

三峡水库蓄水后宜昌—杨家脑河段冲刷及粗化

刘怀湘, 徐成伟

(南京水利科学研究院 水文水资源及水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029)

摘要: 水库蓄水引发的下游河道再调整,对河流未来演变与人类活动均有重要影响. 根据现场实测水文、地形与床沙资料,对三峡蓄水后下游宜昌—杨家脑河段的河床冲刷下切、粗化等现象进行了统计分析. 结果表明,三峡水库蓄水后导致宜昌相同来流情况下来沙剧减,这是导致研究河段冲刷的根本原因. 2002—2006年间主要冲刷区逐年下移,冲淤幅度逐渐变小. 而2006年汛末与2008年汛末三峡水库水位的抬高均导致冲刷量的突增. 2002—2006年各河段曼宁糙率值逐步增大,尤其是坝下河段. 床沙组成中卵石含量迅速提高,坝下河段河床中值粒径亦明显增大,而枝城以下河段不明显. 这种上、下游河段粗化过程的差异性与河道冲淤、糙率变化是一致的.

关键词: 三峡水库; 侵蚀冲刷; 河床粗化

中图分类号: TV147.5

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2011)04-0057-07

水利枢纽的建设拦蓄了上游来流中的泥沙,常常引起坝下游河道的冲刷^[1]. 由此带来的河床下切、水位下降等问题对河流的未来演变以及人类活动如航运等均有重要影响,因此得到了学者们的广泛关注^[2-3]. 葛洲坝枢纽自1973年兴建以来,即由于坝下游河段冲刷下切使得沿程中、枯水位下降. 1973—2003年间,宜昌枯水位比葛洲坝枢纽设计水位累计下降了1.24 m(对应流量4 000 m³/s),直接影响到下引航道的通航条件. 随着三峡水库的蓄水运用,该河段将可能再次发生长期、长距离的剧烈冲刷,带来新的河流治理与工程问题. 因此,本研究根据相关实测水文、地形、床沙资料,针对三峡水库2003年蓄水后宜昌—杨家脑河段冲淤情况、河床糙率及床沙粗化等方面的变化进行了分析.

宜昌—杨家脑河段河势与固定断面布置如图1所示. 整个河段从上游至下游可大致划分为宜昌河段、宜都河段与枝江河段. 其中,宜昌至枝城段(含宜昌河段与宜都河段)为顺直微弯河型,流经低山丘陵地带,是长江由山区性河流向冲积平原河流的过渡地带. 河道有一定的摆动,有阶地和边滩发育. 枝城至杨家脑段(枝江河段)则处于上荆江的上段,为弯曲分叉河型,存在关洲、董市洲等分叉河段.

收稿日期: 2011-09-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51009096); 南京水利科学研究院院基金资助项目(Y210003)

