J. Lake Sci.(湖泊科学),2023,**35**(2):642-649
DOI 10.18307/2023.0220

三峡工程运用后长江中游河床调整沿程变化特点*

周美蓉,夏军强**,邓珊珊,毛　禹
(武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室,武汉 430072)

摘　要:三峡工程运行后,坝下游河道发生持续冲刷。本文研究了长江中游(955 km)不同河段沿程演变差异及其原因。总体而言,河床形态调整幅度自上而下减弱,这是因为在河床持续冲刷过程中,水流含沙量沿程恢复,故越往下游冲刷相对缓慢。平面形态方面,长江中游岸线崩退及洲滩变形的强度均呈沿程减弱趋势,且在荆江河段最为显著。断面形态方面,河床冲深幅度在宜枝下段>荆江河段>宜枝上段>城汉河段>汉湖河段。理论上距离三峡工程最近的河段冲刷应最为剧烈,但由于宜枝上段床沙粗化显著,限制了冲刷的进一步发展。过流能力方面,宜枝河段由于距洞庭湖较远,并未受到入汇顶托作用,故其平滩流量的调整基本由进口水沙条件控制,并随着河床冲深下切而增大;对于荆江、城汉和汉湖河段,河床冲刷虽显著,但支流或湖泊的入汇顶托对平滩流量产生的影响大于前者,故平滩流量总体随上下游水位差同步波动。
关键词:河床形态;过流能力;沿程变化;长江中游;三峡工程

Longitudinal variation of channel evolution along the middle Yangtze River after the operation of the Three Gorges Project*

Zhou Meirong, Xia Junqiang**, Deng Shanshan & Mao Yu
(*State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science*, *Wuhan University*, *Wuhan* 430072, *P.R.China*)

Abstract: Significant degradation have occurred in the middle Yangtze River since the operation of the Three Gorges Project. In the current study, longitudinal evolution differences of different reaches along the middle Yangtze River were quantitatively compared, and the main reasons were investigated. In terms of planform geometry, the intensity of bank retreat and central-bar deformation showed a decreasing trend along the reach, and it was most significant in the Jingjiang Reach. With respect to cross-sectional geometry, channel degradation developed gradually from the Yizhi Reach to downstream reaches. It is uncommon that the adjustments of bankfull channel geometry in the upper Yizhi Reach were smaller than those in the downstream reaches. The reason is that the significant coarsening of bed-material composition in the upper Yizhi Reach hindered the development of channel degradation. In terms of discharge capacity, the variations of reach-scale bankfull discharge in the Yizhi Reach were mainly controlled by the incoming flow and sediment conditions, and it increased with the process of channel degradation. In the other subreaches, the variations of bankfull discharge were mainly influenced by the backwater effects owing to the confluences of tributaries and lakes.
Keywords: Channel geometry; discharge capacity; longitudinal evolution; middle Yangtze River; Three Gorges Project

三峡工程运行后,因水库的拦沙作用,下泄沙量急剧减小,坝下游河道发生长时间、长距离的河床冲刷。但由于含沙量沿程恢复,且不同河段的边界条件有所不同,故河床形态及过流能力调整在时空上存在较大差异[1-2]。因此,有必要研究长江中游河床的沿程调整特点及趋势,这对河道治理具有重要意义。

从时间角度来看,在河床自动调整过程中,其初始调整速度较为迅速,但随着河床调整不断趋近于新的

* 2022-03-21 收稿; 2022-09-21 收修改稿。
国家自然科学基金项目(U2040215, 52109098, 52009095)和中国博士后创新人才支持计划项目(BX2021228)联合资助。
** 通信作者; E-mail:xiajq@whu.edu.cn。

平衡状态,调整速度会逐渐降低,最后趋近于零。即受到扰动到形成新的平衡,需要一定的反应和调整时间,故河床调整在时间上对外界扰动存在滞后响应。目前已有不少研究针对这一内容展开,主要包括 4 类:第 1 类,基于实测资料,定性分析各河床演变参数随时间的变化特点和规律[3-4];第 2 类,基于实测资料,通过数学拟合,得到描述河槽形态调整的经验或半经验的定量关系式[5-6]。例如,Xia 等[5]分析了三峡工程运行后荆江河段平滩河槽形态参数的调整特点,并建立了这些参数与前期水流冲刷强度的经验关系;第 3 类,利用各类极值假设来研究非平衡河床演变,认为当河流的平衡遭到破坏时,河床调整以使得特征变量朝极值发展[7-8]。如陈绪坚等[8]基于最小可用能耗率原理,计算了黄河下游河道在不同水沙条件下的河槽均衡稳定断面;第 4 类,基于线性速率调整模式(即变率模型 $dy/dt=\beta(y_e-y)$,y 与 y_e分别为河床形态某个特征参数及其平衡值,t 为时间,β 为系数)的河床演变滞后响应模型[9-10]。吴保生[9]基于线性速率调整模式,建立了河床演变滞后响应的基本模型,该模型考虑了前期多年水沙条件的综合影响,可用于定量描述河床特征变量随时间的响应过程;Shin 和 Julien[10]假定河宽调整为线性速率调整模式,从而建立了指数函数关系式来描述韩国 Hwang 河的河宽变化过程。

