三峡工程蓄水后长江中游城陵矶—汉口河段过流能力变化及影响因素分析*

姚记卓¹, 夏军强^{1**}, 邓珊珊¹, 周美蓉¹, 许全喜²

(1: 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072)

(2: 长江水利委员会水文局, 武汉 430010)

摘要: 受上游水库运行的影响, 自 2003 年后长江中游河段河床调整, 引起河道自身过流能力的变化. 本文选取长江中游城陵矶—汉口河段作为研究对象, 根据实测资料计算了 2003—2016 年两个水文断面的水位—流量关系及特征流量变化, 并采用一维水动力学模型计算了河段尺度的平滩流量. 结果表明: (1) 螺山站及汉口站 2003—2016 年的水位—流量关系呈现枯水流量下水位降低、洪水流量下水位抬升的特点; (2) 两站年最大流量下对应的水位整体抬升, 警戒水位下对应的流量分别减小 9% 和 16%; (3) 2003—2016 年城汉河段平滩流量有增有减, 无明显单向变化趋势, 2014 年后呈减小趋势. 分析断面的过流能力变化, 发现螺山站与汉口站警戒流量与动床阻力呈明显的反比关系, 过流能力由于河道阻力的增大而减小; 床沙粗化、河道相对水深的减小及洲滩植被覆盖度的增大是引起河道阻力增大、过流能力减小的原因.

关键词: 过流能力; 河槽形态; 河道阻力; 城汉河段; 长江中游

Variation in flood-discharge capacity of Chenglingji-Hankou reach in the middle Yangtze River and analysis of influencing factors since the onset of the Three Gorges Reservoir*

Yao Jizhuo¹, Xia Junqiang^{1**}, Deng Shanshan¹, Zhou Meirong¹ & Xu Quanxi²

(1: *State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, P.R. China*)

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

Abstract: Since the onset of the Three Gorges Project (TGP) in 2003, the sediment load entering the middle Yangtze River (MYR) has been reduced sharply, leading to remarkable channel degradation, which greatly influenced the flood-discharge capacity of this reach. In order to have a better grasp on this situation, there is a need to investigate the variation in flood discharge capacity in this area. Therefore, Chenglingji-Hankou reach (CHR) of the MYR was chosen as a typical reach for this study. Based on the cross-section profiles and hydrologic data surveyed annually from 2003 to 2016, the variations in the relationship between discharge and water-level, the corresponding water-level under the maximum discharge annually, and the characteristics of discharges under certain stages were analyzed at Luoshan and Hankou Stations. The results show that: (i) water-level under the same discharge decreased in dry season and changed slightly in flood season; water-level under the annual maximum discharge increased compared with that from 1954 to 2002; (ii) the relative discharge under warning water-level at Luoshan and Hankou Stations decreased by 9% and 16%, respectively; (iii) There is no obvious trend in the temporal variation of reach-scale bankfull discharge. The influence factors of the variation in the section-scale flood-discharge capacity were analyzed. It was found that the discharges under the warning water level (at Luoshan and Hankou Stations) were negatively correlated with the bed roughness, which implies that the increase in river resistance is probably one of the main causes of the variation in discharge capacity. Besides, the decrease in relative water-depth ratio and the increase in vegetation coverage on central bars may also show obvious influences on the dis-

* 2020-05-07 收稿; 2020-08-28 收修改稿.

国家重点研发计划项目(2016YFC0402303)和国家自然科学基金项目(51725902, U2040215, 52009095)联合资助.

** 通信作者; E-mail: xiajq@whu.edu.cn.

charge capacity of the study reach.

Keywords: Flood-discharge capacity; channel geometry; river resistance; Chenglingji-Hankou reach; middle Yangtze River

近年来,随着三峡工程的运行及坝下游各类河道整治工程的实施,长江中游河段的水沙条件及河床边界条件发生显著变化,引起下游河床冲刷^[1-2]。在河床持续冲刷过程中,崩岸险情频发威胁堤防安全;中游河段的河槽蓄泄能力和过流能力相应调整,二者的变化将进一步影响到长江中游地区的防洪形势。考虑到城陵矶—汉口河段(以下简称“城汉河段”)在长江经济带建设中的重要战略地位,有必要研究由于近期河床调整所导致的城汉河段过流能力变化,为长江中下游的防洪安全提供技术参考。

三峡水库蓄水初期(2003—2008年),长江中游城汉河段虽总体微冲 $9.9 \times 10^6 \text{ m}^3$,但110 km长的城陵矶—嘉鱼段反而淤积0.66亿 m^3 ;随后该河段虽整体呈冲刷趋势,但实测数据表明城陵矶附近水位仍在抬高,进一步降低了河道的泄流能力^[3-4]。受历史洪水影响,长江中下游地区长期以来开展过大量的堤防加固工程及河道整治工程,形成了较为完整的堤防体系,但由于两岸平原地带通常低于汛期河道内高水位,一旦决堤将引发更大的洪水灾害^[5]。

