 研究方向为: 水利水环境规划与设计。Email: chenfan@cjwsjy.com.cn

文章引用: 陈帆, 孟军, 孙凌凯, 杨成刚, 李雨晨. 三峡水库运用后长江中游河床冲淤调整特征流量变化对比研究[J]. 水资源研究, 2022, 11(5): 478-491. DOI: 10.12677/jwrr.2022.115052

<sup>3</sup>Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan Hubei

Received: Aug. 15<sup>th</sup>, 2022; accepted: Oct. 21<sup>st</sup>, 2022; published: Oct. 28<sup>th</sup>, 2022

## Abstract

To explore and compare the temporal-spatial variation rules of characteristic discharges for channel morphological adjustments downstream of the Three Gorges Reservoir (TGR), the field data of six main hydrometric stations at the Middle Yangtze River, *i.e.*, Yichang, Zhicheng, Shashi, Jianli, Luoshan and Hankou, were used for the calculation of dominant discharge, effective discharge and bank-full discharge and analysis of their statistic characteristics. The results show that after the impoundment of TGR, different characteristic discharges changed differently: The dominant discharges within the studied reaches showed a consistent decreasing trend, while the effective discharge and bank-full discharge variations behaved an obviously spatial differentiation. Accordingly, the changes of accumulative flow runoff percentage, accumulative sediment runoff percentage, flow frequency and flow recurrence period for different characteristic discharges were also different: After the impoundment of TGR, the accumulative flow frequency for dominant discharge at each hydrometric station changed very slightly, while the accumulative flow runoff percentage, accumulative sediment runoff percentage and accumulative flow frequency for effective discharge increased consistently, and the bank-full discharge at each hydrometric station was roughly equivalent to the corresponding 1.5-year recurrence period discharge.

## Keywords

Dominant Discharge, Effective Discharge, Bank-Full Discharge, Middle Yangtze River, Three Gorges Reservoir, Recurrence Period

Copyright © 2022 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

造床流量、有效流量和平滩流量是冲积河流河床演变分析中常用的特征流量[1]。造床流量是指造床作用与多年流量过程的综合造床作用相当的某一流量，有效流量是指一段时间内河流远距离输沙量最大的某一流量，平滩流量是指水位与河漫滩平齐时的流量，三者均是将水沙过程与河槽断面形态建立联系的流量指标，在物理涵义、计算方法上存在一定的相似性，因而在许多研究中被认为较为接近甚至可相互替代。三峡水库蓄水运用后，长江中游河道普遍表现出河床纵向下切、弯曲段“撇弯切滩”[2]、分汊段中低滩冲刷[3]等响应性冲淤调整特征，但在沿程冲刷幅度、悬沙恢复饱和程度以及不同河型的洲滩变形特征上存在一定的差异[4]。因此，揭示三峡水库下游表征水沙过程与河道形态适应关系的河床冲淤调整特征流量的时空变化特性，分析比较不同特征流量在蓄水后发生的差异性调整特点及其原因，对于水库下游河道再造床过程及河床演变机理的研究具有重要意义。

目前，国内外学者针对不同河流河床冲淤调整特征流量的计算方法及其影响因素的研究较多。Wolman 和 Miller [5]最早将地貌功的概念引入到河流动力学，并提出了利用地貌功曲线来计算有效流量的方法；Nash [6]基于流量频率曲线呈对数正态分布和流量 - 输沙率曲线呈指数分布的假设推导出了有效流量的解析表达式：

Ashmore 和 Day [7]分析了加拿大萨斯喀彻温河流域的水沙监测数据,归纳总结出五种不同型式的有效流量计算曲线;Ma 等[8]提出了一种基于流量序列波动情况调整流量间隔的计算方法,并将其应用于黄河无定河流域,得出水文情势和含沙量是影响有效流量计算的重要因素。造床流量最先是前苏联学者马卡维耶夫作为描述均衡河道形态与来水来沙条件之间函数关系的特征变量而提出,后被国内学者广泛采用,如陈建国等[9]将马卡维耶夫法中流量的次方取为 2,分析了黄河下游造床流量的变化过程,得出造床流量同时受来水量和来水过程的影响;张红武等[10]对马卡维耶夫法进行了改进,将水流的输沙能力表征因子替换为流量和挟沙能力的乘积,得出造床流量与泥沙糙度、河床边界条件等因素有关。平滩流量是与河道断面形态直接相关的特征流量,Williams [11]在美国西部的多条河流上比较了十六种平滩流量确定方法,得出输沙率关系曲线法在确定平滩流量时最为可靠;夏军强等[12]运用多种方法计算了黄河下游的平滩流量,得出在断面冲淤变化较大、水位流量关系复杂的情况下,水动力模型法最为合理。少数学者针对三峡水库运用后下游河道特征流量的变化开展了研究,如闫金波等[13]以宜昌水文站水沙资料为代表分析了三峡水库蓄水后下游河道造床流量的变化;孙昭华[14]以枝城至大通河段为例分析了江湖关系变化对造床流量的影响机制;张为等[15]采用了多种方法计算了三峡水库运用后长江中下游造床流量的变化,并得出了造床流量与来水量和洪峰流量的经验关系;Xia [16]分析了三峡蓄水后荆江河段平滩流量的变化及其与上、下游边界条件之间的关系。

以上研究较好地促进了河床冲淤调整特征流量内涵的丰富及其在河床冲淤演变分析中的应用,对三峡水库下游特征流量的变化及其原因也进行了相应的探讨,但仍存在以下不足:①未针对不同特征流量在蓄水后的变化开展比较研究,不同特征流量在同一时期内的变化情况及相互之间的关系尚不清楚;②关于特征流量重现期、流量频率和累积水沙输移占比等统计特性的研究较少,不利于特征流量概念的经验性推广应用。基于此,本文利用长江中游主要水文站 1981~2016 年的实测资料,分别计算三峡水库运用前后的造床流量、有效流量及平滩流量,并分析比较不同特征流量在蓄水后发生的变化及其统计特性。

## 2. 研究区域与方法

### 2.1. 研究区域

本文选取三峡水库下游宜昌至汉口河段为研究河段,长约 624 km,河段示意图如图 1 所示。其中枝城至城陵矶河段俗称荆江河段,南岸有松滋口、太平口、藕池口和调弦口(于 1959 年建闸封堵)分流分沙入洞庭湖,江湖关系较为复杂。



Figure 1. Sketch of the Yichang to Hankou river reach  
图 1. 宜昌至汉口河段示意图

## 2.2. 研究方法

本文选取研究河段内沿程分布的宜昌、枝城、沙市、监利、螺山、汉口 6 个主要水文站为研究对象(站点位置见图 1), 收集各站的流量、水位和含沙量等实测数据进行特征流量的分析计算。考虑到葛洲坝水利枢纽于 1981 年 1 月完成大江截流, 以各站 1981 年~2003 年 5 月的实测资料作为三峡水库运用前的分析资料; 2003 年 6 月~2016 年的实测资料作为三峡水库运用后的分析资料。同时, 为计算蓄水前后的平滩流量, 收集了各站点附近的典型洲滩断面资料。

