

三峡水库 175 m 蓄水后库尾河段减淤调度 控制指标研究

朱玲玲¹, 葛 华², 董炳江¹, 杨成刚¹

(1. 长江水利委员会水文局, 武汉 430010; 2. 长江水利委员会长江科学院, 武汉 430010)

摘要: 重庆主城区河段河道泥沙冲淤事关防洪、航运及码头作业等, 是三峡水库泥沙问题的重点内容之一。本文依据原型观测资料, 以三峡水库 175 m 试验性蓄水前后河段的泥沙冲淤规律为基础, 结合河床组成分析和一维数学模型, 计算提出河段悬移质泥沙走沙基本条件, 并应用于减淤调度实践中。结果表明: ① 三峡水库 175 m 试验性蓄水后至 2012 年重庆主城区河段河床冲刷强度下降, 主走沙期推迟至汛前消落期, 2013 年后上游来沙减少使得河床冲刷强度再次增大; ② 当寸滩站流量大于 4000 m³/s、坝前水位低于 167 m 时, 河段开始走沙; 当寸滩站流量增大至超过 5000 m³/s、坝前水位下降至 163 m 时, 河段走沙能力增强; 加大水库自 163 m 水位的消落速度, 能够避免库尾河段产生累积性淤积。

关键词: 重庆主城区河段; 主走沙期; 走沙条件; 减淤调度

DOI: 10.11821/dlxb202101009

1 前言

三峡工程设计论证阶段, 曾开展了大量关于水库变动回水区泥沙冲淤对航运的影响和回水末端的洪水位抬高等问题的研究, 重庆主城区河段泥沙冲淤的研究以模型成果居多^[1-4], 大多认为随着坝前水位的抬高, 汛后河段水位壅高明显, 比降、流速减小, 挟沙能力减弱, 泥沙落淤, 最终会使得洪水位抬高, 影响港区作业及通航条件^[5]。三峡水库 175 m 试验性蓄水后, 回水末端上抵江津附近, 重庆主城区河段位于变动回水区, 河道水动力条件受坝前水位影响, 走沙(泥沙往下游输移)期推迟、历时缩短以及河床冲刷强度下降等现象开始显现^[6]。针对保证重庆主城区河段较少和较缓淤积的目标, 对优化水库调度提出可控的指标性建议, 将是保障河道的防洪安全、航运条件及码头正常作业的重要手段之一。

三峡水库 175 m 试验性蓄水以来至 2012 年, 河段未出现明显的累积淤积现象^[7], 但走沙期缩短、推迟、冲刷强度下降均与已有成果较为相符。然而自 2013 年开始, 金沙江中下游梯级电站相继运行并产生较强的拦沙作用^[8], 三峡入库泥沙大幅减少^[9], 库尾河段冲刷强度再次加大, 与三峡水库运行 30 a 后仍呈累积性泥沙淤积的预测结果不符^[10]。以往研究还提出河段淤积将主要发生在年内的 10 月—次年 5 月, 消落冲刷则集中在汛期

收稿日期: 2019-06-25; 修订日期: 2020-11-10

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0402101); 三峡工程泥沙重大问题研究(ZZ2018013001F); 中国长江三峡集团有限公司科研项目(0704166) [Foundation: National Key R&D Program of China, No.2016YFC0402101; Research on the Major Sediment Problems of the Three Gorges Project, No.ZZ2018013001F; Scientific Research Project of China Three Gorges Group Co. Ltd, No.0704166]

作者简介: 朱玲玲(1984-), 女, 江西鄱阳人, 博士, 高级工程师, 主要从事泥沙输移及河道演变方面研究。

E-mail: Zhull1012@foxmail.com

6—9月^[1];实际上汛期河段仍表现出较强的河道属性,延续了天然情况下淤积为主的规律^[11-12],汛后受水库蓄水抬高水位的影响,走沙强度下降,而汛前消落期则成为主走沙期^[13]。此外,结合河道主走沙期和来水来沙条件,基于控制性指标和水库优化调度,加大河道的走沙强度,以往研究则少有涉及。本文利用持续更新的水沙及河道形态观测资料,研究了三峡水库175 m试验性蓄水前后重庆主城区河段泥沙冲淤的变化规律,给出河道的主走沙期,并基于库区一维河网水动力模型、河床组成分析和泥沙起动条件计算等,以来流条件和三峡水库坝前水位及其消落速度为主要指标,初步提出了保证河段走沙强度的基本条件。最后,通过对实际减淤调度效果的总结,检验了走沙条件的合理性,可为三峡水库优化调度和重庆主城区河段的综合治理提供参考。

1 研究区域及数据源

1.1 研究区域

重庆主城区河段全长约60 km,其中长江干流段自大渡口至铜锣峡,长约40 km;嘉陵江段自井口至朝天门,长约20 km。河段呈连续弯曲的河道形态,宽窄相间,岸线参差不齐,岸边常有石嘴突出(图1)。河段自然岸坡和人工岸坡长度分别占比63.5%和36.5%^[14],且近期仍不断有滨江工程实施。河床边界主要由基岩和覆盖层组成,以基岩为总体框架,部分基岩表面上堆积着厚度不一的覆盖层。河段内洲滩较多,洲滩主要由粒径大于10 mm的卵石组成^[15]。三峡水库围堰蓄水期和初期运行期内,坝前水位不超过156 m,河段尚处于天然状态;水库175 m试验性蓄水后,回水末端抵达江津附近,河段位于变动回水区內。

重庆主城区河段水沙来自长江干流和嘉陵江,干流和嘉陵江的水沙分别由寸滩站和北碚站控制。三峡水库蓄水前,寸滩站年内7—9月径流量和输沙量分别占全年的75%和78%,泥沙输移以悬移质为主,推移质年输沙量仅占悬沙的0.11%。嘉陵江年内洪、枯流量比可达200~300倍,多年平均悬移质输沙量约占寸滩站的1/3。三峡水库蓄水以来(2003—2017年)基本为中小水年,加之2010年开始金沙江中下游梯级电站陆续运行,

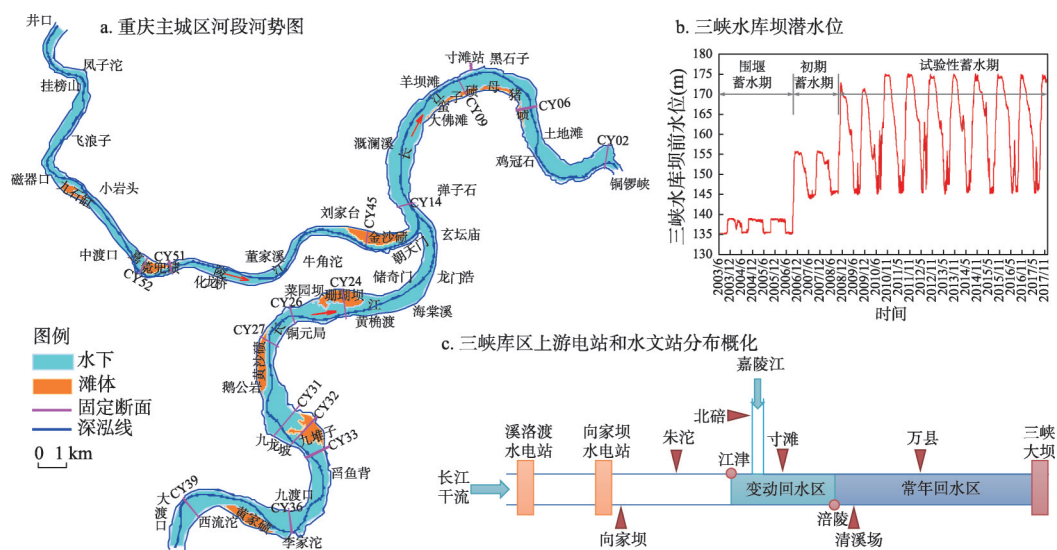


图1 2003—2017年重庆主城区河段河势及三峡水库坝前水位变化

Fig. 1 River regime of Chongqing reach and the water level changes in front of Three Gorges Dam