从空间角度出发,现有研究大多分析长河段的不平衡输沙、冲淤变化等过程[1,11-13]。例如,Luo 等[11]研究了长江中下游床沙中值粒径的沿程变化,发现三峡工程运行后河床的持续冲刷引起了坝下游 100 km 河段的床沙粗化,但细颗粒泥沙的落淤使得河口床沙细化,而中间河段床沙中值粒径沿程差异不大。杨云平等[1]探讨了三峡水库蓄水后坝下游河床冲淤的时空差异及成因,研究表明:河床整体为冲刷趋势,且主冲刷带下移约 80 km,175 m 蓄水以来宜昌—新厂河段冲刷强度减弱,新厂—湖口河段增强。郭小虎等[12]分析了三峡水库蓄水后长江中游河床粗化及含沙量沿程恢复特性。目前也有少数学者关注河床形态及河道过流能力的沿程变化特点及其对外界扰动响应的沿程差异[2, 14]。例如,Lyv 等[14]研究了三峡工程运用对长江中游宜昌—城陵矶河段深泓空间分布及调整的影响。夏军强等[2]分析了近期长江中游平滩河槽调整特点,发现沿程河槽形态调整(除河宽外)均可对进口水沙条件的改变做出较好的响应,且越靠近三峡大坝,响应程度越高。

然而鉴于当前长江中游河道治理的需求,有必要从平面、断面形态及过流能力等方面,对其沿程演变特点及趋势展开更全面的研究。本文基于实测水沙、地形和遥感影像等资料,确定了长江中游岸线变化、洲滩变形、平滩河槽形态及平滩流量的调整过程;比较了不同河段河床调整的沿程差异,并分析了产生差异的主要原因。

1 河段概况及数据源

1.1 长江中游河段概况

长江作为我国第一大河,全长约 6300 km,通常分为上、中、下游三段。长江中游指宜昌到湖口之间的河段,总长约 955 km,三峡水利枢纽位于宜昌境内(图 1)。沿程共设有 7 个水文站(宜昌、螺山、汉口等)和 11 个水位站(红花套、新厂、莲花塘等)。根据地理环境、水文、河型等特征,长江中游又可进一步划分为宜枝(59 km)、荆江(347 km)、城汉(254 km)与汉湖(295 km)4 个河段。

宜枝河段上起宜昌,下迄枝城,为三峡及葛洲坝水利枢纽下游的近坝段。该河段是山区河流到平原河流的过渡段,总体为宽谷型顺直微弯河段。根据河床组成不同,以宜 69 断面为界将宜枝段分为上、下 2 个河段,分别长为 42、17 km。三峡水库蓄水运用前,宜枝河段主要为沙夹卵石河床,砾卵石所占比例自上而下递减。其中上段河床组成基本为细沙与砾卵石两相,且沙质覆盖层较薄;而下段河床组成以细沙为主,砾卵石和粗中沙为次。荆江河段上起枝城,下至城陵矶,紧临宜枝河段。该河段水沙主要来自上游,其间通过松滋口、太平口、藕池口分流入洞庭湖,又于城陵矶处重新汇入长江干流。荆江段"九曲回肠",以藕池口为界,将其分为上、下荆江,分别长 172、175 km。河床组成多为中细沙,卵石层已深埋至床面层以下;河岸为二元结构,上荆江河岸的上部粘土层厚而下部沙土层薄,下荆江则相反。城汉河段上迄城陵矶,承接长江干流荆江来水及洞庭湖水系,下至武汉,出口处有汉江入汇。该河段以分汊河型为主,河道内江心洲发育,沿程分布有南门洲、中洲、复兴洲等洲滩。汉湖河段上起武汉,下至鄱阳湖出口与长江交汇处,受到鄱阳湖入汇的顶托。城汉和汉湖段河床组成均以细沙为主,其次是极细沙;岸坡以亚粘土和亚砂土为主,岸坡结构多变,抗