作者简介: 刘怀湘(1982-),男,新疆乌鲁木齐人,工程师,主要从事河床演变与水生态研究. E-mail: liuhx@nhri.cn

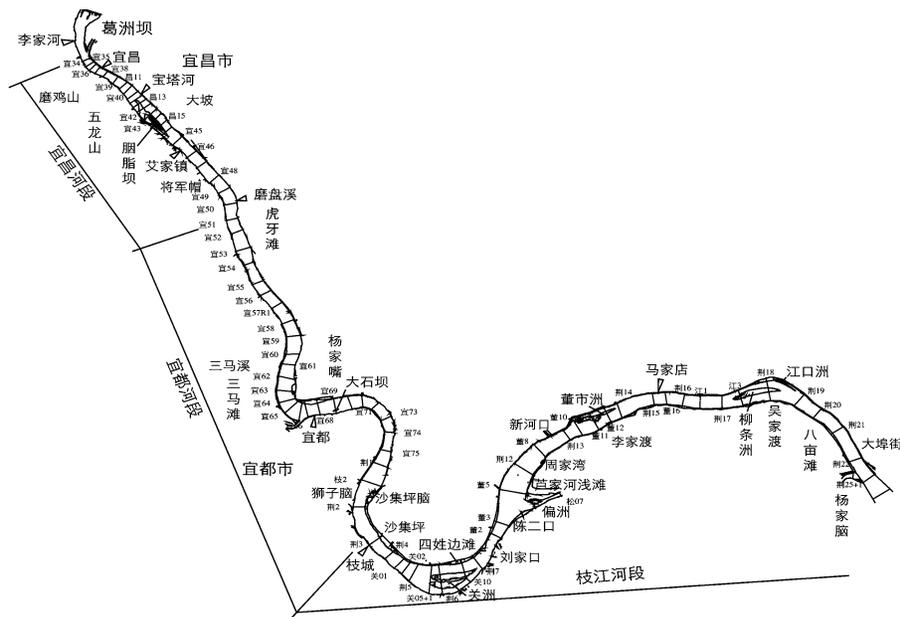


图1 宜昌—杨家脑河段观测断面及主要水文站分布

Fig. 1 Observation sections and hydrologic stations in Yichang-Yangjiaobao reach

1 水沙过程变化

宜昌站为本河段控制水文站. 根据图2中对三峡水库蓄水前后多年平均(1981—2002年)水沙资料的对比统计, 可见除2006年外宜昌站径流量在三峡水库蓄水前后变化不大, 2003—2008年径流量为4 001 ~ 4 593 亿 m^3 , 与多年平均(1981—2002年)相比, 年径流量仅减少约5%, 而2006年径流量明显偏少, 仅有2 849 亿 m^3 , 减少了34.4%. 宜昌站年输沙量在三峡水库蓄水后减少较多, 2003—2008年输沙量为3 224 ~ 10 985 万t, 与多年平均(1981—2002年)相比, 年输沙量减少了约80%, 2006年输沙量尤其偏小, 仅有908 万t, 减少了98.0%. 上世纪90年代以来长江上游来沙已不断减少, 但即使如此, 三峡水库蓄水前的1981—2002年宜昌站年输沙量仍有4.59 亿t, 可见三峡水库的修建拦蓄了大量泥沙, 使得宜昌站输沙量相比天然水平大幅度减少.

2003—2007年, 宜昌站沙质推移质(距多年平均)分别为: 25.8 万t(-81.4%), 30.3 万t(-78.1%), 24.7 万t(-82.2%), 3.7 万t(-97.3%)和15.4 万t(-88.9%); 卵石推移质(距多年平均)分别为: 0.221 万t(-99.1%), 0.186 万t(-99.3%), 0.913 万t(-96.4%), 0(-100.0%)和0.548 万t(-97.9%), 多年平均资料统计年限为1981—2002年. 从以上宜昌站的统计来看, 与悬移质相比, 推移质输沙量的减少百分比更大, 特别是卵石推移质. 宜昌站沙质推移质输沙量2003—2007年间多在15.4 ~ 30.3 万t之间(除2006年仅3.7 万t), 较多年平均减少78.1% ~ 88.9%. 而宜昌站卵石推移质输沙量2003—2007年间降至0.913 万t以下, 2006年甚至未采集到卵石推移质.

因此, 三峡工程的兴建, 给宜昌—杨家脑河段的水沙过程变化带来了极大的影响. 特别是宜昌站上游来沙量明显减少, 而径流量相对变化不大, 这是造成本河段冲刷的源动力.