分别采用马卡维耶夫法和水位 - 流量关系曲线法计算造床流量和平滩流量, 有效流量同时采用理论公式法和输沙量法进行计算, 分析比较后选取相对合理的计算结果。比较不同特征流量在蓄水后发生的变化, 并从累计水沙输移占比、流量频率以及流量重现期等方面探讨不同特征流量具备的统计特性。

## 3. 特征流量计算

### 3.1. 造床流量

马卡维耶夫法是计算造床流量的传统方法, 具体步骤为: ①由上、下相邻站点日均水位除以间距得该河段日均比降; ②将流量序列均分为若干间隔相等的流量级, 确定每级流量出现的频率  $P$  和平均比降  $J$ ; ③用幂函数拟合日均流量 - 输沙率关系, 得指数  $b$ ; ④计算每一级流量对应的  $Q^b JP$  (其中  $Q$  为各流量区间的平均值), 绘制  $Q-Q^b JP$  关系曲线, 从中读取  $Q^b JP$  最大值对应的流量  $Q$ 。马卡维耶夫法概念清晰, 计算简单, 代表水流输沙能力的  $b$  值对造床流量计算结果起到关键性作用。

三峡水库下游河床冲淤调整剧烈, 流量 - 输沙率关系随着河床的下切或抬升频繁变动, 不同年份之间  $b$  值变

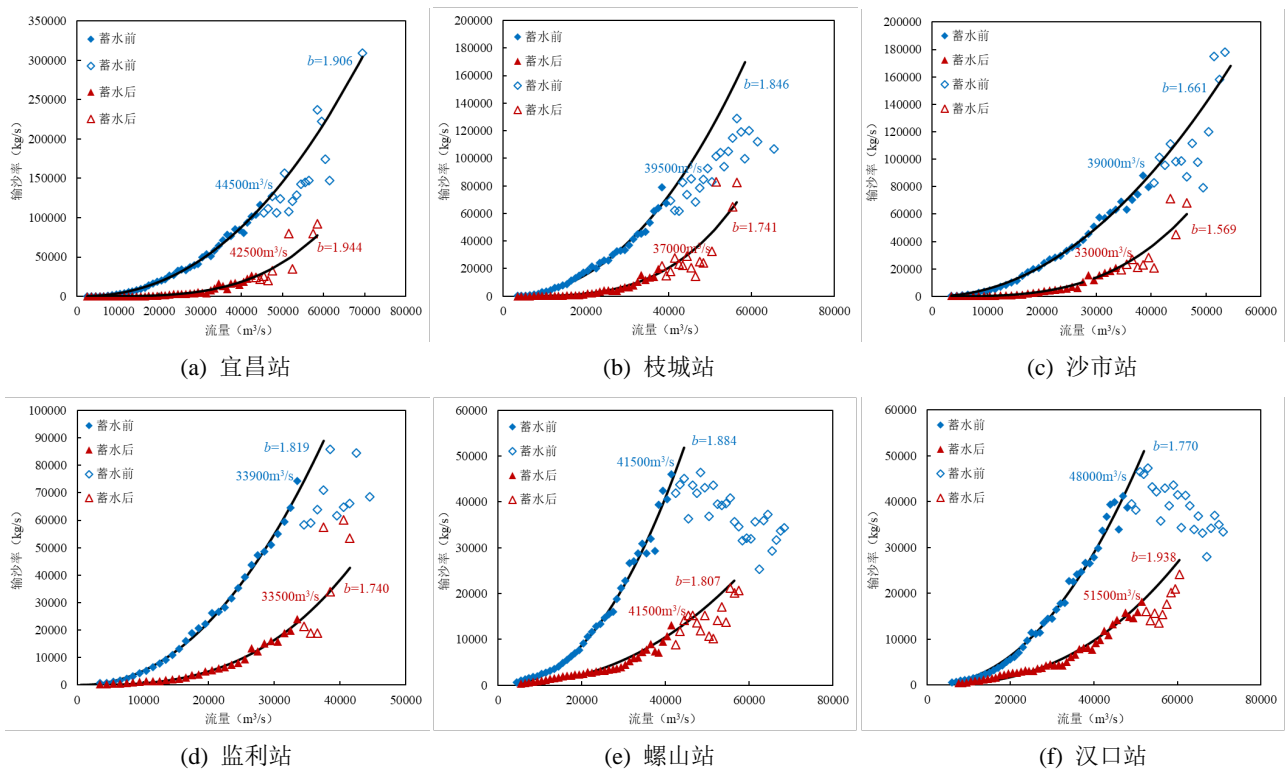


Figure 2. Relations between flow discharge and sediment transport rate at each hydrometric station before and after the construction of TGR

图 2. 三峡水库蓄水前后各水文站流量 - 输沙率关系

化较大。为反映蓄水前、后  $b$  值的时段平均水平，本文将流量区间按  $1000 \text{ m}^3/\text{s}$  的间隔进行等分，统计落入各流量区间内的数据个数及输沙率之和，得到单次流量对应的输沙率，点绘流量 - 输沙率关系见图 2。由图可见，在中小流量下，点据遵循良好的幂函数关系，输沙能力与流量的高次方正相关，随流量的增加先缓慢增长再迅速增加，至某一高水临界流量  $Q_c$  后，水流上滩，点据逐渐分散(图 2(a)~图 2(d))或出现下降趋势(图 2(e)~图 2(f))，表明输沙能力下降或随来水洪枯差异出现波动。用幂函数拟合  $Q_c$  以下点据即得到时段平均的流量 - 输沙率关系曲线和相应的  $b$  值，进而采用马卡维耶夫法计算各站造床流量，结果见表 1。

**Table 1.** Results of the characteristic discharges at each hydrometric station before and after the construction of TGR

**表 1.** 蓄水前后各水文站特征流量计算结果

特征流量	时段	宜昌站	枝城站	沙市站	监利站	螺山站	汉口站
$Q_f$	蓄水前	32,000	34,500	28,500	21,500	35,000	37,500
	蓄水后	28,500	28,500	22,000	16,500	31,000	34,500
$Q_e$	蓄水前	32,500	35,500	29,000	17,500	34,500	37,500
	蓄水后	38,500	41,500	33,000	23,000	32,000	37,000
$Q_e^*$	蓄水前	33,500	33,000	28,500	19,500	34,500	40,000
	蓄水后	44,000	41,500	35,000	26,500	31,000	33,000
$Q_b$	蓄水前	44,500	39,500	39,000	33,900	41,500	48,000
	蓄水后	42,500	37,000	33,000	33,500	41,500	51,500
$Q_{bc}$	蓄水前	40,200	38,900	32,000	28,000	43,800	57,000
	蓄水后	40,000	38,500	31,500	33,000	40,600	52,500

注： $Q_f$  表示造床流量； $Q_e$  表示输沙量法计算的有效流量； $Q_e^*$  表示理论公式法计算的有效流量； $Q_b$  表示河段平均平滩流量； $Q_{bc}$  表示典型断面平滩流量。