现有研究多从河道冲淤变化^[6-8]、水位变化^[9-10]及洪水演进^[11]等方面描述河段的防洪能力变化特征,较少分析河道自身过流或泄流能力的变化。过流断面的形态及大小是决定河道泄流能力的重要参数。在非平衡状态下,冲积河流受到来水来沙条件变化的影响,河床形态将作出相应调整,重塑的河床又将进一步影响水流结构,这一影响表现为水位—流量关系的变化。在某一特征水位下的流量变化是衡量河道过流能力的重要指标^[12-13]。近年来,有关长江中游河床演变的研究表明^[6,14-15],受三峡水库运用的影响,长江中游河段普遍冲刷下切,整体呈现冲深展宽的趋势。但该河段的过流能力受以下几方面因素综合影响:(1)上游水库的调控作用;(2)河床普遍冲刷引起的河床调整;(3)床沙粗化、洲滩植被等原因引起的河道阻力变化。上述几方面因素在不同流量下对河道过流能力的影响程度各不相同,应当分别予以分析。

本研究基于城汉河段2003—2016年117个固定断面的实测地形资料及沿程重要水文站的水位—流量关系,采用一维水动力学模型确定各固定断面在不同特征流量下的河床形态参数,并计算了河段尺度的断面形态变化过程;从特征水位下的流量变化、水位—流量关系等方面分析河段过流能力的变化特点,同时利用实测资料及遥感影像资料,分析引起河道过流能力变化的影响因素。

1 研究河段概况

1.1 河道概况

城汉河段上起荆江与洞庭湖出口交汇处城陵矶,承接长江干流荆江来水及洞庭湖水系,下至长江中游重要城市武汉,全长约275 km(图1)。按照平面形态特征划分,城汉河段可划分为弯曲型和分汉型两种河型。河段沿程分布有南阳洲、铁板洲、天兴洲等洲滩。河道两岸沿江分布有较多低山节点。河段左岸有东荆河、沦水及长江最大支流汉江入汇,右岸有陆水、金水入汇;两岸均分布有湖泊。研究河段内有城陵矶、螺山、石矶头、汉口等水位站或水文站。

城汉河段干流两岸有洪湖干堤、四邑公堤、武汉市堤等重要堤防,堤防的堤顶高程一般在1954年最高水位以上1~2 m,以干砌石结构形式居多^[16]。干堤总长约为460.24 km,其中左岸239.4 km,右岸220.84 km(长江水利委员会水文局)。多年来城汉河段总体河势基本稳定,河道演变的主要特点为深泓摆动、主支汉交替及分流点的上提下移。近期城汉河段陆续实施了陆溪口水道、嘉鱼—燕子窝航道、界牌河段航道整治等工程,对河段整体水流结构产生了一定影响^[16-17]。

1.2 水沙条件

城汉河段的径流量和含沙量主要来自上游荆江来水、洞庭湖水系、汉江支流以及沿程其它支流,并随着湖泊与支流入汇沿程增大。河段汛期通常为5—10月,最大洪水一般出现在7月,沙量的年内分配与径流过程对应。2003年后,受长江上游来水来沙条件变化及三峡水库运用的影响,近期进入城汉河段的径流量与沙量出现不同程度的减小,年内分配更为均匀。本研究收集了城汉河段内螺山站1954—2016年的流量与含沙量数据,统计结果如图2所示。从图2中结果来看,与2003年前(1954—2002年)相比,该河段2003—2016

图 1 长江中游城陵矶—汉口河段示意图

Fig.1 Sketch maps of the middle Yangtze River and the Chenglingji-Hankou reach with the location of hydrometric stations

年的多年平均径流量从 6459 亿 m^3 减小为 6021 亿 m^3 , 减小幅度约为 7%; 城汉河段输沙量的变化则更为明显, 多年平均输沙量减小约 78%, 从 2003 年之前的 4.08 亿 t 降低至 0.89 亿 t (图 2a); 多年月平均径流量与输沙量曲线趋于坦化, 汛期径流量有所减小 (图 2b, c).