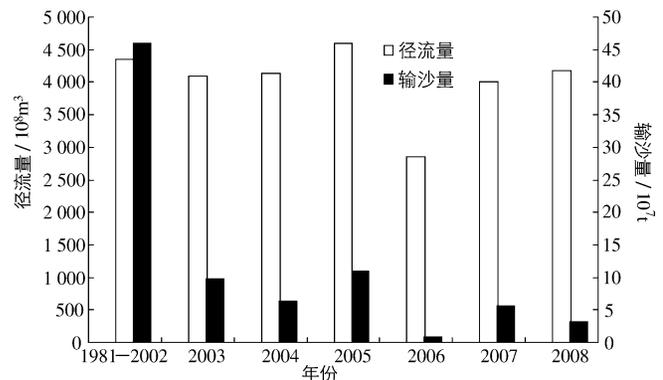


图2 宜昌站年径流量与年输沙量变化

Fig. 2 Variation of annual runoff and annual sediment yield at Yichang station

2 沿程冲淤强度分布

根据2002—2006年间宜昌—杨家脑河段沿程的固定断面测量资料,结合水面线分析可计算宜昌—杨家脑河段在不同流量级别的水位下,沿程断面的冲淤情况.图3给出宜昌流量为 $40\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 对应多年平均水位以下河槽(即洪水河槽),沿程各断面冲淤强度的分布情况,图中仅列出部分断面名称,其余断面名称见图1.

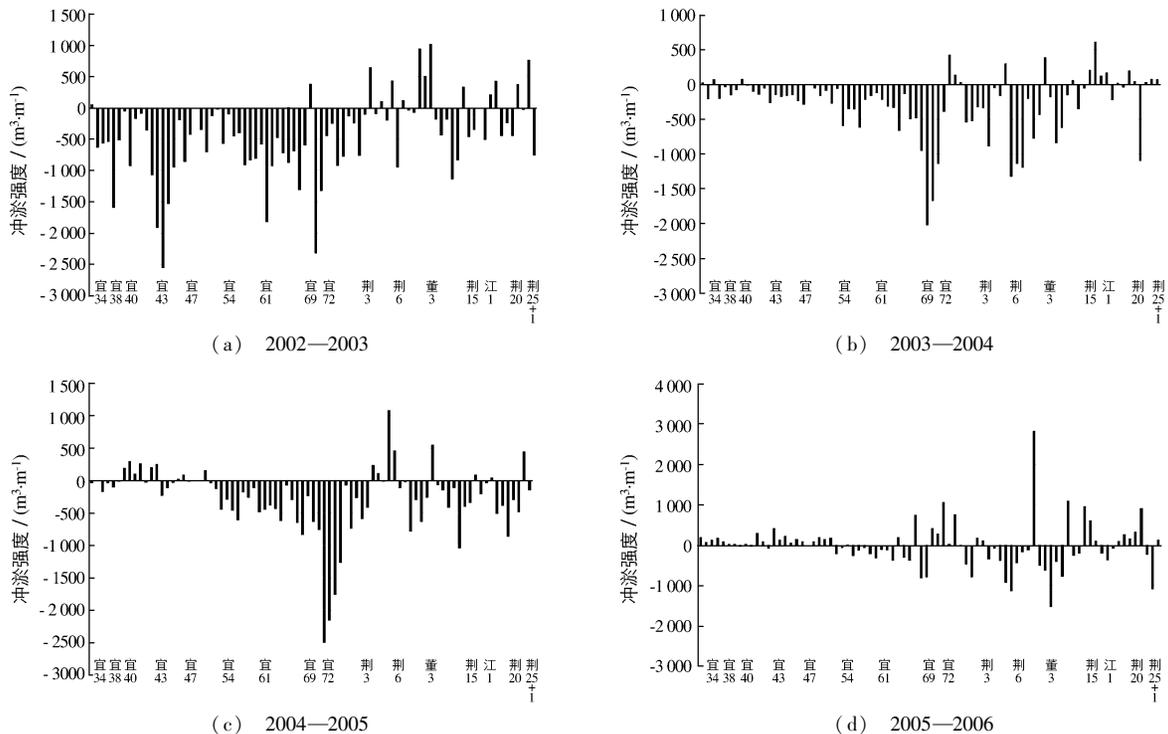


图3 沿程各断面历年冲淤强度(+为淤积, -为冲刷)