冲强度不均。

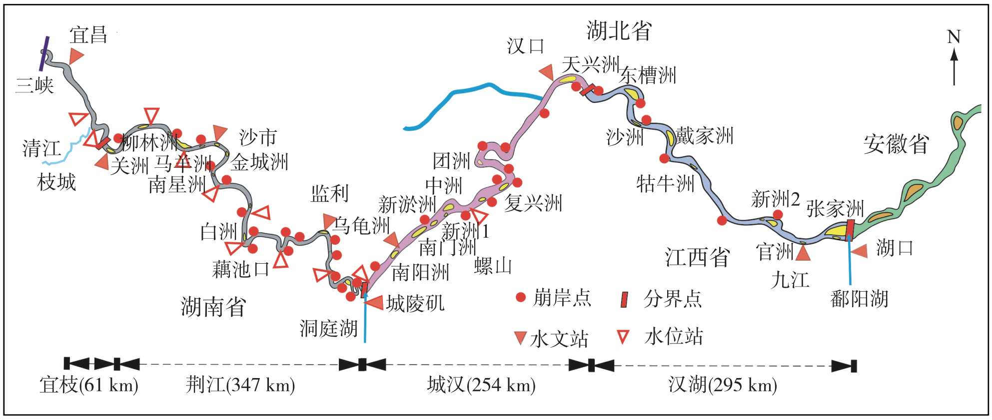

图 1 长江中游河段概况

Fig.1 Sketch of the channels in the middle Yangtze River

1.2 数据源

为分析三峡工程运行后长江中游的水沙变化、河床冲淤及床沙调整情况,本文收集了长江中游宜昌、枝城、沙市、监利、螺山及汉口 6 个水文站 1950－2018 年的年水量和年输沙量,6 站 2003－2018 年床沙中值粒径,以及长江中游河段 1975－2018 年的平滩河槽冲淤量。上述资料均来源于《中国河流泥沙公报》(http://mwr.gov.cn/sj/tjgb/zghlnsgb/)及长江水利委员会水文局《三峡水库进出库水沙特性、水库淤积及坝下游河道冲刷分析》报告[15]。此外,为研究长江中游河道岸线变化、江心洲(滩)变形及断面形态调整特点,本文进一步收集了三峡工程运行后中游长程河道地形(水边线)、443 个固定断面地形数据[15]及遥感影像资料。其中本研究所采用的 Landsat 系列遥感数据来源于中国科学院地理空间数据云网站(http://www.gscloud.cn)和美国地质调查局的 GloVis 网站(https://glovis.usgs.gov/)。荆江、城汉和汉九河段分别选用枯水期枝城站水位为(36±1) m、螺山站(20±1) m 和汉口站(13±1) m 对应的遥感影像进行分析,最大水位变幅依次为 1.04、1.43 和 0.91 m,具体信息见附录 I 所示。需要说明的是,一般选取当年汛后的遥感影像或次年汛前的遥感影像作为当年研究影像,由于非汛期河床冲淤变形较小,该处理方法对洲滩面积提取结果的影响相对较小。

2 三峡工程运行后长江中游河床冲淤的沿程变化

三峡工程运行后,进入长江中游的水沙量发生了较为显著的变化,且含沙量沿程恢复。三峡工程投入使用后(2002－2018 年),宜昌站多年平均水量为 4082×10^8 m^3/a,较蓄水前(1950－2002 年)的 4376×10^8 m^3/a 减少 7%;而枝城、沙市、监利、螺山、汉口站的多年平均水量减幅在 3%~9%之间。但由于三峡水库的入库沙量减少及其蓄水拦沙作用,进入长江中游的沙量显著减少(图 2)。宜昌站多年平均输沙量由蓄水前的 4.97×10^8 t/a 减小为蓄水后的 0.47×10^8 t/a,减幅高达 91%;其他 5 站多年平均汛期输沙量降幅亦分别达到 86%、78%、80%、78%和 71%。因此还可知,6 个水文站的输沙量降幅总体呈递减趋势,这主要是因为在河床持续冲刷过程中,含沙量沿程恢复。

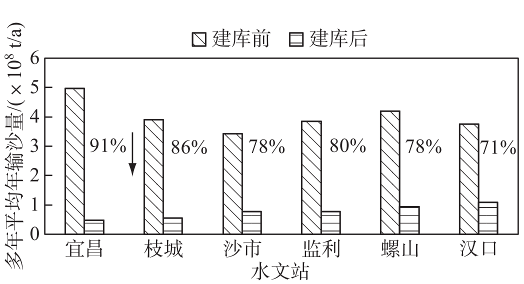

图 2 三峡工程运用前后长江中游各站的输沙量变化

Fig.2 Spatial and temporal variation in sediment load in the middle Yangtze River before and after the operation of the Three Gorges Project

下泄沙量急剧减小使得长江中游发生显著的持续冲刷(图 3)。2002－2018 年宜枝河段平均冲刷强

度(平滩河槽)达 17.43×10^4 m^3/(a·km),远大于水库运用前(1975－2002 年)的 8.78×10^4 m^3/(a·km);同期荆江河段平均冲刷强度为 20.48×10^4 m^3/(a·km),大于蓄水前(1975－2002)的 3.18×10^4 m^3/(a·km);而城汉河段的冲刷强度较小,三峡工程运行初期的累计冲刷量仅为 1.71×10^8 m^3(2002－2013 年),但之后冲刷有所加剧,至 2018 年累计冲刷量增至 4.56×10^8 m^3,平均冲刷强度约为 10.67×10^4 m^3/(a·km);汉湖河段平均冲刷强度则为 13.35×10^4 m^3/(a·km)(2002—2018 年)。由此可知,三峡工程运行后河床冲刷强度大小表现为荆江河段>宜枝河段>汉湖河段>城汉河段。一般情况下,在河床持续冲刷过程中含沙量沿程恢复,故河床冲刷总体表现为沿程减弱。

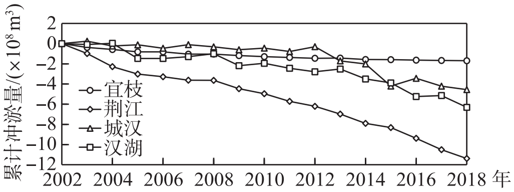

图 3 三峡工程运用后长江中游不同河段的冲淤过程

Fig.3 Channel cumulative scour volume in different subreaches in the middle Yangtze River after the operation of the Three Gorges Project