拦截了金沙江的来沙,与2002年前相比,寸滩站年径流量和输沙量分别偏少5.9%和66.6%;北碚站年径流量和输沙量分别偏少3.9%和78.3%,输沙量占寸滩站的比例降至17.7%。相较于推移质泥沙输移量,尽管河段悬移质泥沙来量大幅减少,但仍然是河床冲淤的主体部分。

1.2 数据源及研究方法

三峡水库蓄水后,库尾重庆主城区河段一直是重点观测对象,积累了大量的原观资料。本文冲淤规律分析主要基于固定断面观测和采砂调查资料(用于冲淤量计算中扣除采砂量),床沙组成资料用于计算泥沙起动/止动条件。向家坝、朱沱、寸滩和北碚站为河段及上游干、支流来水来沙条件的控制站。观测资料均来源于长江委水文局。

三峡水库175 m试验性蓄水后,重庆主城区河段位于变动回水区,年内水库蓄水期及消落期河道水力条件显著改变,相应泥沙冲淤特性也发生变化^[16]。因此,河道冲淤规律应区分天然状态和试验性蓄水期两个时段进行对比研究。河道走沙条件的研究主要是基于河床组成的分析调查,选用合适的泥沙起动和止动流速计算公式,结合三峡水库库区一维水流数学模型,通过水力计算,提出满足河床悬移质泥沙起动的基本条件。最后对照河道实际冲淤和减淤调度的效果,以河段来流条件、三峡水库坝前水位及其日均消落幅度为指标,综合提出满足河段泥沙输移的基本条件。

河床上的泥沙往下游输移首先要满足起动条件。用来表示泥沙起动条件的参数主要有两个:一是起动流速;二是起动拖曳力。在工程实践中,起动拖曳力中包括不易测量的比降,流速易于测量且精度较高,也可以通过数值模拟计算获得,常常被用来判断泥沙是否能够起动。结合2009年以来床沙组成测量成果来看,重庆主城区河段河床组成泥沙颗粒的中值粒径变化范围为0.01~173 mm,级配较宽,非均匀性强,在相同的水力条件下,不同粒径组的泥沙起动数量不同。因此,本文在选择泥沙起动流速计算公式时充分考虑到研究河段的这种属性,采用文献[17]的公式进行泥沙分级起动流速计算,沿程各断面的水力特性基于一维数学模型计算成果。起动流速计算公式具体形式如下:

$$U_{ck} = 1.14 \times \sqrt{\frac{1}{f}} \times \sqrt{\frac{\rho_s - \rho}{\rho} \times g \times D_k \times \left(\frac{h}{D_m}\right)^{1/6}} \quad (1)$$

式中: f 为非均匀沙修正系数; ρ_s 、 ρ 分别为泥沙和水的密度; g 为重力加速度; D_k 、 D_m 分别为分级和平均粒径; h 为水深;当泥沙为均匀沙时, f 取值为1, $D_k = D_m$, 该式与沙莫夫公式一致。

文中除寸滩站以外,研究河段其他断面的水力要素均采用一维数学模型计算。考虑三峡库区175 m蓄水后,回水末端上延至江津附近(距大坝约660 km),数学模型的计算范围上至朱沱,下至坝址,库区干流长约760 km,同时模型采用汉点结构,考虑嘉陵江、乌江等13条支流的入汇情况。本文研究不涉及动床及泥沙冲淤的计算,模型基于2011年库区的实测地形,干支流入口均为实测流量,模型出口距三峡大坝800 m,采用坝前实测水位,模型对于重庆主城区河段内寸滩站流量、水位的模拟情况如图2。该模型模拟精度较高,已经成功地运用于三峡水库入、出库泥沙预报和排沙调度实践中^[18]。

2 库尾河段泥沙冲淤规律

2.1 库尾河段水力特性变化规律

2008年10月后三峡水库进入175 m试验性蓄水期,变动回水区范围进一步上延,重庆主城区河段演变显现出天然河道和水库的双重属性。与天然情况相比,175 m试验性

蓄水期河段内水力特性受坝前水位影响明显。分别以 2007 年和 2012 年为例进行对比分析(图 3、表 1)。天然状态下寸滩站水位流量呈单一线性关系,水面比降主要与来流条件有关,嘉陵江河口段和长江干流段(朝天门以上)的比降因两江汇流情况而改变,长江干流段(朝天门以下)受铜锣峡卡口作用,比降相对较小;年内比降呈汛期最小、汛前枯水期最大的特点,长江干流(朝天门以上)和嘉陵江汛期水面比降小于年均值的时间均比非汛期明显偏长,与河段“汛淤枯冲”的规律相呼应。2012 年受水库回水影响,汛期消落期及汛后蓄水期内,相较于 2007 年寸滩站同流量水位明显抬升,河道内水面比降整体减小,断面平均流速均小于 1 m/s,不足天然状态下的 1/2;汛期水位流量关系恢复,河道水面比降最大,与试验性蓄水前恰相反,同时由于长江上游来流偏大,三峡水库坝前水位均值同期较 2007 年偏高近 10 m,因而水面比降较之偏小;非汛期坝前水位均值同期较 2007 年偏高 14 m 以上,河道水面比降显著减小,且汛前消落期的比降大于汛后蓄水期。各河段水面比降小于年平均值的持续时间明显延长,均超过 310 d。

三峡水库 175 m 试验性蓄水后,重庆主城区河段出口边界水位抬高,水面比降、流速等受回水影响而变化,进而影响水流挟带泥沙的能力和冲淤规律。为直观反映这种变化过程,图 4 给出了 2007 年、2012 年年内寸滩站水流挟沙力指标(u^3/h)与实测含沙量的对比关系。不难看出,175 m 试验性蓄水前,河道的水力特性主要受边界和来流的影响。在上游来流不超过 5000 m³/s 时,随着来流增大,水流挟带泥沙的能力迅速增大,