Fig. 3 Erosion and deposition intensity at observation sections (+: deposition, -: erosion)

2002—2003年间,宜昌—杨家脑河段洪水河槽内的冲淤强度分布大致以荆3断面即枝城为界,枝城以上河段冲刷强度较大,冲刷 $1\,000\text{ m}^3/\text{m}$ 左右的断面较多,若以沿程水面宽 $1\,000\text{ m}$ 左右计算,则冲刷深度约为 1 m .其中冲刷最为剧烈的河段出现在胭脂坝附近(宜43断面)与宜都一带(宜61—70断面间).而枝城以下有部分河段则出现大量淤积,总体上有冲有淤,冲淤强度均在 $1\,000\text{ m}^3/\text{m}$ 以下.

2003年三峡工程为第一年蓄水,故清水下泄使得接近坝下河段出现了剧烈冲刷,而枝城以下部分河段有淤积,这可能是因为上游冲刷所携带的泥沙在此大量落淤的结果.总体上看,2002—2003年间枝江河段的冲刷程度远小于宜昌河段与宜都河段.

2003—2004年间,坝下宜昌河段的冲刷幅度急剧变小,平均仅为 $116.2 \sim 138.0\text{ m}^3/\text{m}$.冲刷最剧烈的河段下移并集中在断面宜69周围即宜都附近,最大冲刷强度 $2\,000\text{ m}^3/\text{m}$ 左右.宜都河段平均 $400\text{ m}^3/\text{m}$ 以上.枝城以下河段(断面荆3以下)总体上以冲刷为主,但冲刷强度普遍仍小于 $1\,000\text{ m}^3/\text{m}$,枝江河段平均 $200\text{ m}^3/\text{m}$ 左右,关洲一带(断面荆6附近)冲刷强度相对较高.

2004—2005年间,枝城以上河段的冲刷强度分布情况与2003—2004年间类似,坝下宜昌河段的冲刷进一步减弱,同时不少断面甚至出现微淤.冲刷最剧烈的河段位置进一步略为下移至断面宜72附近.枝城以下河段亦与2003—2004年间类似,冲刷强度略有降低,关洲河段还出现一定程度淤积.从宜昌—杨家脑河段沿程各断面平均冲刷强度来看,与2003—2004年间基本相同.

2005—2006年间,枝城以上河段总体以微淤为主,其中宜昌河段淤积强度平均为 $100\text{ m}^3/\text{m}$ 左右,宜都

河段部分断面可达 $1\ 000\ \text{m}^3/\text{m}$. 主要冲刷带下移至枝城以下河段,集中在关洲河段与芦家河浅滩河段两处,芦家河下游部位各断面又以淤积为主. 从宜昌—杨家脑河段沿程各断面平均冲淤强度来看,基本上为冲淤平衡,变化不大.

2002—2006 年间,宜昌—杨家脑河段的河床演变过程基本上是环境条件相对不变情况下的一个典型过程. 这一阶段,三峡水库保持在 $135\sim 139\ \text{m}$ 水位运行,河流水沙过程亦较为平稳(除 2006 年外). 在这一稳定的环境条件下,宜昌—杨家脑河段的演变总趋势为:主要冲刷区逐年下移,冲淤幅度渐渐变小.

结合 2007 年以后文献数据^[4]可得表 1. 表中结果印证了以上结论,同时由于 2006 年汛末与 2008 年汛末三峡水库分别有一次水位抬高过程,导致宜昌—杨家脑河段的来沙进一步减少(如 2007—2008 年均输沙量仅有 2003—2006 年的 60% 左右),因此 2006—2008 年与 2008 年后亦先出现强烈冲刷,随后冲淤幅度渐渐变小,趋向于稳定,即随水沙条件变化出现了新的河床再调整过程.