### 3.2. 有效流量

#### 3.2.1. 理论公式法

根据 Woloman 和 Miller 的设想，流量过程一般遵循某一概率密度分布，流量 - 输沙率关系可用幂函数近似表示，则流量 - 流量频率与输沙率乘积的关系即为有效流量曲线，有效流量曲线最高点对应的流量为有效流量，用符号  $Q_e$  表示。Nash 在进一步假设流量过程遵循对数正态分布后，给出了上述关系的理论表达式：

$$f(Q) = \frac{1}{Q\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(\ln Q - \mu)^2}{2\sigma^2}\right] \tag{1}$$

$$Q_s = aQ^b \tag{2}$$

$$Eft = f(Q) \times Q_s = \frac{aQ^{b-1}}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(\ln Q - \mu)^2}{2\sigma^2}\right] \tag{3}$$

式中， $Q$  为流量( $\text{m}^3/\text{s}$ )； $Q_s$  为输沙率( $\text{kg}/\text{s}$ )； $f(Q)$  为概率密度函数； $\mu$ 、 $\sigma$  分别为概率分布的期望和标准差； $a$ 、 $b$  为流量 - 输沙率关系经验系数，其确定方法同 2.1 小节； $Eft$  表示流量输沙有效性，即有效流量曲线的纵坐标。由  $\partial Eft / \partial Q = 0$ ，可推得  $Q_e$  理论值  $Q_e^*$  为：

$$Q_e^* = \exp\left[\mu + (b-1)\sigma^2\right] \tag{4}$$

由于长江中游各站流量频率分布难以用式(1)中假设的对数正态分布进行描述, 本文以各站枯水流量为分割点, 对流量概率密度进行分段拟合。其中小于分割流量的基流部分用下方所示的高斯函数拟合, 大于分割流量的部分则用指数函数或逻辑斯蒂函数拟合, 拟合结果如图3所示。

$$f(Q) = \frac{A_0}{w\sqrt{2\pi}} \exp\left[-2\left(\frac{Q-x_c}{w}\right)^2\right] \quad (5)$$

$$f(Q) = \frac{A_2}{1+(Q/x_0)^p} \quad (6)$$

$$f(Q) = \frac{A_2}{1+(Q/x_0)^p} \quad (7)$$

上述各式中,  $A_0$ 、 $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_c$ 、 $x_0$ 、 $w$  和  $t$  均为拟合参数; 其余符号意义同前。

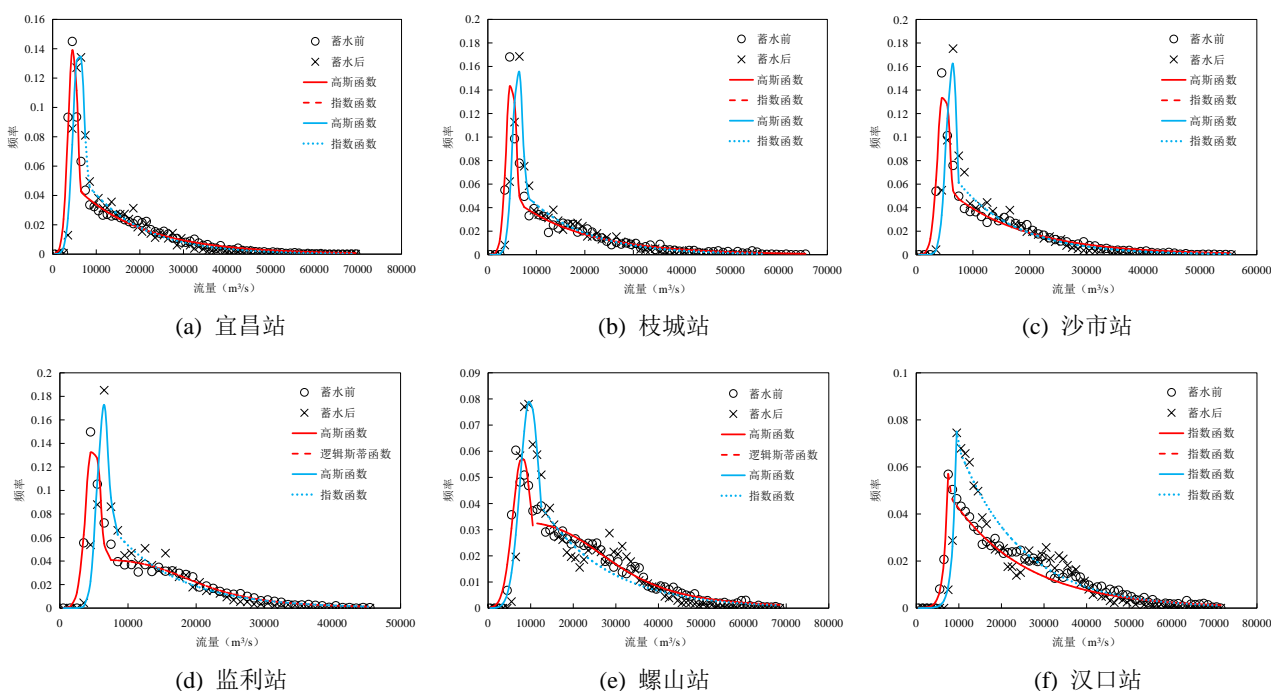


Figure 3. Fitting curves of the flow discharge frequency distribution at each hydrometric station  
图3. 各主要水文站流量频率分布拟合曲线

将式(5)、(6)、(7)分别与式(2)相乘后求极值, 即可得到不同拟合条件下的  $Q_e^*$  表达式:

$$Q_e^* = \frac{x_c + \sqrt{x_c^2 + bw^2}}{2} \quad (8)$$

$$Q_e^* = bt \quad (9)$$

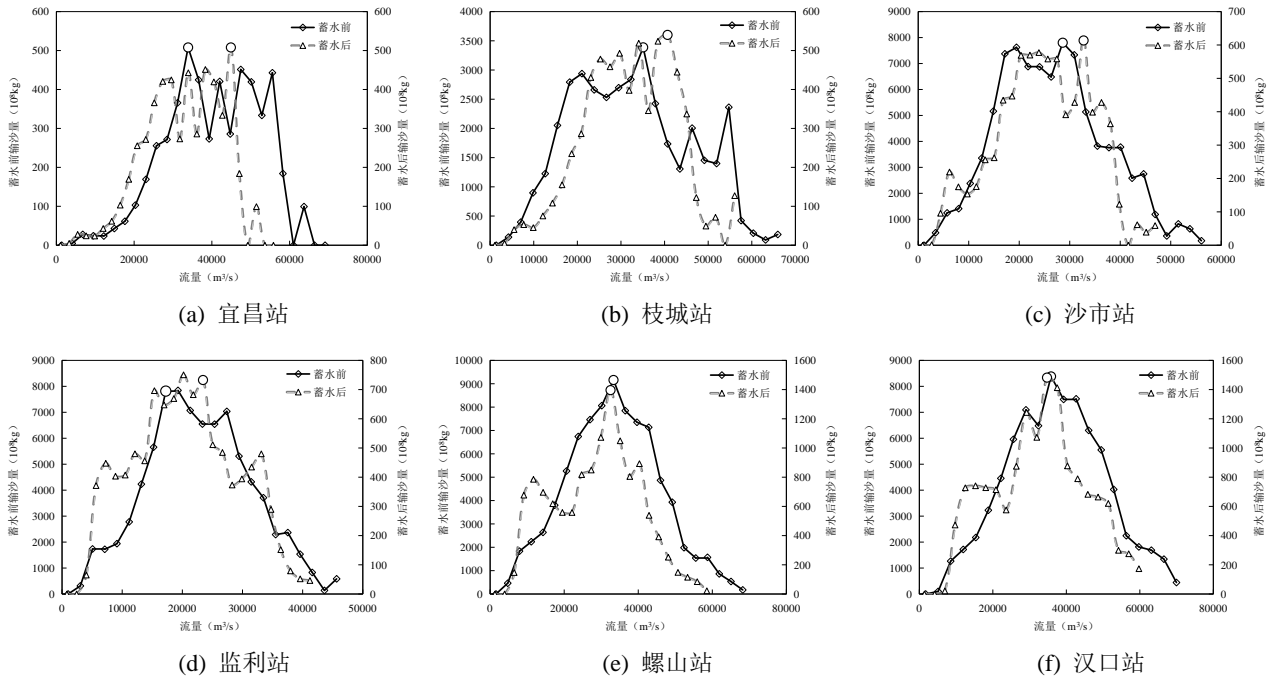
$$Q_e^* = x_0 \left(\frac{b}{p-b}\right)^{1/p} \quad (10)$$

将拟合参数代入式(8)~式(10)计算  $Q_e^*$ 。分析可知, 式(8)计算得到的  $Q_e^*$  为  $5280 \text{ m}^3/\text{s} \sim 9200 \text{ m}^3/\text{s}$ , 远小于各站多年平均流量, 属于河道基流部分, 不具备显著的输沙有效性。因此,  $Q_e^*$  值应由式(9)和式(10)计算得到, 结果

见表 1。

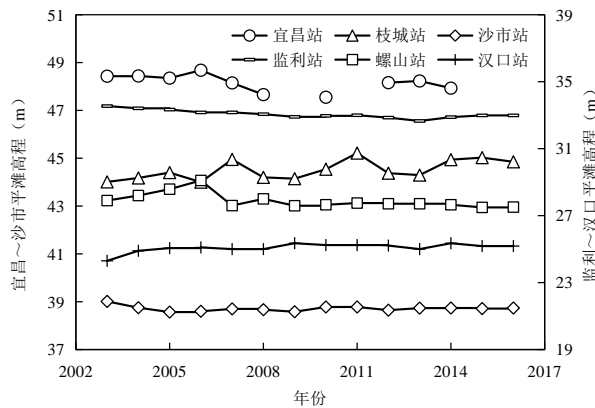
### 3.2.2. 输沙量法

输沙量法计算有效流量的过程与马卡维耶夫法类似，即基于实测的流量、输沙率数据，将流量序列分割为若干间隔相等的流量级，统计落入每一流量级内的输沙总量，绘制各流量区间平均值与该流量级输沙总量的关系曲线，确定输沙量最大值对应的流量为有效流量(结果见图 4 和表 1)。



**Figure 4.** Calculation curves of effective discharge at each hydrometric station before and after the construction of TGR  
**图 4.** 三峡水库蓄水前后各站有效流量计算曲线

对比  $Q_e^*$  与  $Q_e$  的计算结果可知，蓄水前两者的绝对偏差为 0~2500  $m^3/s$ ，蓄水后为 0~4000  $m^3/s$ ，总体而言，理论公式法与输沙量法计算的有效流量较为接近，说明结果可靠。考虑到理论公式法受拟合参数的影响较大，在后文与其它特征流量对比分析时，选用输沙量法计算值  $Q_e$  作为有效流量代表值。



**Figure 5.** Bank-full stage variations at typical cross sections after the construction of TGR  
**图 5.** 三峡水库蓄水后典型断面平滩高程变化

### 3.3. 平滩流量

选取各水文站附近洲滩发育较完整的典型断面，绘制 2003~2016 年横断面图并从中读取平滩高程，结果见图 5。拟合各站 2003~2016 年的水位 - 流量关系，从中读取与蓄水后平均平滩高程相应的流量即为蓄水后的典型断面平滩流量  $Q_{bc}$ 。考虑到蓄水前典型断面资料较为匮乏、平滩高程的变化过程难以确定，蓄水前的断面平滩流量根据各站蓄水前的平滩高程和蓄水前的流量 - 水位关系进行确定，结果见表 1。

比较断面平滩流量  $Q_{bc}$  和 2.1 节由时段平均流量 - 输沙率关系得到的临界流量  $Q_c$  可知(图 6)，两者较均匀地分布于直线  $y = x$  两侧，且蓄水后的  $Q_c$  和  $Q_{bc}$  十分接近，说明具有输沙临界特性的  $Q_c$  可近似反映河段平均平滩流量。考虑到蓄水前断面平滩流量是基于平滩高程不变的假设推求得到，在后文与其它特征流量对比分析时，选用由各站蓄水前后流量 - 输沙率关系推求得到的  $Q_c$  作为平滩流量  $Q_b$  代表值(见表 1)。

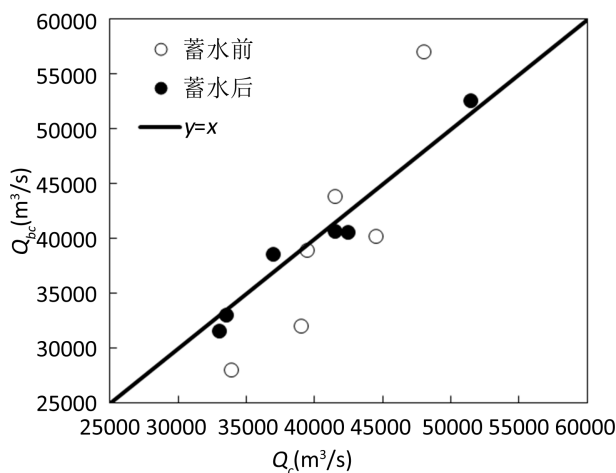


Figure 6. Comparison of the bank-full discharges at typical cross sections and critical discharges before and after the construction of TGR

图 6. 三峡水库蓄水前后典型断面平滩流量  $Q_{bc}$  与临界流量  $Q_c$  对比

## 4. 特征流量变化特性对比分析

### 4.1. 特征流量时空变化特性

从各特征流量沿程变化来看，宜昌至监利段  $Q_f$ 、 $Q_e$  和  $Q_b$  总体呈减小的趋势，至监利达到最小，再往下游从螺山至汉口段，又逐渐增加。三峡水库蓄水后，不同特征流量的调整趋势有所差异，具体表现为：各站  $Q_f$  一致性减小，减幅为 8%~23%； $Q_e$ 、 $Q_b$  则在以城陵矶为界的上、下游河段呈现不同的变化规律，在城陵矶以上河段， $Q_e$  在蓄水后增加 14%~31%， $Q_b$  在蓄水后减小 1%~15%，在城陵矶下游， $Q_e$  表现为减小， $Q_b$  不变或增加。总体而言，在蓄水前河床冲淤相对平衡的状态下， $Q_f$  和  $Q_e$  取值较为接近；但随着蓄水后上游来水来沙过程和河床冲淤调整特性的改变，不同特征流量呈现差异性变化趋势，导致三者之间的差异有所增加。