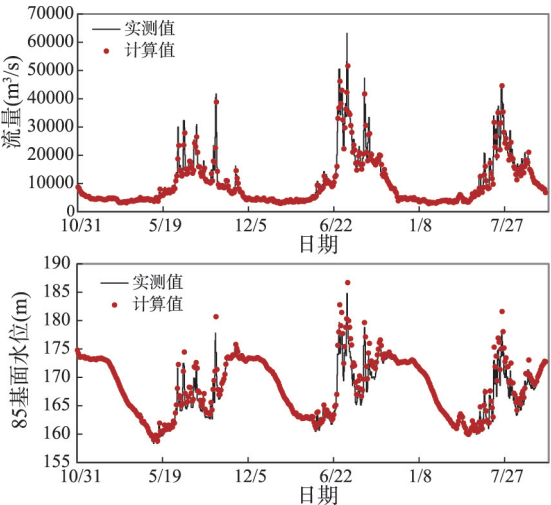


图2 2010年11月—2013年10月一维数学模型计算寸滩站流量和水位验证

Fig. 2 Verification of flow rate and water level of Cuntan station by one-dimensional mathematical model

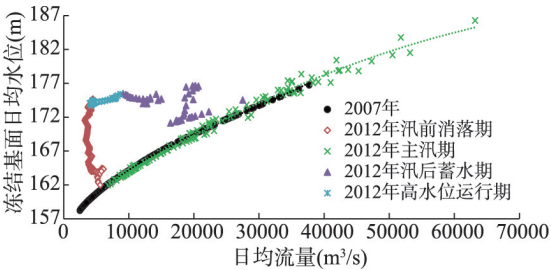


图3 2007年和2012年寸滩站日均水位流量关系

Fig. 3 Relationship between average daily water level and average daily flow in 2007 and 2012

表 1 2007 年和 2012 年三峡水库库尾重庆主城区河段水面比降和流速对比

Tab. 1 Comparison of water surface gradient and average velocity of Chongqing reach in 2007 and 2012

年份	时段(月)	寸滩站		坝前 水位(m)	水面比降					
		流量 (m³/s)	断面平均 流速(m/s)		长江干流 (朝天门以上) (‰)	< 0.25‰ 历时(d)	长江干流 (朝天门以下) (‰)	< 0.15‰ 历时(d)	嘉陵江段 (‰)	< 0.15‰ 历时(d)
2007	1—5	3910	1.76	151.74	0.313	0	0.145	98	0.236	13
	6—9	18800	2.39	144.67	0.224	74	0.154	50	0.085	91
	10—12	7900	2.08	154.69	0.286	15	0.132	88	0.170	30
2012	1—5	4860	0.792	166.08	0.109	132	0.030	152	0.053	133
	6—9	23300	2.53	154.53	0.203	90	0.138	92	0.060	107
	10—12	8400	0.806	173.80	0.029	92	0.015	92	0	92

此时上游来流的含沙量较小,河床往往处于冲刷状态,这种条件无论在汛前还是汛后都可以满足;当来流继续增大至 $5000 \text{ m}^3/\text{s}$ 以上时,河道的卡口形态开始发挥壅水作用,水深增大的速度较流速更快,水流挟带泥沙的能力缓慢下降,期间在来流不超过 $15000 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,来流含沙量较小,水流仍有足够的挟带能力;当来流由 $15000 \text{ m}^3/\text{s}$ 进一步增大,含沙量增大至超过水流挟带能力,泥沙开始在河床落淤。因此,天然状态的河床“高水落淤、低水冲刷”。2012年挟沙力与含沙量的关系发生改变,与2007年的区别集中体现在汛后蓄水期,尽管河道水流挟带泥沙的能力也随来流增大,但绝对值偏小,不足以挟带来沙,泥沙冲刷能力减小。汛期水流挟沙力指标与来流的关系得到保持,但来流含沙量显著下降,由此可能导致汛期泥沙不淤或者少淤。因此,175 m 试验性蓄水后,重庆主城区河段必然出现“汛期淤积减少、汛后走沙减弱”的现象。

2.2 库尾走沙量及年内变化规律

从实测河道冲淤量来看,天然情况下(2003年5月—2008年9月),重庆主城区河段总体以冲刷为主,冲淤主要受来水来沙条件及河床边界形态的影响。河床冲淤的规律性较强,年内的“洪淤枯冲”可概括为年初至汛初冲刷、汛期淤积、汛末及汛后冲刷等3个阶段,具有明显的周期性,与上文分析的挟沙力指标和含沙量的对应关系十分吻合。汛末及汛后是河段的主走沙期,年均泥沙冲刷强度可以达到 $300 \text{ 万 m}^3/\text{a}$,年初至汛初为次走沙期,年均泥沙冲刷强度约 $103 \text{ 万 m}^3/\text{a}$,走沙期内长江干流的走沙强度较嘉陵江段偏大(表2,消落期统计时段为年底12月—次年5月或6月,汛期为5月或6月—9月,蓄水期为9月—12月)。

三峡水库175 m试验性蓄水后,重庆主城区河段比降、水位、挟沙力指标等水力因素发生变化。与此同时,2012年开始金沙江下游向家坝、溪洛渡水电站相继建成运行,显著改变了进入三峡水库的泥沙条件,泥沙输移总量及颗粒级配都发生变化^[9]。上、下游水库的运行,改变了重庆主城区河段的进、出口边界条件,水流挟带泥沙的能力与含沙量的对应关系发生变化,河床的冲淤规律逐步显现出这两方面的综合影响。

首先,在来水来沙变化不大的情况下,三峡水库坝前水位抬高使得重庆主城区河段冲刷强度下降,走沙期推迟。三峡水库初期蓄水期2003—2007年河床年均泥沙冲刷量为 $218 \text{ 万 m}^3/\text{a}$;水库175 m试验性蓄水后2008年9月—2012年10月河段虽然总体仍呈冲刷态势,但年均冲刷量下降至 $57.1 \text{ 万 m}^3/\text{a}$,相较于天然状态减小73.8%。2010年、2011年汛后蓄水期连续出现淤积,汛后蓄水期的平均走沙强度一度下降至 $4.72 \text{ 万 m}^3/\text{a}$,主走沙期推迟至汛前消落期,其平均走沙强度为 $128 \text{ 万 m}^3/\text{a}$ 。

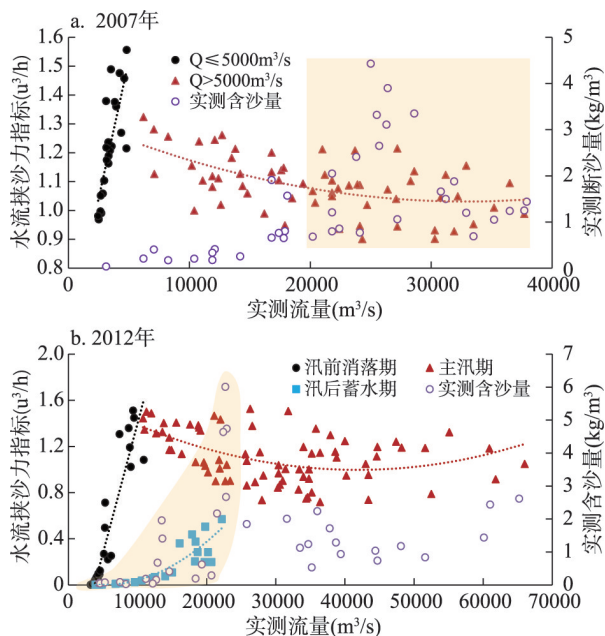


图4 三峡水库175 m试验性蓄水前后寸滩站
实测挟沙力指标及含沙量变化

Fig. 4 Variations of sediment carrying capacity index and sediment concentration at Cuntan station in 2007 and 2012