表 1 2002—2009 年间宜昌—杨家脑河段在不同流量级的冲淤强度

Tab. 1 Erosion and deposition intensity with different discharges in Yichang-Yangjiaobao reach during 2002—2009 (m^3/m)

时 间	河 段	流量级别/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) (宜昌站数据)				
		5 000	10 000	20 000	30 000	40 000
2002—2003 年	宜昌河段	-527.6	-589.7	-649.7	-687.0	-733.1
	宜都河段	-568.5	-611.1	-657.3	-666.0	-662.6
	枝江河段	-40.1	-83.7	-91.0	-90.4	-51.4
	全河段	-371.1	-416.3	-448.7	-461.1	-453.7
2003—2004 年	宜昌河段	-138.0	-135.6	-133.7	-133.5	-116.2
	宜都河段	-412.3	-434.5	-443.2	-442.6	-443.1
	枝江河段	-178.0	-197.8	-216.1	-221.6	-242.9
	全河段	-249.3	-264.1	-273.3	-275.2	-280.9
2004—2005 年	宜昌河段	41.9	39.2	39.6	40.8	34.5
	宜都河段	-586.2	-599.0	-612.2	-612.4	-611.1
	枝江河段	-146.2	-160.3	-168.0	-167.0	-174.8
	全河段	-246.1	-255.8	-263.3	-262.6	-270.7
2005—2006 年	宜昌河段	109.7	107.4	104.8	106.3	111.9
	宜都河段	-41.6	-41.0	-45.0	-45.3	-44.7
	枝江河段	-55.0	-68.6	-71.6	-71.9	-69.8
	全河段	-7.8	-14.5	-17.5	-17.3	-16.4
2006—2007 年	宜昌河段	-160.3	-171.1		-172.2	-169.6
	宜都河段	-476.8	-496.2		-496.7	-503.5
	枝江河段	-172.7	-193.8		-188.9	-193.6
	全河段	-268.6	-287.6		-285.4	-289.6
2007—2008 年	宜昌河段	75.3	87.6		117.0	112.9
	宜都河段	-91.9	40.2		-39.4	-39.4
	枝江河段	-10.0	-14.1		-7.8	-6.9
	全河段	-22.9	19.4		1.7	1.5
2008—2009 年	宜昌河段	-230.4	-250.0		-278.9	-274.7
	宜都河段	-184.8	-221.5		-217.2	-206.6
	枝江河段	-69.7	-62.7		-65.9	-68.1
	全河段	-132.1	-143.3		-148.2	-145.3

3 河床糙率计算

河床糙率是水力计算中的重要参数,其计算方法如下:如果在计算河段和计算时段内,水流为恒定流,河道横断面沿程均一,那么按照曼宁阻力计算公式,河床曼宁糙率可表达为^[5]:

$$n = \frac{R^{2/3} J^{1/2}}{U} = \frac{A^{5/3} (Z_1 - Z_2)^{1/2}}{B^{2/3} Q L^{1/2}} \quad (1)$$

式中: J 为河段水力坡降; R 为水力半径; U 为平均流速; Z_1, Z_2 分别为计算河段上下游两端的水位(m); B 为计算河段的河宽(m); A 为计算河段的过水面积(m^2); Q 为计算河段计算时段内的平均流量(m^3/s); L 为计算河段长度(m).

然而,由于天然河道形态不会完全规则,因此在实际计算时往往直接采用计算河段进、出口断面形态特征值进行平均,即采用两端断面过水面积及河宽的平均值代入式(1)进行计算.

根据公式计算不同流量下各河段2002—2006年的糙率变化.所有流量级(5 000, 10 000, 20 000, 30 000和40 000 m^3/s 共计5组数据)下的平均值如图4所示.