从概念上来看，造床流量是河道范围内造床作用最强、河床变形最剧烈的流量，在蓄水后河道冲淤总体向枯水河槽发展、中枯水来水频率显著增加的情况下，河道内冲淤调整最剧烈的部位逐步向低水位河道范围转移 [17]，因此，造床流量受来水过程变化和河床冲淤部位调整的影响，总体呈减小的趋势。平滩流量直接决定于平滩高程和水位 - 流量关系，在蓄水后各站平滩高程变化均较小的情况下，由河床冲淤调整、河道阻力变化导致的水位 - 流量关系变化是平滩流量改变的主要原因。城陵矶以上河段受河道综合阻力增加的影响，平滩流量有所减小；螺山站平滩高程与水位 - 流量关系均变化不大，平滩流量无明显改变；汉口站受平滩高程增加的影响，



平滩流量在蓄水后略有增加。有效流量受悬沙粗化与床沙补给过程影响较大，不同粒径泥沙不饱和度的差异直接影响输沙量在流量间的分配，沿程各站输沙不饱和程度与流量频率的不同导致了蓄水后有效流量的差异性变化。设同一流量下蓄水前与蓄水后平均输沙率分别为  $q_{s1}$  和  $q_{s2}$ ，则蓄水后各流量级平均输沙不饱和度  $US$  可定义如下：

$$US = \frac{q_{s1} - q_{s2}}{q_{s1}} \times 100\% \quad (11)$$

分析各站蓄水后  $US$  的变化情况可知(图 7)，虽然城陵矶以上河段的中枯水流量频率在蓄水后有所增加，但频率增加的流量范围(图 7 中加粗折线)正好位于不饱和度最大的流量区间，中小流量累计输沙量反而不及场次较少的洪水流量，有效流量由此增加；而在城陵矶以下的螺山及汉口站，由于床沙级配变化较小，中枯水流量输沙能力与洪水流量差别较小，频率增加后的中枯水流量累计输沙量占比增加，因此，有效流量在蓄水后有所减小。

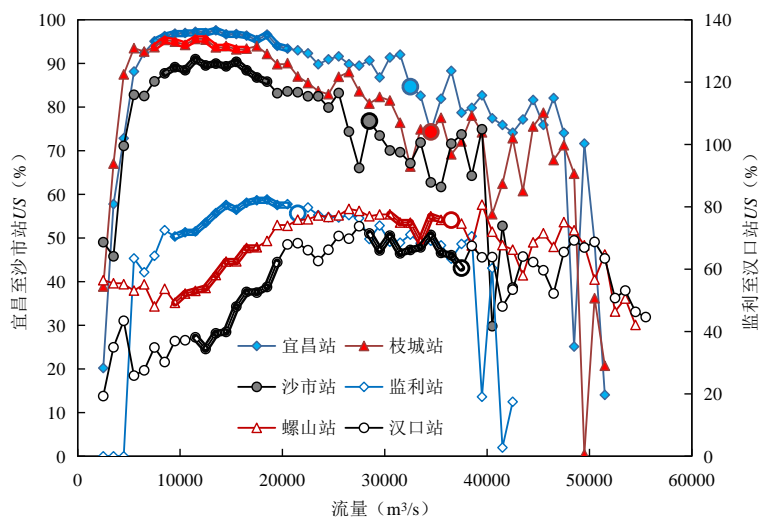


Figure 7. Variations in the parameter  $US$  with flow discharge at each hydro-metric station after the construction of TGR

图 7. 三峡水库蓄水后各水文站  $US$  随流量的变化

## 4.2. 特征流量变化统计特性

### 4.2.1. 水沙输移变化统计特性

统计蓄水前后不同特征流量所对应的累计水沙输移占比，结果见表 2。比较可知，沿程各站造床流量累计径流占比均在 60% 以上，且蓄水前后变化较小，变化幅度为 -6.3%~4.3%；蓄水后累计输沙占比受各流量级输沙不饱和度的影响，变化较大，在城陵矶以上河段造床流量累计输沙占比由蓄水前的接近或大于 50% 减小至小于 40%，城陵矶以下河段则变化较小。可见，根据上游来水来沙条件的不同，造床流量累计输沙占比发生较大变化，但造床流量累计径流占比则在较小范围内变化，可作为估算造床流量的经验性依据。

相较于造床流量，有效流量与平滩流量对应的累计径流占比在蓄水后的变化更为明显，均表现为一致性增加：其中，平滩流量累计径流占比在蓄水后均大于 92%，有效流量累计径流占比在蓄水后均大于 71%。平滩流量累计输沙占比在蓄水后变化 -10%~12.2%，宜昌 - 沙市输沙占比减小、监利 - 汉口输沙占比增加；有效流量累计输沙占比在蓄水后一致增加，除螺山站变化较小外，其余各站输沙占比增量均大于 10%。

总的来说，蓄水前有效流量与造床流量较为接近，相应的累计水沙输移占比也大致相同；蓄水后有效流量与造床流量差异增大，造床流量累计径流占比变化较小、城陵矶以上河段累计输沙占比减小至 40% 以下，而有效流量累

计径流占比和累计输沙占比均明显增加，在蓄水后分别大于 75%和 40%。平滩流量累计径流占比和累计输沙占比均为三者最大，各站蓄水后累计径流占比均增至 92%以上，累计输沙占比有增有减，但总体仍保持在 66%以上。