表 2 2003—2017 年不同时期重庆主城区河段冲淤量统计表(m³/a)
Tab. 2 Scouring and silting of Chongqing reach between 2003 and 2017

时期	消落期			汛期			蓄水期		
	长江干流	嘉陵江	全河段	长江干流	嘉陵江	全河段	长江干流	嘉陵江	全河段
2003 年				294	75.6	370	108	-135	-27.0
2004 年	-541	-23.4	-564	658	66.3	725	-527	-143	-670
2005 年	-95.3	42.9	-52.4	407	153	560	-555	-258	-812
2006 年	-63.8	40.7	-23.1	116	-68.8	47.5	-26.9	13.1	-13.8
2007 年	-120	36.1	-84.0	19.1	-67.2	-48.1	49.9	-27.3	22.6
2008 年	185	24.1	209	224	57.6	281	-62.0	-66.8	-129
2009 年	-107	-18.2	-125	-17.3	57.0	39.7	-5.50	-72.2	-77.7
2010 年	86.5	94.3	181	114	-154	-40.4	65.8	139	205
2011 年	-198	-65.9	-264	0.800	16.8	17.6	66.3	19.4	85.7
2012 年	-230	-72.6	-302	198	91.8	289	-127	18.9	-108
2013 年	-273	-57.0	-330	-86.1	-53.8	-140	-185	8.1	-177
2014 年	-232	-78.0	-310	148	-3.3	145	-328	-7.00	-335
2015 年	-198	-53.7	-251	192	84.6	277	-162	-46.6	-209
2016 年	46.4	-43.8	2.6	-132	-1.4	-133	11.4	22.6	34.0
2017 年	-87.0	-17.0	-104	-90.0	29.0	-62.0	40.0	-10.0	30.0
2003 年 5 月—2008 年 9 月 (三峡水库初期运行期)	-635	120	-515	1720	216	1940	-951	-550	-1500
2008 年 9 月—2017 年 12 月 (三峡水库试验性蓄水期)	-1190	-312	-1500	328	66	393	-685	5.7	-679
2012 年 10 月—2017 年 12 月 (金沙江下游梯级电站运行后)	-742	-250	-992	33	55	87	-623	-33	-656

其次，金沙江中下游梯级水库运行后，河段来沙量大幅减少，重庆主城区河段冲刷强度再次加大。金沙江是三峡水库入库泥沙最主要的来源^[19]，其下游溪洛渡（2013 年 5 月初期蓄水）、向家坝（2012 年 10 月初期蓄水）水电枢纽蓄水后，出库向家坝站 2013—2017 年平均输沙量仅 170 万 t，较 2003—2012 年输沙量均值减少 98.8%。三峡入库泥沙因此大幅减少，朱沱站、寸滩站 2013—2017 年平均悬移质输沙量分别为 3790 万 t、5660 万 t，与 2003—2012 年均值相比分别减少 77.4%、69.7%，与试验性蓄水期 2008—2012 年均值相比也分别偏少 75.7%、68.5%，而径流量均变化不大（图 5）。来沙量大幅减少使得 2012 年 10 月—2017 年 12 月重庆主城区河段累积冲刷约 1560 万 m³，年均冲刷量达 312 万 m³/a，甚至超过河段天然状态下的冲刷强度。年内仅汛期微淤，汛后蓄水期冲刷强度为 131 万 m³/a，汛前消落期冲刷强度为 198 万 m³/a，仍能体现出主走沙期推迟的变化规律（表 1）。可见，来沙量大幅减少是 2012 年以来河段冲刷强度加大的主要原因。

第三，汛后河段的走沙强度下降，汛前消落期成为河段的主走沙期。汛期三峡水库坝前水位因调洪需要而降低，河道处于天然状态，同时输沙仍集中在汛期，汛期河段泥沙仍以淤积为主。2009 年、2011 年、2012 年、2014 年及 2015 年汛期河段都出现淤积，2008 年 9 月以来，汛期泥沙淤积总计 393 万 m³；汛后蓄水期，坝前水位逐渐壅高，河道走沙期推迟、历时缩短，两者综合影响下，2010 年、2011 年、2016 年和 2017 年蓄水期河段均出现淤积，与天然状态下大幅冲刷形成鲜明对比，总体上 2008—2017 年汛后平均冲刷 67.9 万 m³/a，较 2003—2007 年同期均值偏小 77.4%。主走沙期推迟至汛前消落期，2009—2017 年汛前平均冲刷量为 167 万 m³/a，明显比汛后蓄水期冲刷强度大，较 2003—2007 年同期均值偏大 62.1%，这与 2012 年之后河段来沙量大幅减少密切相关。

2.3 库尾河段主走沙区分布特征

三峡水库蓄水初期,重庆主城区河段共布置有60个固定观测断面(长江干流40个,嘉陵江河口20个),之后根据冲淤特征适当调整和加密至65个。通过对这些断面冲淤变化及河床组成的分析,可以判断出河段内的悬移质泥沙的走沙区域。河段河床组成以卵砾石为主,分布悬移质泥沙的断面较少,主要有CY02、CY06、CY14、CY24、CY26、CY32、CY33、CY36、CY52等。河道两岸因城市建设常实施滨江工程及航道整治工程,采砂活动也较为频繁。断面冲淤调整情况较为复杂,可分为3类:①断面河床抗冲性强,年际间冲淤变化小(图6a~图6c),本底河床可冲物质较少,一般汛期有少量泥沙淤积,非汛期可冲刷带走,这类断面占比约41%;②发生在沙质断面的自然冲淤,冲刷和淤积的过程具有较好的连续性(图6d~6f),这类断面占比约20%;③抗冲性强的断面,但出现突发的大幅度冲淤调整(图6g~6i),多由人类活动造成,这类断面占比约39%。河道冲淤计算过程中初步扣除了第三类断面中

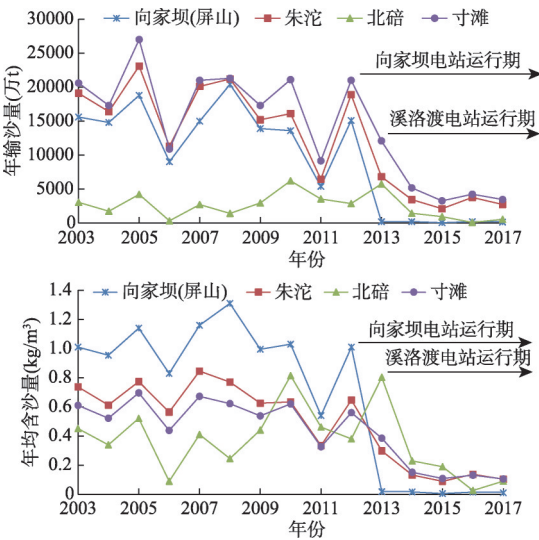


图5 2003—2017年金沙江及长江上游控制站输沙量和含沙量
Fig. 5 Sediment load and sediment concentration in Jinsha River and upper Yangtze River between 2003 and 2017