图 2 1954—2016 年螺山站径流量和输沙量变化特点

Fig.2 Temporal variations in runoff and sediment load at the Luoshan Station from 1954 to 2016

1.3 河床冲淤过程

受三峡水库蓄水拦沙的影响, 近期城汉河段整体呈现冲刷趋势. 根据长江水利委员会水文局的统计结果, 2003—2016 年, 城汉河段枯水河槽、基本河槽和平滩河槽总冲刷量分别约为 4.3 亿、4.5 亿和 4.2 亿 m^3 . 冲刷强度呈增强趋势, 如图 3a 所示. 通常定义枯水河槽与基本河槽之间为低滩, 基本河槽与平滩河槽之间为高滩. 图 3b 比较了 2003—2016 年城汉河段滩地冲淤量. 由图 3b 可知, 2003—2008 年河段有冲有淤, 整体表现出冲槽淤滩的特点; 2008 年后, 上游三峡工程进入试验性蓄水阶段, 进入城汉河段的含沙量进一步减

小,河槽冲刷加剧,低滩开始冲刷,高滩淤积减弱;2013年后,受上游梯级水库运行的影响,冲刷进一步加剧。

图3 城陵矶—汉口河段累计冲淤量(a)和滩地年际冲淤量(b)的变化

Fig.3 Cumulative (a) and interannual (b) volume of channel scour in the Chenglingji-Hankou reach

1.4 河槽形态调整过程

根据2003—2016年城汉河段实测地形资料,计算了2003—2016年城汉段河段尺度的平滩河槽形态参数,如图4所示。平滩河槽的确定采用夏军强等^[18]提出的确定原则。由图4可知,城汉河段平滩河槽呈现出冲深的趋势,平滩水深($\bar{H}_{bf}$)由2003年的16.47 m增大至17.85 m,增幅约8.4%;受两岸控制节点和护岸工程的影响,平滩河宽($\bar{B}_{bf}$)没有明显变化,仅增大2.0%;相应的平滩面积($\bar{A}_{bf}$)由28166 m²增大至31149 m²,增大10.6%。从变化趋势来看,2003—2013年 $\bar{A}_{bf}$ 增长较为缓慢,由28166 m²增加到29225 m²,仅变化3.8%;而在2013年后,由于上游金沙江等梯级电站相继运行,河槽冲刷加剧, $\bar{A}_{bf}$ 开始大幅增长,2013—2016年变化约6.6%。

图4 城陵矶—汉口河段平滩河槽形态的逐年变化

Fig.4 Temporal adjustments in reach-scale bankfull channel dimensions in the Chenglingji-Hankou reach

2 过流能力的计算方法

2.1 水文断面过流能力的确定

针对研究河段各水文断面,本文着重从水位—流量关系,最大流量下对应的水位值,警戒水位下的流量及平滩流量4个方面来分析其过流能力随时间的变化特点。其中水位—流量关系采用2003—2016年螺山站、汉口站的实测数据进行确定,当水位—流量关系曲线在坐标系中右移,即同水位下流量增加时,可以表明该河段过流能力有所增强,反之过流能力减小;最大流量下的水位值反映了河道每年面临最大洪水风险时的过流能力;警戒水位是指江河堤防可能出险的起始水位,该水位下的流量(警戒流量)通常是防洪设计的重点,警戒流量越大表明出现洪水的风险越低,河道过流能力越强;平滩流量是指水位平滩时对应的流量,通常可用于表示水流漫滩的起始流量,是衡量河道过流能力的重要指标,平滩流量越大表明过流能力越强。

2.2 河段尺度过流能力的确定

针对整个研究河段,本文采用河段尺度的平滩流量来表示其整体过流能力的变化特点,同时分析各断面过流能力的沿程变化(空间)及河段平均过流能力随时间的变化特点。

2.2.1 各断面平滩流量的计算方法 将某一断面主槽内水位与滩面齐平时的水位定义为平滩水位,该水位下对应的流量定义为该断面的平滩流量^[18]。以2003—2016年城汉河段的汛后地形作为河床边界条件,采用一维水动力学模型计算平滩流量。模型的主要控制方程为:

$$\frac{dQ}{dx} = q_1 \quad (1)$$

$$\frac{d}{dx} \left(\alpha_f \frac{Q^2}{A} \right) + g \cdot A \frac{dZ}{dx} + g \cdot A (J_f + J_1) = 0 \quad (2)$$

式中, Q 为流量, m^3/s ; q_i 为支流流量, m^3/s ; Z 为断面平均水位, m ; A 为断面过水面积, m^2 ; J_1 为断面扩大或收缩引起的局部能坡; J_f 为断面能坡; α_f 为动量修正系数; g 为重力加速度, m/s^2 ; x 为沿程距离, m . 以螺山站流量作为进口条件, 汉口站水位—流量关系作为出口条件, 通过调节水文站之间的糙率使计算水位—流量关系与实测值相吻合 (如图 5 所示, Z 为断面平滩水位, Q 为相应的平滩流量), 即可根据断面的平滩水位确定相应的平滩流量.