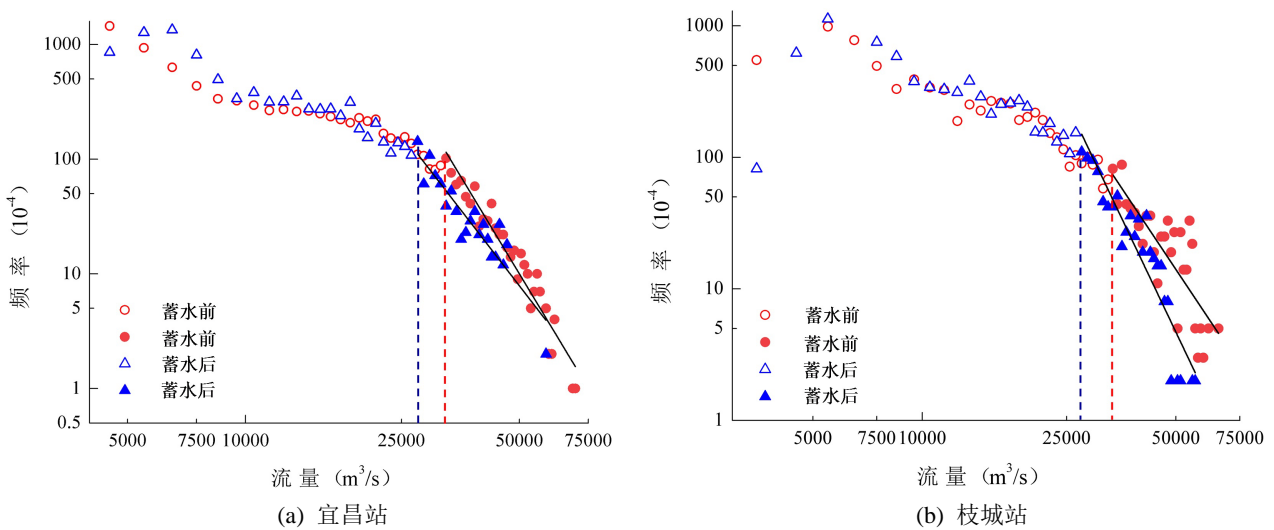
**Table 2.** Accumulative percentages of flow and sediment runoff, and accumulative flow frequencies corresponding to the characteristic discharges at each hydrometric station before and after the construction of TGR

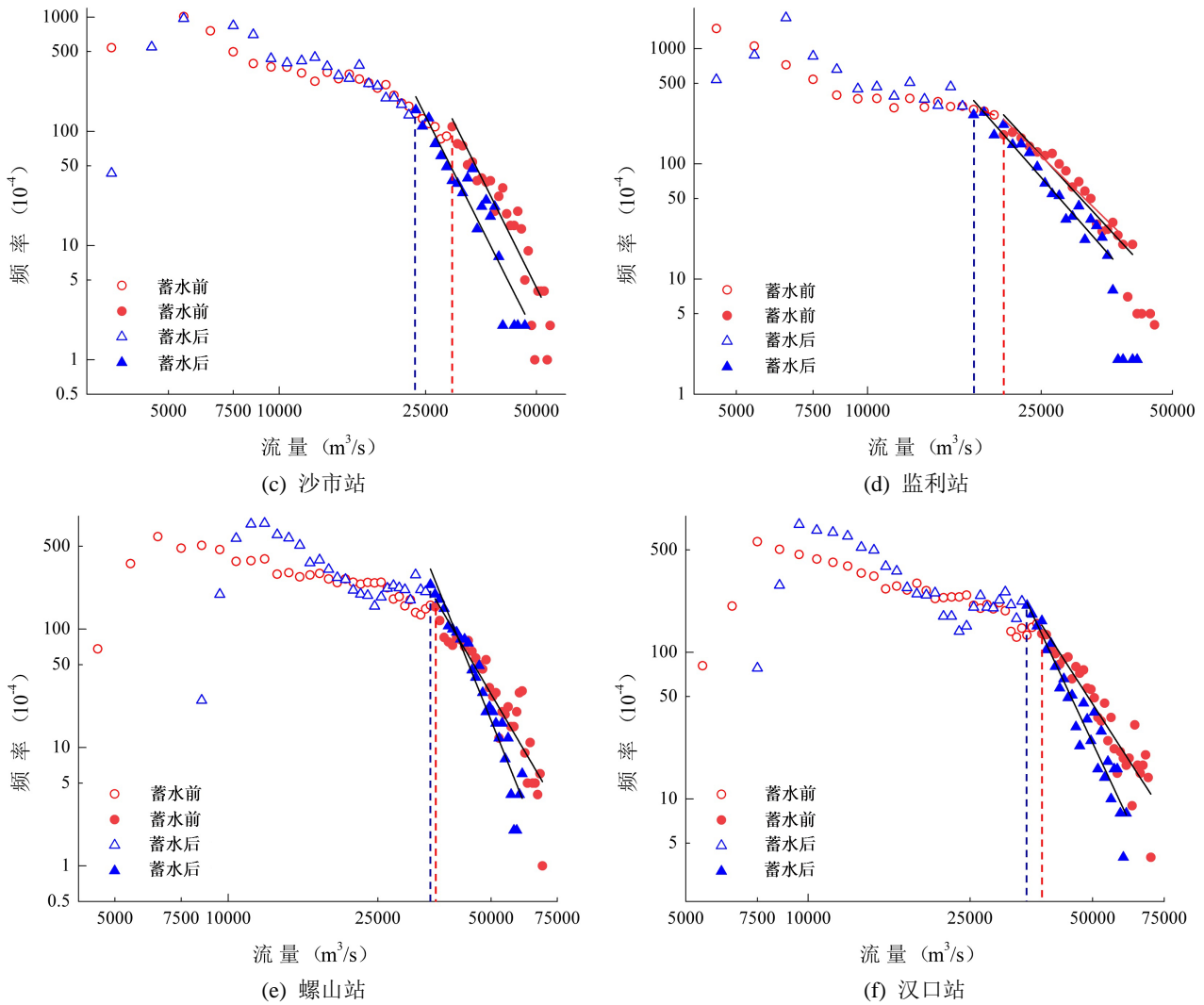
**表 2.** 蓄水前后各水文站特征流量累计径流量占比、累计输沙量占比和累计流量频率

测站	时段	累计径流量占比(%)			累计输沙量占比(%)			累计流量频率		
		$Q_f$	$Q_e$	$Q_b$	$Q_f$	$Q_e$	$Q_b$	$Q_f$	$Q_e$	$Q_b$
宜昌	蓄水前	78.90	79.91	94.03	55.37	57.04	85.00	0.939	0.932	0.983
	蓄水后	82.57	94.27	97.08	34.83	67.77	81.97	0.936	0.983	0.992
枝城	蓄水前	80.03	81.69	86.20	60.23	63.51	71.34	0.938	0.940	0.960
	蓄水后	82.46	96.31	92.70	39.58	84.08	66.03	0.937	0.991	0.978
沙市	蓄水前	80.45	81.68	94.48	63.35	63.35	87.29	0.941	0.932	0.984
	蓄水后	77.46	91.79	95.71	41.08	77.29	77.29	0.938	0.986	0.986
监利	蓄水前	69.65	57.85	94.96	47.61	30.66	90.46	0.875	0.783	0.983
	蓄水后	63.35	85.96	98.15	36.08	65.08	93.54	0.874	0.942	0.994
螺山	蓄水前	71.50	70.32	82.36	58.80	57.13	76.08	0.879	0.868	0.928
	蓄水后	71.18	74.56	93.79	56.30	60.80	88.25	0.876	0.881	0.975
汉口	蓄水前	69.66	69.66	86.50	53.80	53.80	80.92	0.861	0.856	0.944
	蓄水后	73.94	81.01	97.08	56.48	66.11	86.32	0.861	0.913	0.972