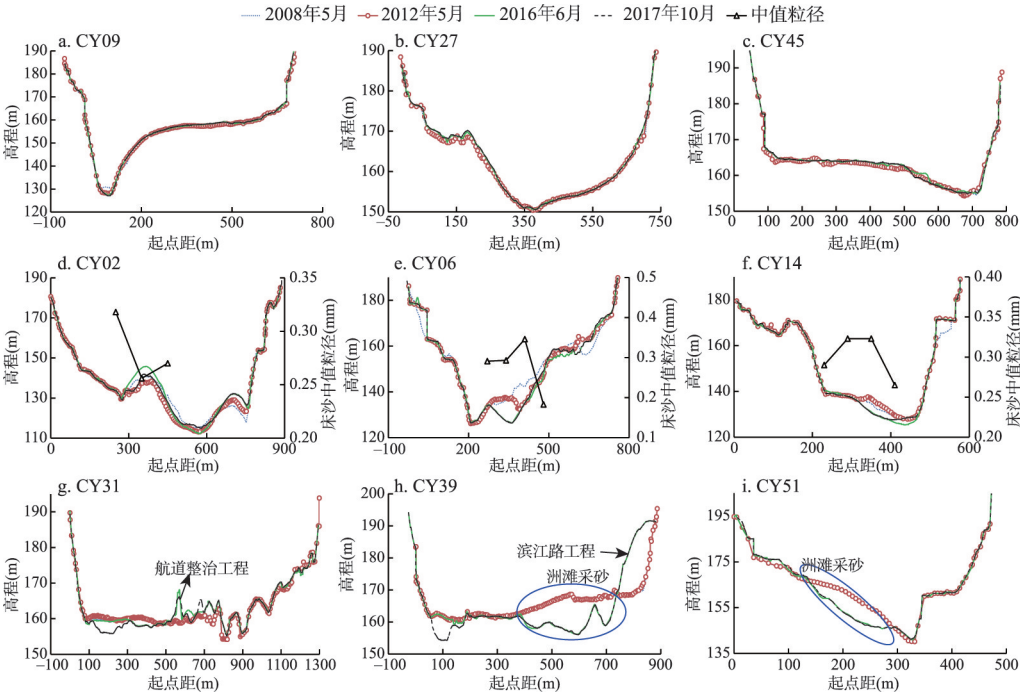


图6 2008—2017年重庆主城区河段典型断面冲淤变化
Fig. 6 Changes of scouring and silting of typical sections in Chongqing reach from 2008 to 2017

人类活动造成的变化量, 因此实际发生的冲淤量主要是集中在第二类断面, 因而河段悬移泥沙走沙基本条件也第二类断面为主要研究对象。

3 库尾河段减淤调度控制指标研究

3.1 悬移质泥沙走沙判别条件

通过计算出河段沿程各粒径级的泥沙起动流速, 并进一步与一维模型计算给出的断面平均流速进行对比, 可初步确定各粒径级泥沙起动的水流条件 (计算流程如图 7)。计算结果显示, 三峡水库 175 m 试验性蓄水后, 重庆主城区河段在蓄水期和消落期水深偏大 (图 8), 泥沙起动与水深成正比关系, 对于粒径大于 1.0 mm 的泥沙颗粒, 起动流速均超过 1.0 m/s。由于河段走沙主要集中在汛前消落期, 而 2009 年以来各年汛前消落期河段的断面平均流速均小于 1.0 m/s (图 8), 1.0~2.0 mm 的悬移质泥沙在消落期基本不满足起动条件。因此, 本文重点研究粒径小于 1.0 mm 的河床质泥沙。2009—2017 年的床沙取样结果表明, 河段内会发生自然冲淤的悬移质泥沙 (含 $d \leq 1.0$ mm 泥沙颗粒) 分布断面并不多。计算出这些断面的流速、水深等水力条件后, 初步对比泥沙起动和止动条件来看, 对于粒径大于 0.25 mm 的粗颗粒, 基本上在寸滩流量超过 4000 m³/s, 坝前水位低于 167 m 时, 能够满足起动条件, 流量越大, 坝前水位越低, 起动越容易; 对于粒径小于 0.25 mm 的细颗粒, 全时段基本都能够满足起动条件。

对应水力条件来看 (图 9), 以 2012 年为例, 在来流小于 5000 m³/s 或者坝前水位高于 163 m 时, 断面平均流速和来流及坝前水位都存在一定的相关关系, 但绝对值较小, 水流挟沙能力与流速的高次方成正比, 这种条件下水流挟带泥沙的能力很小。随着来流

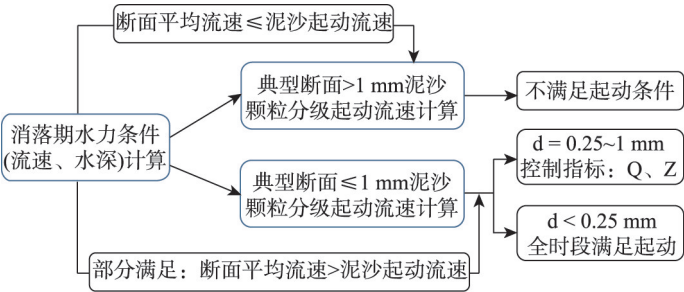


图 7 起动条件计算流程图
Fig. 7 Calculation flow chart of starting conditions

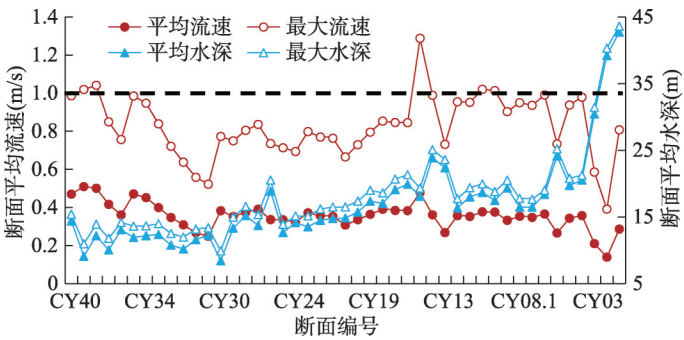


图 8 一维模型计算消落期河段流速及水深
Fig. 8 Flow rate and water level during the drawdown period of TGR calculated by one-dimensional model