在河床冲刷过程中,长江中游床沙沿程发生不同程度的粗化。由图 4 可知,宜昌、沙市、螺山等水文断面的床沙粒径均有不同程度的粗化。对比趋势线斜率可知,床沙粗化程度大小表现为宜昌>枝城>沙市>监利>螺山,反映了上游建坝引起的床沙粗化现象逐步向下游发展且减弱的特点。而汉口站的趋势线斜率为负值,床沙有所细化。具体而言,宜昌站床沙中值粒径由 2003 年的 0.32 mm 急增到 2018 年的 40.30 mm;汉口站的床沙粒径略有细化,而其他 4 站的床沙粗化程度分别为 34%、39%、8%和 12%。

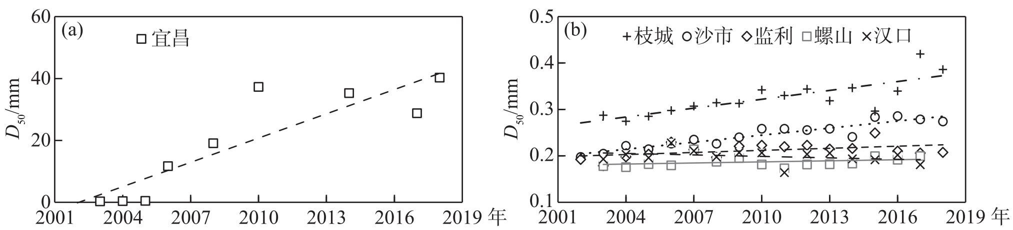

图 4 长江中游床沙中值粒径(D_{50})的沿程变化

Fig.4 Longitudinal variation in median diameter of bed materials in the middle Yangtze River

3 三峡工程运行后长江中游河道平面形态的沿程变化

3.1 岸线变化

三峡水库蓄水运用后,长江中游河床持续冲深,局部河段崩岸频发,主要崩岸位置如图 1 所示。根据 2002 和 2018 年长程河道地形统计(城汉河段为 2001 和 2016 年长程河道地形),长江中游崩岸长度(发生崩岸的岸线长度)达 173 km,约为总岸线长度的 10%,且年均崩退宽度呈沿程减小趋势(图 5)。由于宜枝河段两岸主要为丘陵阶地,崩岸极少发生;而在其他 3 个河段,河岸崩退较为显著,故着重介绍。

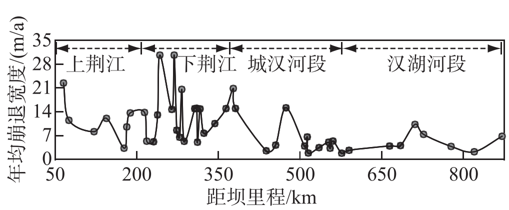

图 5 三峡工程运用后长江中游各崩岸点的年均崩退宽度

Fig.5 Annual average bank retreat width at the occurring sites in the middle Yangtze River after the operation of the Three Gorges Project

荆江段崩岸最为严重,总崩岸长度达 124 km,约占岸线总长的 18%,崩岸点年均崩退宽度为 13 m/a。其中上荆江总崩岸长为 30 km,年均崩退宽度介于 3.3~22.4 m/a 之间;下荆江崩岸总长 94 km,年均崩退宽度介于 5.1~30.6 m/a 之间。此外,下荆江 6 个急弯段(调关、七公岭等)均发生明显的"凸冲凹淤"现象,主要表现为凸岸边滩冲刷,凹岸淤积形成心滩,断面形态由不对称的"V"型变为"W"型。城汉河段的崩岸

强度次之,崩岸总长约 31 km,占岸线长度的 6%,年均崩退宽度介于 1.8~15.3 m/a 之间。汉湖河段的崩岸现象较弱,崩岸总长约 19 km,占岸线长度的 3%。

综上分析,长江中游不同河段的崩岸情况因水流及河岸组成等条件不同,存在较大差异。相较于上荆江,下荆江的下部沙土层更易被水流冲刷而导致上部粘土层悬空而发生崩塌,且下荆江河道弯曲程度高,水流顶冲显著,故下荆江崩岸更加剧烈[2]。而城汉河段和汉湖河段为分汊型河道,河道弯曲程度较低,水流相对顺直;此外,两岸分布众多抗冲节点,河势相对稳定,故崩岸数量少且强度较低。

3.2 洲滩调整

长江中游分汊河段长度约占总河长的 50%[3],沿程分布有 28 个发育较为完整的江心洲(滩),在荆江、城汉及汉湖河段的江心洲数量分别为 11、7 和 10 个(图 1)。由于宜枝河段江心洲(滩)十分稳定,故此处暂不分析。基于选取的 Landsat 遥感影像(附表Ⅰ),提取了 2003－2018 年长江中游各江心洲(滩)在枯水期(相近水位)的出露面积,以此分析三峡工程运行后坝下游河道内江心洲(滩)面积的时空变化规律。