图 5 不同控制断面计算值与实测值的对比

Fig.5 Comparison between the simulated and observed rating curves at different sections

2.2.2 河段尺度平滩流量的计算方法 在计算河段尺度的平滩流量时, 采用 Xia 等^[19] 提出的河段平均方法, 计算河段平均的平滩流量, 可表示为:

$$\bar{Q}_{bf} = \exp \left(\frac{1}{2L} \sum_{i=1}^{N-1} (\ln(Q_{bf}^{i+1}) + \ln(Q_{bf}^i)) \cdot (x_{i+1} - x_i) \right) \quad (3)$$

式中, x_i 表示第 i 个断面距大坝的距离; N 为计算河段的断面总数; Q_{bf}^i 为断面尺度参数, $\bar{Q}_{bf}$ 为河段尺度参数.

3 近期城汉河段过流能力变化特点

过流能力是衡量河道防洪能力的重要指标之一^[20], 近期由于河床持续调整的影响, 长江中游城汉河段的过流能力相应变化, 故此着重分析了该河段各水文断面及河段尺度的河道过流能力变化特点.

3.1 水文断面过流能力变化特点

3.1.1 水位—流量关系 选取 2003、2010、2012 与 2014 年 4 个丰水年, 根据实测水位流量资料分别绘制螺山、汉口站枯水期与洪水期的水位—流量关系 (图 6). 洪水期河道过流受下游河段顶托作用影响, 故洪水期的水位—流量关系采用连时序法绘制的绳套曲线表示 (图 6a, b), 枯水期则采用拟合曲线表示 (如图 6c, d). 两站洪水期的水位—流量关系均表现为逆时针绳套曲线 (图 6a, b), 比较各年洪水过程可以看出, 螺山站与汉口站洪水过程相同流量下对应的水位均无明显的下降趋势, 与 2003 年涨洪过程相比, 2010 年螺山站 45000 m^3/s 流量下水位抬升 1.31 m, 2012 和 2014 年同流量下水位与 2003 年相比基本保持不变; 汉口站 2010 年 45000 m^3/s 流量下水位与 2003 年相比抬升 1.13 m, 2012、2014 年仅分别降低 0.06 和 0.19 m. 枯水期小流量下, 两站同流量下水位呈现减小趋势 (图 6c, d). 螺山站 2010、2012 和 2014 年 15000 m^3/s 流量下对应的水位较 2003 年分别下降 0.21、0.56、0.65 m; 汉口站则分别下降 0.59、0.80、1.07 m. 这一现象表明, 近年来城汉河段河床冲刷引起的河槽过流面积增大, 降低了枯水期同流量下的水位, 但对洪水过程中河道过流能力的影响并不明显; 除过流面积增大外, 洪水期水位—流量关系的变化还应受到其他因素的影响. 另外, 大流量高水位的变化趋势进一步增大了城汉河段的防洪压力, 对长江中下游防洪造成了不利影响.

3.1.2 警戒水位下的流量变化特点 螺山站与汉口站分别位于城汉河段上游 LSZH 断面及下游 HL13 断面, 其水位—流量关系的变化可以在一定程度上反映城汉河段整体过流. 两断面近年来受上游清水下泄的影响,

图6 城陵矶—汉口河段主要水文站水位—流量关系变化

Fig.6 Variation in the stage-discharge curves at hydrometric stations of Luoshan and Hankou Stations in the Chenglingji-Hankou reach

断面形态主要表现为冲刷下切,2003 与 2016 年断面形态变化如图 7a、b 所示. 螺山站与汉口站的警戒水位分别为 30.04 和 25.2 m(85 高程). 利用水位—流量关系即可确定两站相应警戒水位下的过流流量,结果如图 7c 所示. 由图 7c 可知,2003—2016 年城汉河段螺山站及汉口站警戒水位下的过流量分别减小 9% 和 16%. 警戒流量在两站的变化趋势基本一致,但在 2007 和 2011 年有所差异,这两个年份都属于枯水年与丰水年的交替年份,水沙条件较上一年变化较大,因此河道上下游对水沙条件的响应存在差异. 从警戒水位下流量的变化趋势看:(i)警戒流量随水沙条件的变化有增有减,当丰水年与枯水年交替时,警戒流量上升,当枯水年与丰水年交替时,警戒流量下降;(ii)两站所在断面的警戒流量整体呈下降趋势,且下游汉口站警戒流量的减小程度较上游螺山站更为显著. 该两站警戒流量的减小表明河床过流能力减小,不利于河道的防洪.

3.1.3 最大流量下水位的变化特点 图 8 统计了 1954—2016 年螺山和汉口站最大流量下对应的水位变化. 根据三峡水库的初步设计调度方式,每年汛期将按防洪限制水位 145 m 运行,下泄流量一般不超过 $55000 \text{ m}^3/\text{s}$. 受上游三峡水库调度的影响,近年来(2003—2016 年)城汉河段沿程水文站—螺山与汉口站最大流量均有所减小,2003 年后极少出现 $60000 \text{ m}^3/\text{s}$ 以上的特大流量.