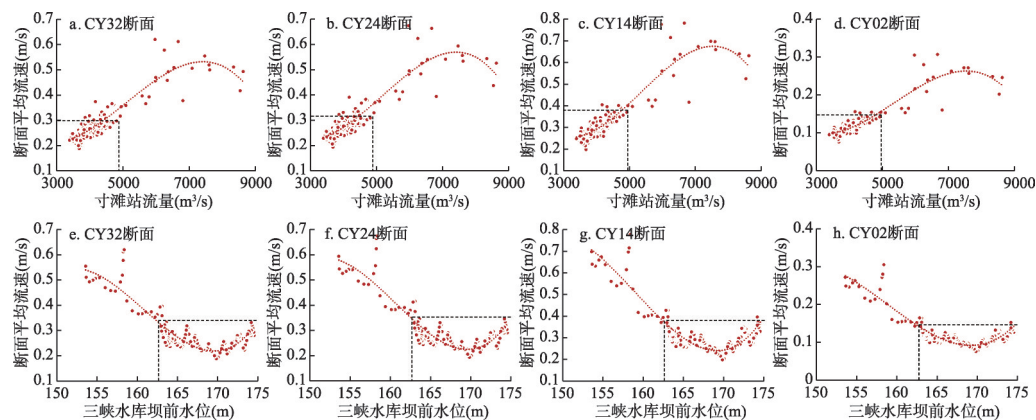


图9 2012年消落期内重庆主城区河段典型断面平均流速与来流和坝前水位相关关系

Fig. 9 Relationship between the mean flow rate of typical sections in Chongqing reach and the inflow rate and the water level in front of TGD in 2012

的进一步增大或坝前水位的下降，断面流速以较快的速度增大。但当流量增至一定范围或者坝前水位抬高至一定幅度后，河段出口会出现一定的卡口壅水增强现象，流速开始减小，河段内的流速随来流和坝前水位的变化出现拐点。综合水力条件自身的变化和满足泥沙起动两方面，可确定出满足泥沙走沙的初步条件为寸滩流量大于4000 m³/s，且坝前水位低于167 m。当寸滩流量由5000 m³/s逐步增大，而坝前水位由163 m继续消落时，河段的流速快速增大，走沙强度也相应增强。

对照重庆主城区河段走沙的初步条件，统计2009—2017年三峡水库分别自167 m和163 m消落期间，消落期的历时、水位日均消落幅度及河段来流来沙等情况如表3，当三峡水库坝前水位自167 m开始消落时，水位日均消落幅度越小，且来流量越小时，消落期的走沙强度也相应偏小，如2010年消落期持续时间长，日均消落幅度仅0.15 m，同时寸滩站来流小于4000 m³/s的历时达82 d，超过消落期总历时的55%，对应2010年消落期重庆主城区河段淤积泥沙181万m³；相反地，其他年份消落期坝前水位消落速度均较2010年偏大，且寸滩来流量小于4000 m³/s的历时偏短，消落期基本都呈现走沙的状态，

表3 三峡水库消落期内重庆主城区河段水沙条件统计
Tab. 3 Statistics of flow and sediment conditions in Chongqing reach during the drawdown period of TGR

年份	三峡水库坝前 167 m 水位以下						三峡水库坝前 163 m 水位以下						泥沙 冲淤量 (万 t)
	消落期 历时 (d)	日均 消落 幅度(m)	平均 流量 (m³/s)	最小 流量 (m³/s)	平均 含沙量 (kg/m³)	< 4000 m³/s 持续 时间(d)	消落期 历时 (d)	日均 消落 幅度(m)	平均 流量 (m³/s)	最小 流量 (m³/s)	平均 含沙量 (kg/m³)	< 4000 m³/s 持续 时间(d)	
2009	110	0.19	5250	3220	0.068	38	93	0.18	5510	3220	0.072	21	-125
2010	147	0.15	5190	2770	0.112	82	125	0.14	5640	2780	0.119	61	181
2011	109	0.20	5420	3870	0.071	2	76	0.23	5880	4030	0.078	0	-264
2012	102	0.21	6360	3750	0.121	17	43	0.40	9330	5180	0.160	0	-302
2013	124	0.18	6020	3600	0.125	23	62	0.29	7630	4100	0.167	0	-330
2014	131	0.16	6180	3360	0.083	6	50	0.34	7640	5240	0.146	0	-310
2015	105	0.21	6810	4530	0.042	0	54	0.32	7400	5860	0.048	0	-251
2016	111	0.19	8310	4580	0.243	0	73	0.18	12300	6310	0.252	0	2.6
2017	102	0.21	7030	4110	0.036	0	68	0.26	7810	4110	0.042	0	-104

仅2016年在来沙量(平均含沙量为 0.243 kg/m^3)较其他年份显著偏大的情况下,河段无明显走沙。总体上,这一时期,水位日均消落幅度变化较小,河道走沙量与来流成一定的正比关系(图10a),来流量越大,河段走沙量越大。当三峡水库坝前水位自163 m开始消落时,此时寸滩站来流量大多满足大于 $4000 \text{ m}^3/\text{s}$ 的要求,日均水位消落幅度与消落期走沙量呈现较好的相关关系(图10b),即坝前水位消落速度越大,河段走沙量越大。当坝前水位日均消落幅度 $\geq 0.3 \text{ m}$ 时,基本能够将上一年汛期和蓄水期淤积的泥沙冲刷殆尽;当日均水位消落幅度自 0.3 m 进一步增加时,受前期河床可冲刷的泥沙总量有限的影响,当日均水位消落幅度继续增大,走沙量却基本保持稳定。

三峡水库175 m试验性蓄水后,恰逢上游金沙江中游及下游梯级水电站陆续运用,拦截大量的泥沙^[8-9,20],导致三峡入库沙量大幅度减少。在不遭遇大沙年的情况下,消落期重庆主城区河段的含沙量基本都处于不饱和状态,小于水流的挟沙能力,因此含沙量的大小对于走沙强度的影响并不明显,如来沙条件较为相似的2012年和2013年、2015年和2017年,河段走沙量的差异多与来流和坝前水位消落幅度有关。

三峡水库175 m试验性蓄水后,重庆主城区河段的主走沙期推迟至汛前消落期,期间当寸滩站流量大于 $4000 \text{ m}^3/\text{s}$,坝前水位低于167 m时,河段的水力因素满足悬移质泥沙起动条件,河床开始进入走沙状态;当寸滩站流量增大至超过 $5000 \text{ m}^3/\text{s}$,坝前水位下降至163 m时,河段流速进入快速增大的阶段,走沙能力明显增强,若能将水库自163 m以下的日均水位消落幅度加大至 0.3 m 左右时,来流可以将上一年汛期淤积和汛后未能走完的泥沙全部冲走,可避免库尾河段产生累积性淤积。当三峡水库坝前水位日均降幅自 0.3 m 进一步增大至 0.4 m 时,库尾河段的冲淤量却不再明显增加,其主要原因在该河段河床本身可冲刷的悬移质泥沙并不多,其悬移质泥沙主要来源于汛期的淤积量。自2012年开始,伴随着金沙江及其他支流梯级水电站运行,三峡水库入库的泥沙量大幅减少,汛期库尾河段的泥沙淤积量也相应减少。因此,在当前的水沙条件下,若能保证消落期三峡水库坝前水位日均降幅在 0.3 m 左右,库尾河段出现累积性淤积的可能性较小。

3.2 减淤调度试验效果

结合上文的悬移质泥沙走沙控制性指标,2012年5月7日三峡水库在消落期适时开展了针对重庆主城区河段的第一次库尾减淤调度试验,至5月24日,坝前水位由161.92 m消落至154.05 m,消落幅度7.87 m,日均消落 0.46 m (表4)。期间,朱沱、寸滩站平均流量分别为 $5420 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $7570 \text{ m}^3/\text{s}$,为期17 d的调度期内河段冲刷泥沙 101 万 m^3 。与往年同期相比,库尾减淤调度期间的河床冲刷量明显增大,一方面三峡水库坝前水位消落幅