从时间变化来看,2003－2018 年长江中游江心洲总体呈萎缩趋势,枯水期出露总面积从 305 km^2减少到 288 km^2(图 6a)。具体可分为 3 个阶段:(1)三峡工程运行的前 3 年,江心洲出露面积大幅减少,减幅占 2003—2018 年总冲刷面积的 43%;(2)2006－2015 年,出露面积由 297 km^2缓慢增加到 304 km^2;(3)2015 年以后,江心洲又转为冲刷,平均冲刷速率(5.5 km^2/a)大于初始阶段(2.5 km^2/a)。从不同河段来看,荆江河段内江心洲经历持续冲刷,出露面积在 2003－2018 年间减少了 9.4 km^2;城汉河段的江心洲出露面积先增加(2003－2015 年)后急剧减少(2015－2018 年);在汉湖河段,2003－2015 年江心洲持续萎缩但幅度较小,而在 2015－2018 年间冲刷加剧,两个阶段平均冲刷速率分别为 0.2 和 2.4 km^2/a(图 6b)。

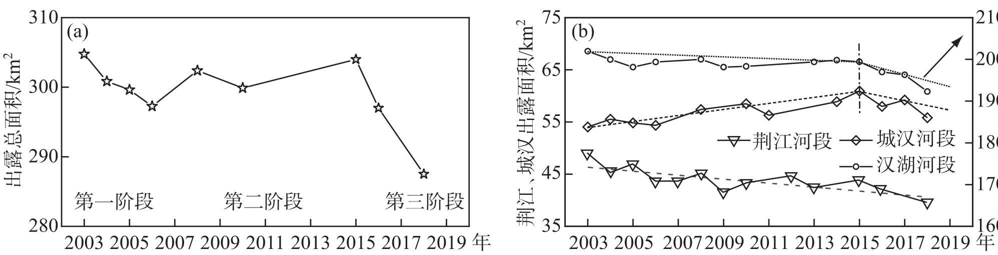

图 6 长江中游江心洲出露面积随时间变化:(a)总面积;(b)不同河段的出露面积

Fig.6 Temporal variation in the exposed area of mid-channel bars: (a) total exposed area for the middle Yangtze River; (b) exposed area for three subreaches

4 三峡工程运行后长江中游河道断面形态及过流能力的沿程变化

4.1 断面形态的沿程变化

采用 Xia 等[5]提出的河段尺度平滩河槽特征参数计算方法,确定了三峡工程运行后长江中游不同河段的平滩河槽形态参数(附表Ⅱ)。该方法首先确定各固定断面的滩唇及平滩高程,两岸滩唇的间距为平滩河宽,若为双河槽断面,平滩河宽则为两槽的河宽之和,平滩水位与河床围成的面积为平滩面积,而平滩水深则为面积与河宽的比值;然后根据各断面的平滩河槽形态参数计算结果,利用河段平均公式[5],计算得到河段尺度的平滩河槽形态参数。由图可知:(1)在宜枝河段,河段尺度的平滩河槽宽度($\overline{W}_{bf}$)变幅很小;该时期断面形态调整主要表现为平滩水深($\overline{H}_{bf}$)的增加,其值在上、下段增幅分别为 8% 和 28%;相应的平滩面积($\overline{A}_{bf}$)也呈持续增加趋势;河槽趋于窄深,上段宽深比($\bar{\xi}_{bf}$)由 61 减小至 57,下段宽深比则由 63 减小至 49;(2)在荆江河段,河段尺度的平滩宽度在 1341~1373 m 范围内变化;平滩水深增加 1.69 m,增幅为 12%;而平滩面积由 2002 年的 18214 m^2增加到 2018 年的 20898 m^2,增幅达 15%;河槽形态同样趋向于窄深,$\bar{\xi}_{bf}$减小约 9%;(3)城汉河段平滩水深累计增加 8%,相应平滩面积增加超 10%,$\bar{\xi}_{bf}$减小约 6%;(4)汉湖河段平滩河宽从 2004 年的 1691 m 增加到 2018 年的 1699 m,平滩水深和面积增幅均为 6%。从时间尺度上看,研究

河段平滩水深及面积呈逐年增加趋势,但沿程不同河段增幅有所不同。

由上述结果可知,宜枝河段“首当其冲”,且河床冲刷逐步向下游河段发展。其中平滩水深增幅在宜枝下段>荆江河段>宜枝上段>城汉河段>汉湖河段。理论上距离三峡工程最近的河段冲刷应最为剧烈,但宜枝上段平滩河槽形态参数增幅小于下段。究其原因,主要是由于上段的河床组成为细沙与砾卵石两相且沙质覆盖层较薄,床沙粗化显著,限制了冲刷的进一步发展。但断面形态调整幅度总体自上而下减缓,这是因为在河床持续冲刷过程中,水流含沙量沿程恢复,故越往下游冲刷相对缓慢。

4.2 过流能力的沿程变化

采用 Xia 等[16]提出的河段尺度平滩流量($\overline{Q}_{bf}$)计算方法,确定了 2002－2018 年长江中游不同河段的平滩流量。具体步骤包括:首先根据研究河段实测的水沙数据及固定断面地形资料,通过一维数学模型计算出各断面的水位—流量关系;然后根据确定的各断面平滩高程,由水位—流量关系确定相应的平滩流量;再根据河段平均公式[5],计算河段尺度值。宜枝段平滩流量由 2002 年的 67990 m^3/s 增加到 2018 年的 76476 m^3/s,呈逐年增大的趋势;而荆江段的平滩流量则上下波动,在 2011 年达到最大值 38950 m^3/s,在 2016 年又达到最小值 32610 m^3/s,变动幅度约为 19%;城汉河段平滩流量变幅较小(2003－2018 年),平均值约为 45450 m^3/s;汉湖河段平滩流量在 42450~56890 m^3/s 范围内波动(图 7)。总体上,平滩流量在荆江河段<城汉河段<汉湖河段,宜枝河段两岸主要由丘陵阶地控制,没有明显的河漫滩,故该河段确定的平滩高程较高,导致平滩流量也较大。