洪水漫滩时,水位—流量关系的拟合线将不能准确描述河道的水位—流量关系,因此图 8 给出了螺山站与汉口站年实测最大流量下的水位变化,可以看出两站在最大流量下的水位—流量关系曲线左移,相同流量下对应的水位均有所抬升,且螺山站的左移现象更为明显. 螺山站水位在大流量级下整体抬高约 0.92 m,而汉口站水位抬升的幅度随流量的增大而减小, $50000 \text{ m}^3/\text{s}$ 以上流量下的水位基本与 2003 年之前保持一致.

图7 螺山站与汉口站警戒水位下的断面形态及流量变化:

(a) 螺山站断面形态; (b) 汉口站断面形态; (c) 螺山站与汉口站警戒流量

Fig.7 Variations in cross-sectional geometry and water discharge corresponding to the warning level;

(a) cross-sectional geometry at Luoshan Station; (b) cross-sectional geometry at Hankou Station;

(c) variations in discharge under the warning level at Luoshan and Hankou Stations

2016年汛期,螺山站流量超过 $43000 \text{ m}^3/\text{s}$,汉口站流量超过 $50000 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,两站水位均超出防洪警戒水位. 仅2016年7月,螺山站水位有18 d处于30 m以上,汉口站水位有23 d处于25 m以上,导致堤防长时间处于高水位浸泡中,出险几率增大,威胁到堤防安全.

图8 螺山站(a)与汉口站(b)最大流量下的水位变化

Fig.8 Variations in the stages under the annually maximum discharges at

Luoshan Station (a) and Hankou Station (b)

3.2 河段平滩流量的变化特点

螺山站与汉口站是城汉河段的重要水文站,其所在断面的过流能力变化能够在一定程度上反映河段整体的变化情况. 但为了避免断面沿程变化带来较大的影响,此处仍然采用一维水动力学模型及河段平均方法计算河段尺度的平滩流量,以此分析河段尺度的过流能力变化.

3.2.1 各断面平滩流量的沿程变化特点 采用2.1和2.2节所述方法计算了城汉河段117个固定断面的平滩面积和平滩流量,其中2016年的计算结果如图9所示. 由图9可知,2016年城汉河段平滩面积最大值(A_{Max})出现在CZ37断面,约为 67273 m^2 ;最小值(A_{Min})出现在CZ48-1断面,约为 18990 m^2 ;各断面平滩流量最大值(Q_{Max})约为 $60000 \text{ m}^3/\text{s}$;最小值(Q_{Min})约为 $28798 \text{ m}^3/\text{s}$,位于CZ37-1断面. 由图9可知,平滩流量与平滩面积沿程变化剧烈,但变化趋势并不完全一致:平滩流量的最大值与平面面积的最大值所在断面并不相同,说明平滩面积的变化对平滩流量的影响有限,大流量下的河道过流能力还受其他因素变化的影响.

3.2.2 河段尺度平滩流量随时间的变化特点 根据2003—2016年城汉河段117个固定断面汛后实测地形资料,采用式(3)计算得到河段尺度平滩流量,模型采用的拟合关系如图10a所示. 由图10b可知,城汉河段尺度的平滩流量没有明显的单向变化趋势;总体平均值约为 $45553 \text{ m}^3/\text{s}$,变化幅度为 $43663 \sim 47482 \text{ m}^3/\text{s}$. 不同

图9 2016年城陵矶—汉口河段各断面平滩流量与平滩面积的变化

Fig.9 Variations in the section-scale bankfull discharge and bankfull area in the Chenglingji-Hankou reach in 2016

时段内该河段平滩流量的变化规律有所区别,2003—2004年有所上升,2004—2005年下降,随后保持平稳至2007年后再次上升,2009—2011年先降后增,2014年后再次下降。

通过对比分析研究河段内典型水文/水位断面(螺山、石矾头与汉口站)的平滩流量变化趋势(图10b),可知:河段尺度平滩流量的变化趋势与这几个水文/水位断面的变化趋势总体上保持一致,但特定年份内有所区别(如2005年汉口站所在断面的平滩流量增加,而河段平均平滩流量则有所下降)。在2009—2010年内,研究河段平滩流量大幅度降低,较上一年降低了约9%,主要原因可能在于:2010年为丰水年,来流量大且洪水持续时间较长,流量大于 $30000 \text{ m}^3/\text{s}$ 的时间为109 d,远大于2009年的64 d和2011年的8 d。受洪水顶托作用,相同流量下的水位大幅抬升,因此平滩水位下的流量相应降低。此外,汉口站由于受到汉江入汇的影响,平滩流量较其余断面及河段平均较大。

图10 平滩流量计算:(a) 汉口站水位—流量关系拟合;(b) 平滩流量计算结果的时间变化

Fig.10 Calculations of bankfull discharge: (a) simulated and observed rating curves at Hankou Station; (b) temporal variations in calculated bankfull discharges at different sections