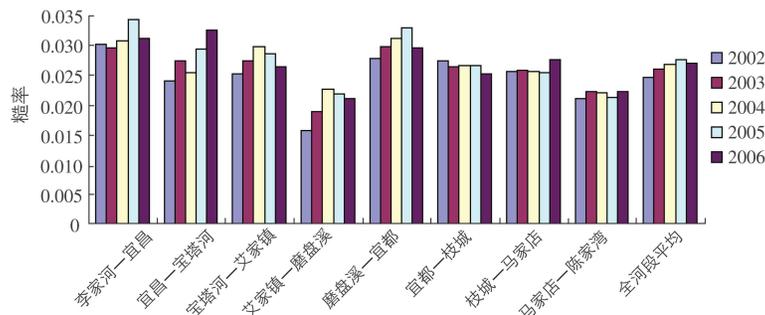


图4 不同河段的糙率(全流量平均值)变化

Fig. 4 Roughness variation of different reaches (discharge-averaged)

总体而言,2002—2006年各河段的曼宁糙率值有所增大,全河段各级流量平均糙率值由2002年的0.0247增大到2006年的0.0270,增大了9.4%.除了2006年可能由于异常的水沙过程使其曼宁糙率值得较为偏小外,2002—2005年曼宁糙率值逐步增大,反映了三峡水库蓄水后宜昌—杨家脑河段河床逐步粗化的影响.

不同河段之间,以宜都—枝城为界,其下游河段糙率值仅略有增加,其中枝城—马家店河段增大7.9%,马家店—陈家湾河段增大5.2%,宜都—枝城河段甚至减少了8.2%(除2006年外其余年份亦基本不变).而在宜都以上河段为糙率增大较明显的区域,如宜昌—宝塔河河段增大最多(增加35.3%),艾家镇—磨盘溪河段其次(增加34.4%).这与三峡水库蓄水后宜昌—杨家脑河段的沿程冲淤规律是一致的,即靠近坝下的河段冲刷较严重,而下游河段相对变化不大.

4 床沙粗化分析

在河道冲刷过程中,除了河床高程随之降低外,河床中的粒径组成也随之变化.床沙中的细颗粒被逐渐带走,粗颗粒的比重会愈加增大,即出现床沙粗化^[6-8].

图5中列出了宜昌—杨家脑河段沿程各断面床沙中值粒径从2002—2008年的变化情况.测量均在当年10月进行,每一个断面上采集多个样点,因此根据测量结果大致可以将其分为沙质样点与卵石采样两个差异很大的组分,分别计算平均值.从资料上看,沙质床沙中值粒径结果较多且变幅相对不大,而卵石床沙中值粒径结果由于测量手段的局限以及自然条件下分布的复杂性,呈现出一定的随机性,其波动振幅可达数十毫米.不过,总体来看,采集到卵石的断面数随时间的推移逐渐增多.如图5(b)所示,2002年10月53个断面中仅5个断面采集到卵石数据,整个河段中以沙质河床为主,因此为沙质或沙夹卵石河床.根据长江委荆江水文水资源勘测局2002年对洲滩床沙组成的调查^[9],宜昌至松滋口河段卵石占32%,胶结卵石占3.02%,砂占61.84%,土占3.15%;松滋口至江口河段卵石占33.3%,砂占49.3%,土占17.4%;江口至杨家脑河段砂占96.8%,土占3.2%.以上调查与本研究结论基本相符.2003年10月采集到卵石数据的断面数达到

11 个,反映出三峡水库蓄水后第一年床面组成情况即开始急剧变化,而至 2004 年后达到 20 个以上.卵石所占百分比逐渐增大.尤其是宜昌—宜都河段(宜 34—宜 69),至 2008 年 10 月时床面组成已经以卵石为主,床沙发生明显粗化.