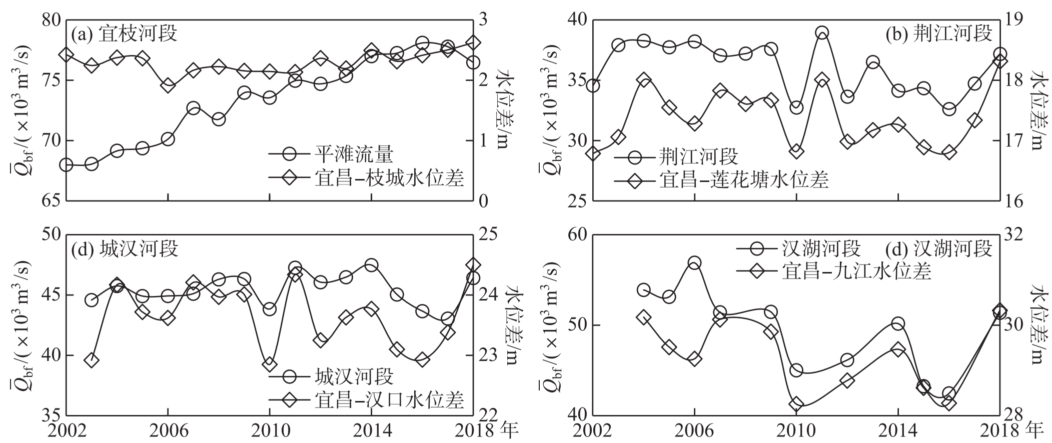

图 7 长江中游不同河段平滩流量与水位差的变化过程

Fig.7 Temporal variations in bankfull discharge and water-level difference in different subreaches of the middle Yangtze River

平滩流量的大小主要取决于平滩面积和平滩水位下的平均流速。由平滩流量的确定过程可知,在各断面的水位—流量关系曲线上,平滩高程对应的流量即为平滩流量。近期长江中游较少漫滩,平滩高程几乎不变,故平滩流量调整主要是由于各断面水位—流量关系的改变。一方面,上游建坝使得坝下游河床发生持续冲刷下切,导致了水位—流量关系曲线下移;另一方面,支流或湖泊入汇顶托/河床阻力增加抬升上游水位,使得各断面的水位—流量关系曲线整体上移。前者主要改变平滩面积大小,而后者通过改变水面比降从而影响平均流速。综上所述,平滩流量的调整受两者的共同作用,是两种影响博弈的结果。本文选取宜昌站水位为参考水位,该站水位不受下游支流入汇顶托的影响,从而采用各河段出口水位与宜昌站水位的差值来反映入汇顶托对上游水位的影响。

长江中游不同河段平滩流量的调整结果表明:(1)在宜枝河段,由于距离洞庭湖较远(图 1),并未受到洞庭湖入汇顶托作用,其平滩流量的调整主要由进口水沙条件控制,并随着河床下切而增加(图 7a);(2)至于荆江河段,平滩流量的调整不仅受进口水沙条件变化的影响,还受到出口处洞庭湖入汇顶托的影响(入汇

流量(城陵矶站)约占干流流量的65%),具体表现为随宜昌—莲花塘水位差(16.78~18.32 m)同步波动(图7b)。由图8a可知,在40000 m^3/s流量下,2006年莲花塘的水位为28.72 m,而在2010年其值为29.55 m。需注意的是,荆江河段经历了持续的河床冲刷下切,2010年平均河底高程较2006年低0.29 m,故同流量下2010年的水位应当随着河床下切有所降低。然而洞庭湖的顶托作用使莲花塘的水位抬升,导致40000 m^3/s流量下2010年的水位值高于2006年,由此可体现出入汇对上游水位的影响;(3)城汉河段的平滩流量受汉江入汇顶托的影响(入汇流量(仙桃站)约为干流流量的5%),其变化与宜昌—汉口水位差基本同步(图7c),但由于顶托作用较小,两者的同步程度相对较低;(4)汉湖河段受鄱阳湖入汇顶托的影响(入汇流量(湖口站)约为干流流量的20%),平滩流量的变化过程与宜昌—九江水位差保持同步(图7d)。图8b给出了汉湖河段九江站典型年份的水位—流量关系曲线。由图可知,2016年长江发生特大洪水,鄱阳湖宣泄不畅,顶托上游干流水位,使得九江站水位—流量关系曲线明显抬升,汉湖河段的过流能力显著减小。

综上所述,长江中游平滩流量的调整受区间支流入汇顶托的影响显著,故其与河床沿程冲刷未呈现较为一致的变化趋势;此外,过流能力调整还受到河床阻力等其他因素影响,一方面是由于床沙粗化造成的动床阻力变化,另一方面为植被生长导致的洲滩植被阻力增大。