4 河道过流能力的影响因素分析

三峡水库蓄水后,城汉河段河床发生明显调整,床面比降先增后减,床沙粗化且平滩河槽面积明显增加;另外,由于近年来洪水期缩短,洲滩植被的生长也对漫滩水流产生了一定的阻力。此处着重分析这些变化过程对研究河道过流能力变化的影响。

4.1 水文断面过流能力变化的影响因素分析

一般来说,河道过流能力与水面比降及过流面积呈正相关关系,而与河道阻力呈反相关关系。由图6~8可知,2003—2016年螺山站与汉口站所在断面在洪水期的过流能力降低,主要表现为:(1)洪水期同流量下水位无明显变化;(2)警戒水位下的流量降低;(3)年最大流量下对应的水位整体抬升。由螺山站和汉口站所在水文断面的平滩面积和水面比降变化过程可知,螺山站平滩面积增加8%,水面比降增加19%;汉口站

水面比降变化较小,仅减少 2%,但平滩面积增大 18%(图 11). 总体上,该两站河槽面积和水面比降的综合变化朝着有利于过流能力提高的方向发展.

图 11 螺山站与汉口站过流面积(a)与水面比降(b)的变化

Fig.11 Temporal variations in wetted area (a) and water surface slope (b) at Luoshan and Hankou Stations

刘鑫等^[21]比较了长江中游河段的动床阻力计算公式,其中基于水流能态分区的动床阻力计算公式所计算的结果与实测资料具有较好的拟合效果. 长江中游河段水流主要处于低能态区和过渡区,根据相应公式计算得到的螺山站与汉口站断面糙率在 2003—2016 年分别增大 17% 和 10%,其部分原因可能在于冲刷引起的床沙粗化过程:2016 年城汉河段平均床沙中值粒径由 2003 年的 0.159 mm 增大到 0.206 mm^[16],增幅近 30%. 图 12 给出了螺山站与汉口站的警戒流量与糙率的相关关系,可知两者呈较为明显的反相关关系,表明该两断面洪水期过流能力降低与其动床阻力的增大密切相关.

另外,值得注意的是,对于复式河槽,在滩槽宽度比一定的情况下,断面阻力系数随相对水深 Dr (滩地水深与主槽水深之比)的减小而增大^[22-23]. 近期城汉河段主槽冲深,而滩地较少受到水流塑造^[3](图 4 河段尺度的平滩河槽形态计算结果表明,河段平滩河宽仅增大 2%),导致在相同高水位情况下,滩槽相对水深 Dr 减小. 这增大了河道阻力,一定程度上会降低河道过流能力.

图 12 螺山站(a)与汉口站(b)警戒流量变化与河道阻力的关系

Fig.12 Relationships between warning discharge and bed resistance at different stations of Luoshan Station (a) and Hankou Station (b)

4.2 局部河段植被覆盖变化对过流能力的影响

从河段整体看,虽然以平滩面积为代表的河段整体过流面积在增大(图 4),但断面及河段尺度的过流能力均未出现明显的提升,除了河段床沙粗化导致的河道阻力增大,局部河段的植被覆盖也成为影响大流量下河道过流能力的重要因素. 近年来,随着生态优先、绿色发展的河道治理理念进一步深入,长江中下游在护岸及护滩工程实践中大力提倡采用生态技术,加上水流漫滩时间减小,导致局部河段的滩地植被生长茂盛,一定程度上增大了岸滩阻力. 为具体分析城汉河段滩地植被变化情况,此处利用美国陆地卫星 Landsat 7 系列遥感影像资料进行分析. 相对于传统实测资料,河道遥感影像资料能够与地理信息系统相结合,更加准确的表示植被覆盖情况. 选取城汉河段中洲及新洲作为研究对象. 汛期及汛后遥感影像表明,新洲在汛期几

乎被完全淹没,被淹没的植被会改变水流结构,继而影响流速. 如图 13 所示,图中红色区域为植被覆盖区域,可以看出与 2003 年相比,2016 年新洲上的植被明显增多.

归一化植被指数(*NDVI*)可使植被从水和土中分离出来,常被用于表示植被覆盖度. 其高值部分越高表明植被覆盖度越高. 利用 *ARCGIS* 处理遥感影像资料,可得到 2003 年及 2016 年同一时期中洲和新洲的 *NDVI* 指数. 选取洲滩上断面 *HL12-1*,计算该断面在平滩流量下的曼宁糙率系数. 结果显示:与 2003 年相比,2016 年同一时期中洲和新洲的 *NDVI* 高值增大 6.8%,相应的 *HL12-1* 断面糙率系数增大 42.6%. 采用同样的方法计算了城汉河段上游新淤洲、南门洲和下游天兴洲的 *NDVI* 值与断面糙率变化,结果如表 1 所示;*NDVI* 高值与断面糙率均有增加. 这主要是由于三峡水库运用后洪水期缩短,洪水对滩地植被的影响减小,植被生长更加旺盛. 当水位平滩或漫滩时,植被对过流的阻力作用增大,从而导致河道在高水位下过流能力降低.