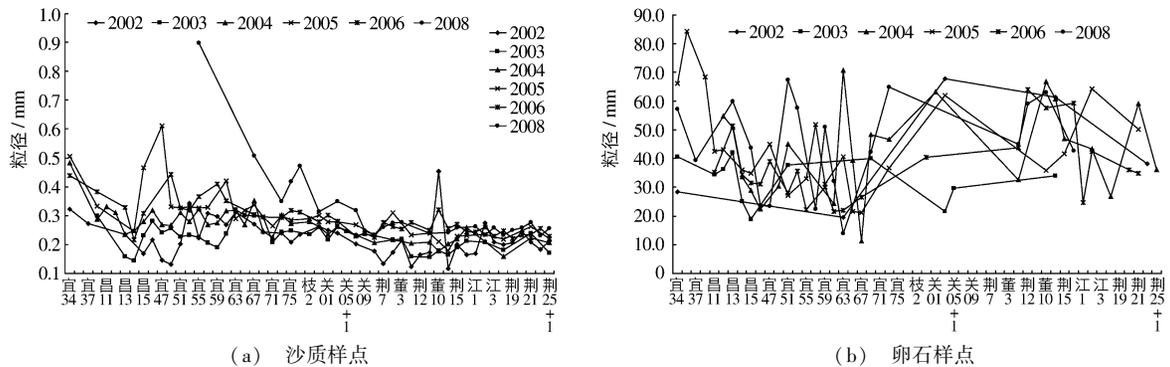


图 5 2002—2008 年床沙中值粒径变化

Fig. 5 Variation of bed sediment median size during 2002 to 2008

沙质河床中值粒径的增大非常明显,特别是枝城(荆 3)以上河段.2002 年时宜昌—杨家脑河段沙质河床中值粒径普遍在 0.100~0.300 mm 之间,随着时间推移在不断增大,高于 0.300 mm 的断面越来越多,峰值也越来越大,至 2008 年时最大中值粒径将近 1 mm.这些峰值主要出现在枝城以上特别是接近坝下河段,反映出坝下河段床沙粗化较为明显.与此同时,枝城以下河段沙质床沙粗化过程较为缓慢,2002—2008 年中值粒径平均仅增大 0.1 mm 左右.这种上、下游河段粗化过程的差异性与河道冲淤、糙率变化、推移质粒径变化的相关结果是一致的.

由于数据精度等原因,图 5(b)所示的卵石河床中值粒径变化较为杂乱,但基本规律与沙质河床相同,即坝下河段卵石粒径也出现一定粗化,2003—2008 年中值粒径普遍高于 2002 年中值粒径,而枝城以下河段无明显粗化现象.

5 结 语

通过对三峡下游宜昌—杨家脑河段河床冲刷粗化状况的分析,得到了以下结论:

(1) 三峡工程的兴建使得宜昌站上游来沙量明显减少,而径流量相对变化不大,这是造成本河段冲刷的源动力.

(2) 2002—2006 年间宜昌—杨家脑河段的演变总趋势为主要冲刷区逐年下移,冲淤幅度渐渐变小.同时由于 2006 年汛末与 2008 年汛末三峡水库分别有一次蓄水位抬高过程,导致宜昌—杨家脑河段的来沙进一步减少,因此这两次抬高后河床均出现了再调整过程.

(3) 2002—2006 年各河段曼宁糙率值基本上逐步增大,全河段各级流量平均糙率值由 2002 年的 0.024 7 增大到 2006 年的 0.027 0,增大了 9.4%.反映了三峡水库蓄水后床沙逐步粗化的影响.不同河段之间,靠近坝下的河段为糙率增大较明显的区域,而下游河段相对变化不大.

(4) 2002 年 10 月,宜昌—杨家脑河段主要为沙质或沙夹卵石河床,此后卵石所占床沙百分比逐渐增大.尤其是宜昌—宜都河段(宜 34—宜 69),至 2008 年 10 月,床面组成已经以卵石为主,冲刷粗化为卵石夹沙河床.坝下河段沙质河床中值粒径亦明显增大,与此同时,枝城以下河段沙质床沙粗化过程较为缓慢.卵石河床的变化规律相似.这种上、下游河段粗化过程的差异性与河道冲淤、糙率变化的相关结果是一致的.