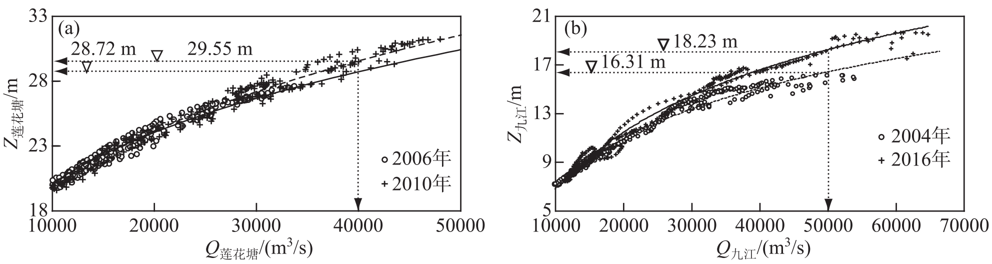

图8 长江中游河段典型年份出口站水位—流量关系曲线:(a) 莲花塘站;(b) 九江站

Fig.8 Stage-discharge rating curves at the outlet stations in specific years in the middle Yangtze River: (a) Lianhuatang Station; (b) Jiujiang Station

5 结论

三峡水库蓄水后,下泄沙量急剧减小,长江中游河道发生普遍冲刷,且呈自上而下的发展趋势。本章从平面形态、断面形态及过流能力调整等方面,比较了长江中游不同河段沿程演变差异,并阐述了产生差异的主要原因。结论如下:

1)平面形态方面,长江中游岸线崩退及洲滩变形的强度均呈沿程减弱趋势,且在荆江河段最为显著。关于岸线崩退,不同河段崩岸强度因水流冲刷强度和河岸组成条件不同而存在较大差异。关于洲滩变形,2003—2018年间荆江河段和汉湖河段江心洲出露面积分别减小约19%和5%,而在城汉河段出露面积增大4%。

2)断面形态方面,平滩河槽形态参数增幅在宜枝下段>荆江河段>宜枝上段>城汉河段>汉湖河段。理论上距离三峡工程最近的河段冲刷应最为剧烈,但宜枝上段平滩河槽形态参数增幅均小于下段。究其原因,主要是由于上段床沙粗化显著,限制了冲刷的进一步发展。但断面形态调整幅度总体呈沿程递减趋势,这是因为在河床持续冲刷过程中,水流含沙量沿程恢复,故越往下游冲刷相对缓慢。

3)过流能力方面,平滩流量大小表现为宜枝河段>汉湖河段>城汉河段>荆江河段。由于宜枝段距离洞庭湖较远,并未受到入汇顶托作用,故其平滩流量的调整基本由进口水沙条件控制,随着河床的冲刷下切,呈逐年增大的趋势。对于荆江、城汉和汉湖河段,河床虽显著冲刷,但支流或湖泊的入汇顶托对平滩流量产生的影响大于河床冲刷,故平滩流量基本随上下游水位差同步波动,并未出现单向的变化趋势。

6 附录

附表Ⅰ和Ⅱ见电子版(DOI: 10.18307/2023.0220)。

7 参考文献

[1] Yang YP, Zhang MJ, Sun ZH *et al*. Characteristics and reason of riverbed evolution difference in the middle Yangtze River based on river unit model. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2018, **26**(1): 70-84. DOI: 10.16058/j.issn.1005-0930.2018.01.007. [杨云平, 张明进, 孙昭华等. 基于河段单元尺度长江中游河床形态调整过程及差异性研究. 应用基础与工程科学学报, 2018, **26**(1): 70-84.]

[2] Xia JQ, Zhou MR, Xu QX *et al*. Bank collapse and river bed adjustment in middle Yangtze River after operation of Three Gorges Project. *Yangtze River*, 2020, **51**(1): 16-27. [夏军强, 周美蓉, 许全喜等. 三峡工程运用后长江中游河床调整及崩岸特点. 人民长江, 2020, **51**(1): 16-27.]

[3] 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. DOI: 10.16058/j.issn.1005-0930.2015.02.004. [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.]

[4] Yao SM, Lu JY. Evolution analysis and scouring-deposition prediction of middle and lower reaches of Yangtze River. *Yangtze River*, 2013, **44**(23): 22-28. [姚仕明, 卢金友. 长江中下游河道演变规律及冲淤预测. 人民长江, 2013, **44**(23): 22-28.]

[5] Xia JQ, Deng SS, Lu JY *et al*. Dynamic channel adjustments in the Jingjiang Reach of the Middle Yangtze River. *Scientific Reports*, 2016, **6**: 22802. DOI: 10.1038/srep22802.

[6] Li DF, Lu XX, Chen L *et al*. Downstream geomorphic impact of the Three Gorges Dam: With special reference to the channel bars in the Middle Yangtze River. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2019, **44**(13): 2660-2670. DOI: 10.1002/esp.4691.

[7] Dou GR. Riverbed morphology of alluvial rivers and tidal estuaries. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1964, (2): 1-13.[窦国仁. 平原冲积河流及潮汐河口的河床形态. 水利学报, 1964, (2): 1-13.]

[8] Chen XJ, Hu CH. Regime theory on river bed evolution and its application in the Lower Yellow River. *Journal of Sediment Research*, 2006, (3): 14-22. [陈绪坚, 胡春宏. 河床演变的均衡稳定理论及其在黄河下游的应用. 泥沙研究, 2006, (3): 14-22.]