表 1 城陵矶—汉口河段洲滩植被覆盖与断面糙率变化

Tab.1 Variation of vegetation coverage and section roughness in the Chenglingji-Hankou reach

洲滩	NDVI(高值)		变化率	固定断面	断面糙率系数		变化率
	2003 年	2016 年			2003 年	2016 年	
新淤洲、南门洲	0.203	0.369	81.9%	JZ3-2	0.0162	0.0240	48.0%
				JZ4-1	0.0162	0.0227	39.8%
新洲、中洲	0.351	0.375	6.8%	HL12-1	0.0127	0.0181	42.6%
天兴洲	0.299	0.321	7.6%	HL14-1	0.0186	0.0328	76.8%
				HL14-2	0.0208	0.0332	59.8%

5 结论

基于城汉河段 2003—2016 年的实测地形及水文资料,分析了近期城汉河段过流能力的变化特点及影响因素,得到如下结论:

- 1)受上游水库运行的影响,城汉河段近年来河槽持续冲刷,且冲刷幅度呈增长趋势;河床调整特点主要为过流面积增大以及床沙粗化;其中河段尺度的平滩面积增大 10.6%,河段平均床沙中值粒径增大近 30%.
- 2)城汉河段重要水文站 2003—2016 年的水位—流量关系表明,螺山站及汉口站在同流量下的水位呈现出枯水位下降、洪水水位变化不明显的特征;警戒水位下的流量则分别减小 9% 和 16%;河段尺度的平滩流量变化显示,2003—2016 年,城汉河段平滩流量有增有减,变化幅度为 8.7%,2014 年后呈减小趋势.

3)分析螺山站与汉口站的河槽形态与断面糙率,发现警戒流量与河床糙率之间关系密切,因此引起过流能力降低的主要原因是河道阻力的增大降低了流速;另外,河道相对水深和局部河段洲滩植被覆盖度也是影响河道过流能力的重要因素。

综上所述,近年来城汉河段河槽冲深,一定程度上提升了河段的槽蓄能力,但大流量下的河道过流能力没有得到显著提升,河段整体的防洪形势依然险峻。

6 参考文献

- [1] Zhang W, Yuan J, Han JQ *et al.* Impact of the Three Gorges Dam on sediment deposition and erosion in the middle Yangtze River: A case study of the Shashi Reach. *Hydrology Research*, 2016, **47**(S1): 175-186. DOI: 10.2166/nh.2016.092.
- [2] Han JQ, Sun ZH, Yang YP. Flood and low stage adjustment in the middle Yangtze River after impoundment of the Three Gorges Reservoir (TGR). *J Lake Sci*, 2017, **29**(5): 1217-1226. DOI: 10.18307/2017.0520. [韩剑桥, 孙昭华, 杨云平. 三峡水库运行后长江中游洪、枯水位变化特征. 湖泊科学, 2017, **29**(5): 1217-1226.]
- [3] Zhou JJ. The mid-Yangtze flood after the commencement of the Three Gorges Project and the countermeasures(II). *Science & Technology Review*, 2010, **28**(23): 46-55. [周建军. 三峡工程建成后长江中游的防洪形势和解决方案(II). 科技导报, 2010, **28**(23): 46-55.]
- [4] Zhang M, Zhou JJ, Huang GX. Flood control problems in middle reaches of Yangtze River and countermeasures. *Water Resources Protection*, 2016, **32**(4): 1-10. [张曼, 周建军, 黄国鲜. 长江中游防洪问题与对策. 水资源保护, 2016, **32**(4): 1-10.]
- [5] Zhu LJ, Ning L, Zhang LM. Analysis on changes in flood control situation of middle and lower reaches of Yangtze River before and after completion of TGP. *Yangtze River*, 2011, **42**(1): 1-3, 12. [朱丽江, 宁磊, 张黎明. 三峡工程建成前后长江中下游防洪形势变化分析. 人民长江, 2011, **42**(1): 1-3, 12.]
- [6] Xu QX, Yuan J, Wu WJ *et al.* Fluvial processes in middle Yangtze River after impoundment of Three Gorges Project. *Journal of Sediment Research*, 2011, (2): 38-46. [许全喜, 袁晶, 伍文俊等. 三峡工程蓄水运用后长江中游河道演变初步研究. 泥沙研究, 2011, (2): 38-46.]
- [7] Yuan WH, Yin DW, Finlayson B *et al.* Assessing the potential for change in the middle Yangtze River channel following impoundment of the Three Gorges Dam. *Geomorphology*, 2012, **147/148**: 27-34. DOI: 10.1016/j.geomorph.2011.06.039.
- [8] Dai ZJ, Liu JT. Impacts of large dams on downstream fluvial sedimentation: An example of the Three Gorges Dam (TGD) on the Changjiang (Yangtze River). *Journal of Hydrology*, 2013, **480**(4): 10-18. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2012.12.003.
- [9] Tang JW, Li YT, Sun ZH *et al.* Preliminary study on the changes of water level at Chenglingji Station after the impoundment of the Three Gorges Project (TGP). *Journal of Basic Science and Engineering*, 2010, **18**(2): 273-280. [唐金武, 李义天, 孙昭华等. 三峡蓄水后城陵矶水位变化初步研究. 应用基础与工程科学学报, 2010, **18**(2): 273-280.]
- [10] Yang YP, Zhang MJ, Sun ZH *et al.* The relationship between water level change and river channel geometry adjustment in the downstream of the Three Gorges Dam (TGD). *Acta Geographica Sinica*, 2017, **72**(5): 776-789. DOI: 10.11821/dlxb201705002. [杨云平, 张明进, 孙昭华等. 三峡大坝下游水位变化与河道形态调整关系研究. 地理学报, 2017, **72**(5): 776-789.]
- [11] Li CH, Xu GB, Yuan XM *et al.* Research progress on numerical simulation of joint flood control in river and flood detention area. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2017, **28**(6): 139-144. [李春辉, 徐国宾, 苑希民等. 河道与蓄滞洪区联合防洪数值模拟研究进展. 水资源与水工程学报, 2017, **28**(6): 139-144.]
- [12] Wu BS, Wang GQ, Xia JQ *et al.* Response of bankfull discharge to discharge and sediment load in the Lower Yellow River. *Geomorphology*, 2008, **100**(3/4): 366-376. DOI: 10.1016/j.geomorph.2008.01.007.
- [13] Tang XN. An improved method for predicting discharge of homogeneous compound channels based on energy concept. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2017, **57**: 57-63. DOI: 10.1016/j.flowmeasinst.2017.08.005.
- [14] Zhu LL, Ge H, Li YT *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.]
- [15] Wang JQ, Zhang XB. Analysis of river channel evolution at Wuhan reach of Yangtze River. *Yangtze River*, 2018, **49**(3):