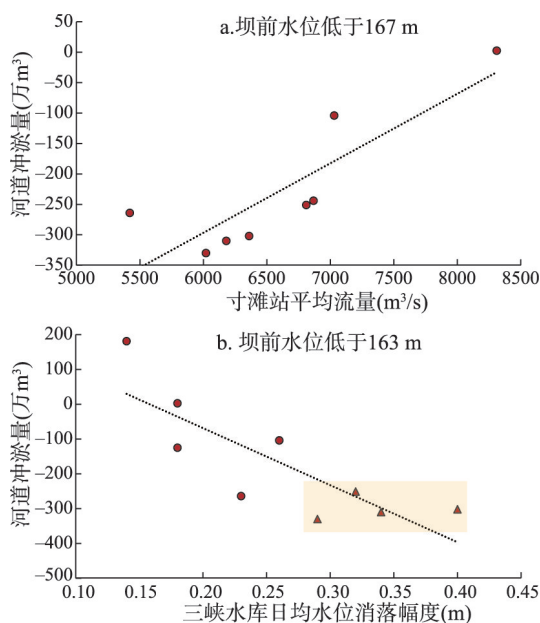


图10 三峡水库消落期重庆主城区河段冲淤量与来流及坝前水位日均降幅的相关关系

Fig. 10 Relationship between the amount of erosion and deposition in Chongqing reach and the inflow in front of TGD (a) and relationship between the amount of erosion and deposition and the daily average drawdown of water level (b)

表4 消落期有无减淤调度情况下重庆主城区河段泥沙冲淤量对比
Tab. 4 Sediment scouring and silting in Chongqing reach under the condition of
silt reduction operation of TGR

起止时间	三峡坝前水位(m)		水位消落 幅度(m)	水位日均消落 幅度(m/d)	寸滩站平均 流量(m³/s)	冲刷量 (10⁴m³)
	调度前	调度后				
2009.04.11—05.11	159.80	156.05	3.75	0.13	5590	48.3
2009.05.11—06.11	156.05	146.26	9.79	0.33	7460	-22.0
2010.05.11—05.25	156.18	151.81	4.37	0.29	7860	45.8
2011.04.22—05.18	158.56	154.53	4.03	0.16	5310	76.3
2012.05.07—05.24 (减淤调度期)	161.92	154.05	7.87	0.46	7570	-101
2013.05.13—05.20 (减淤调度期)	160.17	156.12	4.05	0.58	6320	-33.3

度较大、速度较快，拉动了河段的水流流速，其挟带泥沙的能力显著增强；另一方面也与期间上游来水偏大有关。2013年5月13—20日期间，三峡水库再次加大坝前水位日均消落幅度至0.58 m，以期加大库尾河段的走沙量，为期7天的调度期内重庆主城区河段冲刷泥沙33.3万m³，期间河段来流条件相较于2012年偏弱，因而日均走沙强度相对较2012年偏小，但较其他无减淤调度的年份仍明显偏大。可见，在满足河段泥沙走沙条件的前提下，以控制坝前水位消落速度的调度方式能够一定程度上加大库尾河段的走沙强度，若结合对于上游来水条件的准确预报，减淤调度能够达到较好的效果。

4 结论

(1) 三峡水库175 m试验性蓄水后至2012年，重庆主城区河段冲刷强度有所下降；金沙江下游水电站运行后，河段来沙量大幅减少，2012—2017年河床冲刷强度再次加大至超过天然状态。年内汛期仍以淤积为主，但淤积强度在下降，汛后河段的走沙强度下降，汛前消落期成为主走沙期。河床实际冲淤主要发生在悬移质泥沙断面，抗冲性较强的断面一般少有冲淤或是因人类活动影响而发生大幅变形。

(2) 重庆主城区河段消落期走沙控制指标主要包括来流条件、坝前水位及其日均消落幅度。当寸滩站流量小于4000 m³/s或坝前水位高于167 m，河段基本停止走沙；其后，随着来流的增大和坝前水位的降落，河段开始走沙；当寸滩站流量由5000 m³/s继续增大，坝前水位由163 m继续消落时，河段走沙能力增强。若能保证水库自163 m开始消落的日均幅度达到0.3 m，则可将河段前期淤积或未能走完的泥沙全部冲走。

(3) 2012年和2013年三峡水库消落期开展减淤调度，调度期内加大坝前水位自162 m以下的日均消落幅度达到0.46 m和0.58 m，充分满足河段的走沙条件，为期17 d和7 d的调度期内重庆主城区河段分别冲刷泥沙101万m³和33.3万m³，走沙强度较往年无减淤调度情况明显偏大。

参考文献(References)

[1] Sedimentation Panel of TGP. Research on Sedimentation in the TGR (2001–2005). Beijing: Intellectual Property Press, 2008. [三峡工程泥沙专家组. 三峡水库泥沙淤积研究(2001–2005). 北京: 知识产权出版社, 2008.]

[2] Zhang Xujin, Mu Dewei, Zhao Shiqiang. Sediment aggregation and regulation for Chongqing reach of the fluctuating backwater district in Three Georges Reservoir. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2006, 28(5): 13–17. [张绪进, 母德伟, 赵世强. 三峡水库回水变动区重庆河段泥沙淤积影响及治理. 重庆建筑大学学报, 2006, 28(5): 13–17.]

[3] Huang Yue, Huang Yuling. Effect of Xiluodu hydropower station on sediment silting in Three Gorges Reservoir. China Three Gorges Construction, 2002(9): 16–18, 48. [黄悦, 黄煜龄. 溪洛渡水库对三峡水库泥沙淤积影响预估. 中国三峡