[9] Wu BS. Delayed response model for fluvial processes of alluvial rivers—Ⅰ model development. *Journal of Sediment Research*, 2008, (6): 1-7. [吴保生. 冲积河流河床演变的滞后响应模型——Ⅰ模型建立. 泥沙研究, 2008, (6): 1-7.]

[10] Shin YH, Julien PY. Changes in hydraulic geometry of the Hwang River below the Hapcheon re-regulation Dam, South Korea. *International Journal of River Basin Management*, 2010, **8**(2): 139-150. DOI: 10.1080/15715121003651252.

[11] 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*, 2012, **179**: 126-140. DOI: 10.1016/j.geomorph.2012.05.034.

[12] Guo XH, Qu G, Liu Y *et al*. Sediment transport of different particle size groups in the downstream channel after operation of the Three Gorges Project. *J Lake Sci*, 2020, **32**(2): 564-572. DOI:10.18307/2020.0226.[郭小虎, 渠庚, 刘亚等. 三峡工程运用后坝下游河道泥沙输移变化规律. 湖泊科学, 2020, **32**(2): 564-572.]

[13] Xu QX, Li SX, Yuan J *et al*. Analysis of equilibrium sediment transport in the middle and lower reaches of the Yangtze River after the impoundment of the Three Gorges Reservoir. *J Lake Sci*, 2021, **33**(3): 806-818. DOI:10.18307/2021.0316. [许全喜, 李思璇, 袁晶等. 三峡水库蓄水运用以来长江中下游沙量平衡分析. 湖泊科学, 2021, **33**(3): 806-818.]

[14] Lyu YW, Zheng S, Tan GM *et al*. Effects of Three Gorges Dam operation on spatial distribution and evolution of channel thalweg in the Yichang-Chenglingji Reach of the Middle Yangtze River, China. *Journal of Hydrology*, 2018, **565**: 429-442. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2018.08.042.

[15] 长江水利委员会水文局. 2018 年度三峡水库进出库水沙特性、水库淤积及坝下游河道冲刷分析. 武汉: 长江水利委员会水文局, 2019.

[16] Xia JQ, Zhou MR, Lin FF *et al*. Variation in reach-scale bankfull discharge of the Jingjiang Reach undergoing upstream and downstream boundary controls. *Journal of Hydrology*, 2017, **547**: 534-543. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2017.02.026.

附表 I 选用的长江中游遥感影像信息

Attached Tab. I Description of the selected Landsat images in the Middle Yangtze River

荆江河段		城汉河段		汉九河段	
时间	枝城站水位/m	时间	螺山站水位/m	时间	汉口站水位/m
2004-04-08	35.94	2003-11-01	19.72	2003-12-20	13.29
2005-04-27	36.26	2004-12-05	19.44	2005-01-31	13.58
2006-02-25	36.28	2006-03-30	19.88	2005-12-17	13.22
2006-11-08	36.49	2007-05-20	19.94	2007-04-11	13.17
2008-03-26	36.31	2009-04-15	20.24	2008-12-17	13.36
2008-12-31	35.91	2010-12-22	19.82	2010-03-26	13.06
2009-10-15	36.61	2012-03-14	20.30	2011-01-08	13.43
2010-12-05	35.83	2014-12-01	19.70	2014-03-05	13.59
2013-04-10	35.82	2016-03-01	19.02	2015-01-03	12.51
2013-10-10	36.40	2016-11-04	20.08	2016-02-15	13.36
2016-02-05	36.24	2018-04-16	19.62	2017-01-24	13.57
2016-12-05	36.51	2018-11-02	20.45	2018-02-12	13.54
2019-03-25	36.86	2020-03-04	19.94	2018-12-13	13.61
2020-04-28	36.27			2019-11-14	13.97

附表 II 三峡工程运用后长江中游河道断面形态和过流能力变化

Attached Tab. II Variation in cross-sectional geometry and discharge capacity in the Middle Yangtze River after the operation of Three Gorges Project

特征参数	年份	宜枝河段		荆江段	城汉段	汉湖段
		宜枝上段	宜枝下段			
$\overline{W}_{bf}$ /m	三峡建成初期	1164	1154	1341	1710	1691
	2018	1166	1162	1368	1732	1697
	增幅	0.17%	0.69%	2.01%	1.29%	0.35%
$\overline{H}_{bf}$ /m	三峡建成初期	19.02	18.40	13.58	16.47	17.69
	2018	20.61	23.48	15.27	17.82	18.70
	增幅	8%	28%	12%	8%	6%
$\overline{A}_{bf}$ /m^2	三峡建成初期	22135	21246	18214	28166	29911
	2018	24033	27289	20898	31061	31755
	增幅	9%	28%	15%	10%	6%
$\overline{\xi}_{bf}$	三峡建成初期	61	63	99	104	96
	2018	56	49	90	98	91
	增幅	-8%	-22%	-9%	-6%	-5%
$\overline{Q}_{bf}$ /(m^3/s)	最小值	67990		32610	43050	42450
	最大值	76476		38950	47480	56890
	变幅	12%		19%	10%	34%