- 9-14. [王继全, 张细兵. 长江中游武汉河段近期河道演变分析. 人民长江, 2018, **49**(3): 9-14.]
- [16] Cao GJ, Wang J eds. Measurements and studies of hydrological and sediment data in the Three Gorges Project. Beijing: Science Press, 2015.[曹广晶, 王俊. 长江三峡工程水文泥沙观测与研究. 北京: 科学出版社, 2015.]
- [17] Chen YJ, Jiang L. Evaluation of waterway engineering construction and regulation effect in middle and lower reaches of the Yangtze River. *Port & Waterway Engineering*, 2019, (1): 6-11, 34. [陈怡君, 江凌. 长江中下游航道工程建设及整治效果评价. 水运工程, 2019, (1): 6-11, 34.]
- [18] Xia JQ, Wu BS, Wang YP *et al.* Estimating the bankfull discharge in the Lower Yellow River and analysis of its variation processes. *Journal of Sediment Research*, 2010, (2): 6-14. [夏军强, 吴保生, 王艳平等. 黄河下游河段平滩流量计算及变化过程分析. 泥沙研究, 2010, (2): 6-14.]
- [19] Xia JQ, Li XJ, Li T *et al.* Response of reach-scale bankfull channel geometry to the altered flow and sediment regime in the lower Yellow River. *Geomorphology*, 2014, **213**: 255-265. DOI: 10.1016/j.geomorph.2014.01.017.
- [20] Slater LJ. To what extent have changes in channel capacity contributed to flood hazard trends in England and Wales? *Earth Surface Processes and Landforms*, 2016, **41**(8): 1115-1128. DOI: 10.1002/esp.3927.
- [21] Liu X, Xia JQ, Zhou MR *et al.* Formula of movable bed roughness for the Middle Yangtze River. *Advances in Water Science*, 2020, **31**(4): 535-546. [刘鑫, 夏军强, 周美蓉等. 长江中游动床阻力计算. 水科学进展, 2020, **31**(4): 535-546.]
- [22] Yang KJ. Flow resistance and sediment transport in compound channels [Dissertation]. Chengdu: Sichuan University, 2006.[杨克君. 复式河槽水流阻力及泥沙输移特性研究[学位论文]. 成都: 四川大学, 2006.]
- [23] Ji CH, Zhang XN, Xie R. Influence of water depth and beach roughness to the conveyance capacity of compound channels. *Yellow River*, 2015, **37**(1): 42-45. [姬昌辉, 张幸农, 谢瑞. 水深及滩地糙率对复式断面河道过流能力的影响. 人民黄河, 2015, **37**(1): 42-45.]