- 建设, 2002(9): 16-18, 48.]
- [4] Lu Yongjun, Zuo Liqin, Ji Rongyao, et al. Changes of sediment deposition and erosion at Chongqing reach in backwater area of Three Gorges Project after reservoir adjusting of the upstream in the Yangtze River. *Advances in Water Science*, 2009, 20(3): 318-324. [陆永军, 左利钦, 季荣耀, 等. 水沙调节后三峡工程变动回水区泥沙冲淤变化. *水科学进展*, 2009, 20(3): 318-324.]
- [5] Liu Zhaocun, Zhao Jian, Zhao Shiqiang. Experiment study on effects of backwater variation of Three Gorges Reservoir on sediment transport of urban reach of Chongqing. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2012, 27(4): 388-393. [刘兆存, 赵健, 赵世强. 三峡回水变动区重庆主城区河段泥沙冲淤变化试验研究. *水动力学研究与进展 A 辑*, 2012, 27(4): 388-393.]
- [6] Zhu Lingling, Li Jun, Yuan Jing. Sediment erosion and deposition in the tail area of Three Gorges Reservoir. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2018, 35(5): 142-146, 156. [朱玲玲, 李俊, 袁晶. 三峡水库库尾重庆主城区河段冲淤特性. *长江科学院院报*, 2018, 35(5): 142-146, 156.]
- [7] Li Wenjie, Yang Shengfa, Fu Xuhui, et al. Sedimentation characteristics in the Three Gorges Reservoir during the initial operation stage. *Advances in Water Science*, 2015, 26(5): 676-685. [李文杰, 杨胜发, 付旭辉, 等. 三峡水库运行初期的泥沙淤积特点. *水科学进展*, 2015, 26(5): 676-685.]
- [8] Yuan Jing, Xu Quanxi. Sediment trapping effect by reservoirs in the Jinsha River basin. *Advances in Water Science*, 2018, 29(4): 482-491. [袁晶, 许全喜. 金沙江流域水库拦沙效应. *水科学进展*, 2018, 29(4): 482-491.]
- [9] Zhu Lingling, Dong Xianyong, Chen Zefang. Sediment deposition of cascade reservoir in the Lower Jinsha River and its impact on Three Gorges Reservoir. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2016, 34(3): 1-7. [朱玲玲, 董先勇, 陈泽方. 金沙江下游梯级水库淤积及其对三峡水库影响研究. *长江科学院院报*, 2016, 34(3): 1-7.]
- [10] Zhang Xujin, He Jinchao, Mu Dewei. Impact of incoming runoff and sediment on sediment deposition along the Chongqing reach. *Hydro-science and Engineering*, 2010(1): 23-29. [张绪进, 何进朝, 母德伟. 上游来水来沙变化及对重庆河段泥沙淤积的影响. *水利水运工程学报*, 2010(1): 23-29.]
- [11] Wang Yangui, Zeng Xian, Su Jialin, et al. Study on scour and deposition characteristics in Chongqing reach after Three Gorges Reservoir operation. *Journal of Sediment Research*, 2017, 42(4): 1-8. [王延贵, 曾险, 苏佳林, 等. 三峡水库蓄水后重庆河段冲淤特性研究. *泥沙研究*, 2017, 42(4): 1-8.]
- [12] Yuan Jing, Xu Quanxi, Dong Bingjiang, et al. Study on sediment erosion and deposition characteristics in fluctuating backwater area of Three Gorges Reservoir in the drawdown period. *Journal of Sediment Research*, 2015(3): 15-20. [袁晶, 许全喜, 董炳江, 等. 消落期三峡水库库尾泥沙冲淤特性研究. *泥沙研究*, 2015(3): 15-20.]
- [13] Zhou Man, Huang Renyong, Xu Tao. Study and practice of the Three Gorges Reservoir regulations for sedimentation reduction in its tail region. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2015, 34(4): 98-104. [周曼, 黄仁勇, 徐涛. 三峡水库库尾泥沙减淤调度研究与实践. *水力发电学报*, 2015, 34(4): 98-104.]
- [14] Liu Dechun, Li Longcheng, Cheng Ping, et al. On boundary condition of Chongqing reach. *Yangtze River*, 2007, 38(9): 132-135. [刘德春, 李龙成, 程平, 等. 重庆主城区河段河床边界条件研究. *人民长江*, 2007, 38(9): 132-135.]
- [15] Zhu Lingling, Yuan Jing, Xu Quanxi. Study of flood level and its influence factors in Chongqing reach in upper Yangtze River. *Journal of Sediment Research*, 2013(6): 53-59. [朱玲玲, 袁晶, 许全喜. 铜锣峡卡口对重庆主城区河段洪水位的影响分析. *泥沙研究*, 2013(6): 53-59.]
- [16] Lu Jinyou, Huang Yue. Comparison of sedimentation in Three Gorges Reservoir between calculated prediction and prototype measurement. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2013, 30(12): 1-6, 27. [卢金友, 黄悦. 三峡水库淤积计算预测与原型实测结果比较分析. *长江科学院院报*, 2013, 30(12): 1-6, 27.]
- [17] Xu Quanxi, Zhang Xiaofeng, Tan Guangming. The research of non-uniform sediment graded incipient motion. *Journal of Hydrodynamics*, 1999, 14(2): 135-141. [许全喜, 张小峰, 谈广鸣. 非均匀沙起动问题研究 A 辑. *水动力学研究与进展*, 1999, 14(2): 135-141.]
- [18] Dong Bingjiang, Chen Xianwei, Xu Quanxi. Investigations and considerations on peak sediment regulation of Three Georges Reservoir. *Yangtze River*, 2014, 45(19): 1-5. [董炳江, 陈显维, 许全喜. 三峡水库沙峰调度试验研究与思考. *人民长江*, 2014, 45(19): 1-5.]
- [19] Xu Quanxi. Research on the variation of sediment transport regularity and affecting factors in the Upper Changjiang River [D]. Wuhan: Wuhan University, 2007. [许全喜. 长江上游河流输沙规律变化及其影响因素研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2007.]
- [20] Zhu Lingling, Xu Quanxi, Yan Lili. Sediment deposition of Modao Creek and Xiangxi River mouth section since the impoundment of the Three Gorges Reservoir. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(1): 131-145. [朱玲玲, 许全喜, 鄢丽丽. 三峡水库不同类型支流河口泥沙淤积成因及趋势. *地理学报*, 2019, 74(1): 131-145.]

Control index of sediment reduction dispatching in Chongqing reach after the storage level of TGR reaching 175 m

ZHU Lingling¹, GE Hua², DONG Bingjiang¹, YANG Chenggang¹

(1. Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, China;

2. Changjiang River Scientific Research Institute of Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, China)

Abstract: Chongqing reach is located in the fluctuating backwater zone of the Three Gorges Reservoir (TGR). Sediment deposition and erosion of Chongqing reach is related to flood control, shipping and wharf operation. It has become one of the key problems the TGR faces. In this paper, based on the prototype observation data, the sediment scouring and silting law of Chongqing reach before and after the 175 m experimental impoundment of the TGR was investigated for the first time. In addition, combined with the analysis of river bed composition and the one-dimensional mathematical model, the scouring conditions of suspended sediment in Chongqing reach were calculated and analyzed. Furthermore, the basic conditions of sediment transport in the study reach were applied to the practice of sediment reduction of the TGR. The following conclusions can be drawn as follows: (1) From 2008 to 2012, when the water storage level of TGR reached 175 m, the erosion intensity of the river bed in Chongqing reach started to decline, and the main scouring period of suspended load was postponed from the water- impoundment stage to the pre- flood stage. After 2013, Xiluodu and Xiangjiaba hydropower stations in the lower reaches of Jinsha River was completed and put into operation. The sediment of Jinsha River was intercepted and the sediment entering the Three Gorges was greatly reduced, which led to another increase of the river bed scouring intensity of Chongqing reach. (2) When the inflow in front of the Three Gorges Dam (TGD) is greater than 4000 m³/s and the water level is lower than 167 m, the suspended load on the river bed in Chongqing reach begins to scour. When the inflow exceeds 5000 m³/s, the water level in front of the TGD drops to 163 m, and the scouring intensity of suspended load increases obviously. Increasing the drawdown rate of water level from 163 m before the TGD to 30 cm per day can avoid the cumulative sedimentation in the Chongqing reach.

Keywords: Chongqing reach; main scouring period of suspended load; scouring conditions of suspended sediment; optimized operation for deposition reduction