#### 4.2.2. 流量频率分布特性

蓄水前、后各水文站流量频率分布见图 8，各特征流量累计流量频率统计结果见表 2。可以看出，尽管沿程各水文站有效流量与平滩流量在蓄水后有增有减，但其累计流量频率均表现为增加，即超过有效流量与平滩流量的总流量历时占比一致减小，蓄水前超过有效流量与平滩流量的总流量历时占比分别为 6.0%~21.7% (21.9~79.2 d/yr)与 1.6%~7.2% (5.8~26.3 d/yr)，蓄水后则为 0.9%~11.9% (3.3~43.4 d/yr)与 0.7%~2.8% (2.4~10.2 d/yr)，说明蓄水后大于有效流量与平滩流量的流量出现机率有所减小。





**Figure 8.** Flow frequency distribution at each hydrometric station before and after the construction of TGR  
**图 8.** 各水文站蓄水前后流量频率分布

宜昌 - 沙市站造床流量累计流量频率平均约为 0.94、监利 - 汉口平均约为 0.87，造床流量累计流量频率在蓄水前、后的变化较小、不超过 0.003；蓄水前、蓄水后大于造床流量的总流量历时占比分别为 5.9%~13.9% (21.5~50.7 d/yr)与 6.2%~13.9% (22.6~50.7 d/yr)，说明在长时间尺度的造床过程中，造床流量累计流量频率在较小范围内变化，尽管河床发生了剧烈的冲淤调整，但造床流量与流量过程之间始终保持着较稳定的相关关系。图 8 中虚线标记的拐点所对应的流量与表 1 中计算的造床流量十分接近，进一步证明了流量过程和流量频率分布对造床流量的影响较大，根据流量频率分布曲线可较准确地估算造床流量。

#### 4.2.3. 特征流量与 1.5 年重现期流量的关系

国外较多研究认为有效流量与平滩流量大致相等，并平均每隔 1~2 年出现一次，即有着 1~2 年的流量重现期[5] [8] [18]。本文经计算证明，长江中游平滩流量一般大于有效流量和造床流量，出现频率更小，重现期更大。基于实测年最大值流量序列，采用威布尔公式[19]计算各站洪峰流量重现期，并用对数正态分布函数拟合，结果见图 9，进一步根据重现期拟合曲线反推 1.5 年和 2 年重现期相应的流量(分别用  $Q_{1.5}$  和  $Q_{2.0}$  表示)。蓄水前、后  $Q_b$  与  $Q_{1.5}$ 、 $Q_{2.0}$  关系如图 10 所示，由图可见， $Q_{2.0}$  总体上位于直线  $y = x$  上方， $Q_{1.5}$  则较均匀分布在直线  $y = x$  两

侧, 相对误差不超过 10%, 说明长江中游平滩流量与 1.5 年重现期流量较为接近, 在河道地形变化与水位 - 流量关系难以确定的情况下, 可由洪峰序列近似推求平滩流量。

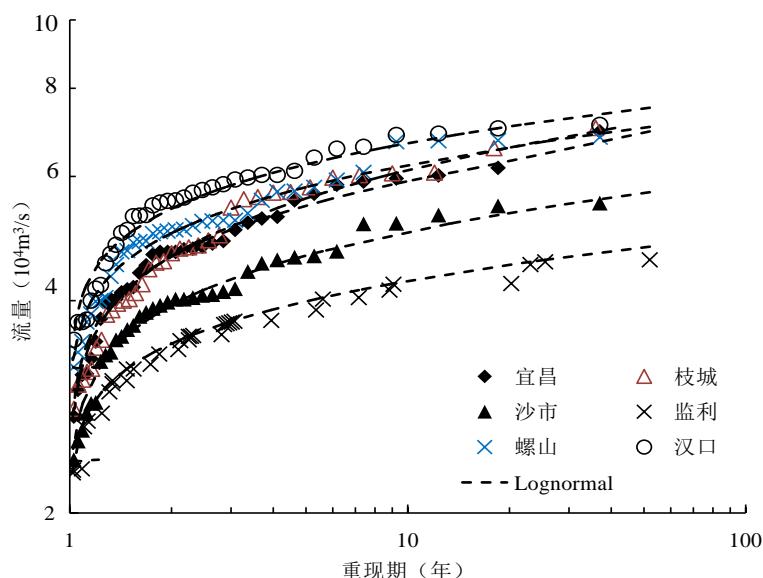


Figure 9. Empirical distributions and fitting curves of the flow recurrence period at each hydrometric station

图 9. 各水文站流量重现期经验分布与拟合曲线

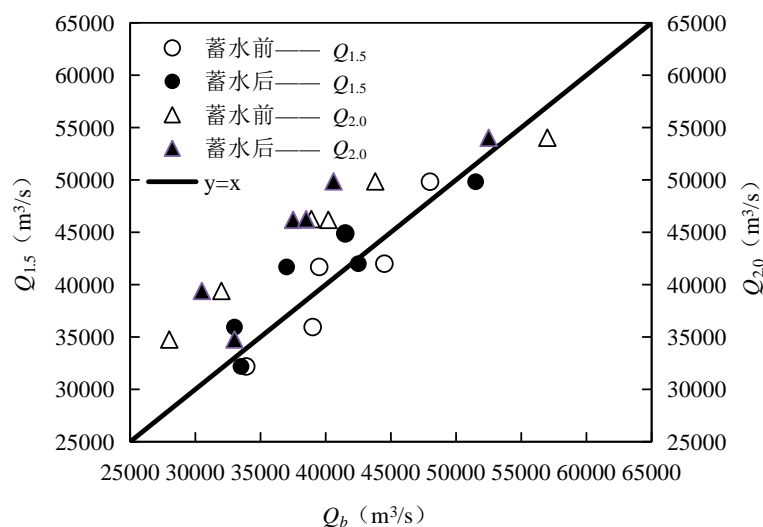


Figure 10. Comparison of bankfull discharge  $Q_b$  with the 1.5-year recurrence period discharge  $Q_{1.5}$  and 2-year recurrence period discharge  $Q_{2.0}$

图 10. 平滩流量  $Q_b$  与  $Q_{1.5}$ 、 $Q_{2.0}$  对比

## 5. 结论

1) 长江中游造床流量、有效流量和平滩流量在三峡运用后的变化趋势不尽相同。蓄水后各水文站造床流量一致减小 8%~23%，有效流量与平滩流量变化呈现明显的空间分异性：城陵矶以上河段床沙粗化程度高、细沙输沙不饱和程度大，有效流量增加 14%~31%；城陵矶以下河段细沙输沙不饱和度相对较低，中枯水流量频率增加导致有效流量减小。蓄水后各水文站典型断面的平滩高程变化较小，宜昌至监利站因河道综合阻力增加，平

滩流量有所减小；螺山站平滩流量未发生改变、汉口站平滩流量略有增加。

2) 三峡蓄水前后造床流量累计径流占比均在 60% 以上，城陵矶以上河段造床流量累计输沙占比由蓄水前的 50% 以上减小至 40% 以下；蓄水后各水文站有效流量累计径流占比、累计输沙占比和平滩流量累计径流占比均一致增加；宜昌至沙市站平滩流量累计输沙占比减小，监利至汉口站平滩流量累计输沙占比增大。