参 考 文 献:

- [1] HARRISON A S. Report on special investigation of bed sediment segregation in a degrading bed[R]. California: University of California, 1950.
- [2] VERICAT D, BATALLA R J, GARCIA C. Breakup and reestablishment of the armour layer in a large gravel-bed river below dams: The lower Ebro[J]. *Geomorphology*, 2006, 76(1): 122-136.
- [3] 陆永军, 陈稚聪, 赵连白, 等. 三峡工程对葛洲坝枢纽下游近坝段水位与航道影响研究[J]. *中国工程科学*, 2002, 4(10): 67-72. (LU Yong-jun, CHEN Zhi-cong, ZHAO Lian-bai, et al. Impact of the Three Gorges Project on the water level and navigation channel in the near-dam reach downstream the Gezhouba Project[J]. *Engineering Science*, 2002, 4(10): 67-72. (in Chinese))
- [4] 段光磊. 宜昌至沙市河段枯水位变化影响因素分析[R]. 荆州: 长江水利委员会水文局荆江水文水资源勘测局, 2010. (DUAN Guang-lei. Analysis of dry water stage variation in Yichang-Shashi reach[R]. Jingzhou: Hydrology Bureau of Yangtze River Water Resources Commission, 2010. (in Chinese))
- [5] DONCKER L, TROCH P, VERHOEVEN R. Determination of the manning roughness coefficient influenced by vegetation in the river Aa and Biebrza river[J]. *Environmental Fluid Mechanics*, 2009, 9(5): 549-567.
- [6] 秦荣昱. 论河床冲刷和粗化[J]. *武汉水利电力学院学报*, 1981(3): 43-53. (QIN Rong-li. Discussion on the scouring and armoring of river bed[J]. *Journal of the Wuhan Institute of Hydraulic and Electric Engineering*, 1981(3): 43-53. (in Chinese))
- [7] GESSLER J. Self stabilizing tendencies of alluvial channels[J]. *Journal of the Waterways and Harbors Division, ASCE*, 1970, 96(2): 235-249.
- [8] 陆永军. 宽级配河床粗化稳定结构[J]. *水道港口*, 1990(4): 17-23. (LU Yong-jun. Armoring stable structure of riverbeds with wide size distribution[J]. *Journal of Waterway and Harbor*, 1990(4): 17-23. (in Chinese))
- [9] 长江委荆江水文水资源勘测局. 宜昌至杨家脑河段河床组成勘测调查分析报告[R]. 荆州: 长江委荆江水文水资源勘测局, 2003. (Hydrology Bureau of Yangtze River Water Resources Commission. Report on investigation and analysis of the riverbed sediment of Yichang-Yangjiano reach[R]. Jingzhou: Hydrology Bureau of Yangtze River Water Resources Commission, 2003. (in Chinese))

Study on scour and bed material armoring of Yichang-Yangjiano channel after TGP impoundment

LIU Huai-xiang, XU Cheng-wei

(State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: The readjustment of reservoir-downstream channels is important to both local fluvial morphology and human activities. According to the observation of hydrology, landform and riverbed sediment, this study analyzed the scour, incision and bed material armoring of Yichang-Yangjiano channel, which is located at the downstream of the Three Gorges project (TGP). The results show that the incoming sediment of Yichang station is significantly decreased due to TGP impoundment, thus the study channel is scoured. The main erosion zone moved downwards every year and the scouring amount reached its peak in 2006 and 2008, when the reservoir stage was raised. The roughness coefficient increased during 2003 to 2006 (the near-dam section especially). The proportion of cobbles on bed increased and the median diameter in the near-dam section also increase obviously, while the median diameter downstream of Zhicheng just changes slightly. The difference between the upstream and the downstream in bed material armoring is coherent with the tendency in distribution of both scouring amounts and roughness coefficients.

Key words: Three Gorges Reservoir; scour; bed material armoring