3) 三峡蓄水后，造床流量累计流量频率未发生明显变化，可根据对数坐标下的流量频率分布，近似估算造床流量；有效流量和平滩流量累计流量频率在蓄水后一致增加；平滩流量与 1.5 年重现期流量大致相当。

## 参考文献

- [1] 代双亮, 韩剑桥, 曹绮欣, 李聪. 渭河干流下游造床流量与有效流量的时空变化特征[J]. 水土保持研究, 2020, 27(6): 94-99.  
DAI Shuangliang, HAN Jianqiao, CAO Qixin and LI Cong. Spatial and temporal distribution of dominant discharge and effective discharge in the lower reaches of Weihe River. *Research of Soil and Water Conservation*, 2020, 27(6): 94-99. (in Chinese)
- [2] 杨云平, 李明, 刘万利, 朱玉德, 杨丽洁, 余文钧. 长江荆江河段滩槽演变与航道水深资源提升关系[J]. 水科学进展, 2022, 33(2): 240-252.  
YANG Yunping, LI Ming, LIU Wanli, ZHU Yude, YANG Lijie and YU Wenjun. Study on the relationship between beach trough evolution and navigation obstruction characteristics in Jingjiang reach of the Yangtze River. *Advances in Water Science*, 2022, 33(2): 240-252. (in Chinese)
- [3] 张为, 吴美琴, 李思璇, 袁晶, 高宇. 三峡水库蓄水后城陵矶至九江段河道冲淤调整机理[J]. 水科学进展, 2020, 31(2): 162-171.  
ZHANG Wei, WU Meiqin, LI Sixuan, YUAN Jing and GAO Yu. Mechanism of adjustment of scouring and silting of Chenglingji-Jiujiang reach in the middle reaches of the Yangtze River after impoundment of the Three Gorges Dam. *Advances in Water Science*, 2020, 31(2): 162-171. (in Chinese)
- [4] 韩剑桥. 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[D]: [博士学位论文]. 武汉: 武汉大学, 2015.  
HAN Jianqiao. The interaction mechanism between longitudinal water and sediment transport and channel morphology in the downstream of Three Gorges Reservoir. Doctor's Thesis, Wuhan: Wuhan University, 2015. (in Chinese)
- [5] WOLMAN, M. G., MILLER, J. P. Magnitude and frequency of forces in geomorphic process. *The Journal of Geology*, 1960, 68(1): 54-74. <https://doi.org/10.1086/626637>
- [6] NASH, D. B. Effective sediment-transporting discharge from magnitude-frequency analysis. *The Journal of Geology*, 1994, 102(1): 79-95. <https://doi.org/10.1086/629649>
- [7] ASHMORE, P. E., DAY, T. J. Effective discharge for sediment transport in streams of the Saskatchewan River Basin. *Water Resources Research*, 1988, 24(6): 864-870. <https://doi.org/10.1029/WR024i006p00864>
- [8] MA, Y., HUANG, H. Q., XU, J., BRIERLEY, G. J. and YAO, Z. Variability of effective discharge for suspended sediment transport in a large semi-arid river basin. *Journal of Hydrology*, 2010, 388(3-4): 357-369. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.05.014>
- [9] 陈建国, 胡春宏, 董占地, 刘大滨. 黄河下游河道平滩流量与造床流量的变化过程研究[J]. 泥沙研究, 2006(5): 10-16.  
CHEN Jianguo, HU Chunhong, DONG Zhandi and LIU Dabin. Change of bank-full and bed-forming discharges in the lower Yellow River. *Journal of Sediment Research*, 2006(5): 10-16. (in Chinese)
- [10] 张红武, 张清, 江恩惠. 黄河下游河道造床流量的计算方法[J]. 泥沙研究, 1994(4): 50-55.  
ZHANG Hongwu, ZHANG Qing and JIANG Enhui. Calculation of dominated discharge in the lower Yellow River. *Journal of Sediment Research*, 1994(4): 50-55. (in Chinese)
- [11] WILLIAMS, G. P. Bank-full discharge of rivers. *Water Resources Research*, 1978, 14(6): 1141-1154. <https://doi.org/10.1029/WR014i006p01141>
- [12] 夏军强, 吴保生, 王艳平, 李文文. 黄河下游河段平滩流量计算及变化过程分析[J]. 泥沙研究, 2010(2): 6-14.  
XIA Junqiang, WU Baosheng, WANG Yanping and LI Wenwen. Estimating the bank-full discharge in the lower Yellow River and analysis of its variation processes. *Journal of Sediment Research*, 2010(2): 6-14. (in Chinese)
- [13] 闫金波, 唐庆霞, 邹涛. 三峡坝下游河道造床流量与水流挟沙力的变化[J]. 长江科学院院报, 2014, 31(2): 114-118.  
YAN Jinbo, TANG Qingxia and ZOU Tao. Variation of dominant discharge and sediment-carrying capacity of flow in the downstream of Three Gorges Reservoir. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2014, 31(2): 114-118. (in Chinese)
- [14] 孙昭华, 周炜兴, 周坤, 周歆玥, 陈立, 李义天. 江湖水沙输移与长江中下游造床流量的关系[J]. 水利学报, 2021, 52(5): 521-534.

- SUN Zhaohua, ZHOU Weixing, ZHOU Kun, ZHOU Xinyue, CHEN Li and LI Yitian. Relationship between the characteristics of water-sediment transportation in river-lake system and the channel forming discharge of the middle and lower Yangtze River. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2021, 52(5): 521-534. (in Chinese)
- [15] 张为, 高宇, 许全喜, 袁晶. 三峡水库运用后长江中下游造床流量变化及其影响因素[J]. *水科学进展*, 2018, 29(3): 331-338.  
ZHANG Wei, GAO Yu, XU Quanxi and YUAN Jing. Changes in dominant discharge and their influential factors in the middle and lower reaches of Yangtze River after the Three Gorges Dam impoundment. *Advances in Water Science*, 2018, 29(3): 331-338. (in Chinese)
- [16] XIA, J., ZHOU, M., LIN, F., DENG, S. and LU, J. Variation in reach-scale bankfull discharge of the Jingjiang Reach undergoing upstream and downstream boundary controls. *Journal of Hydrology*, 2017, 547: 534-543.  
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.02.026>
- [17] CHEN, F., CHEN, L., ZHANG, W., HAN, J. Q., WANG, J. Z. and YUAN, J. Responses of channel morphology to flow-sediment variations after dam construction: A case study of the Shashi Reach, middle Yangtze River. *Hydrology Research*, 2019, 50(5): 1359-1375. <https://doi.org/10.2166/nh.2019.066>
- [18] LENZI, M. A., MAO, L. and COMITI, F. Effective discharge for sediment transport in a mountain river: Computational approaches and geomorphic effectiveness. *Journal of Hydrology*, 2006, 326: 257-276.  
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.10.031>
- [19] SINGH, B., RAJPOUROHT, D., VASISHTH, A. and SINGH, J. Probability analysis for estimation of annual one day maximum rainfall of Jhalrapatan Area of Rajasthan. *Plant Arch*, 2012, 12(2): 1093-1100.