

上荆江枯水位对河床冲刷及水库调度的综合响应

朱玲玲¹, 杨霞², 许全喜¹

(1. 长江水利委员会水文局, 武汉 430010; 2. 中国长江三峡集团公司三峡枢纽建设运行管理局, 宜昌 443133)

摘要: 为系统揭示长江中游近期枯水情势及其对三峡水库蓄水的直接和间接响应, 本文以冲刷剧烈、枯水位降幅最大的上荆江为例, 通过统计其不同形式枯水位的变化特征, 建立了水位下降与河床冲刷、水库不同运行方式的相关关系。结果表明, 沙市站同流量枯水位几乎与枯水河槽河床平均高程等幅下降, 枝城站枯水位下降幅度较小与本底河床形态、河床粗化及航道整治工程有关。上荆江汛前枯水位降幅、最低水位及极枯水位历时等枯水情势会受到三峡水库补水调度的影响, 这种补水效应沿程递减, 至沙市站补水调度仍然无法抵消河床下切对枯水位造成的影响。

关键词: 上荆江; 同流量枯水位; 枯期水位; 年最枯水位; 枯期补水调度

DOI: 10.11821/dlxb201707005

1 引言

在水库蓄水拦沙和径流条件等作用下, 必然带来坝下游河段不同程度的冲刷下切, 河床作为枯水位的边界条件, 其冲刷往往造成枯水位的下降, 这种现象在国内外已建成的多个水库下游都较为明显^[1-3]。三峡水库蓄水后, 拦截入库超75%的泥沙, 位于水库下游的上荆江遭遇“清水”下泄的影响, 河床冲刷发展剧烈, 枯水位下降幅度最大, 至2015年, 沙市站6000 m³/s流量水位下降约1.74 m。关注上荆江枯水位变化的主要原因有3个方面: 首先, 上荆江枯水位变化是影响宜昌枯水位的重要下边界条件, 上荆江紧邻上游沙卵石河段, 其枯水下降幅度是引起沙卵石河段枯水位下降的重要因素之一^[4], 沙卵石河段剧烈冲刷后, 对于枯水位下降向上传递的控制作用逐渐减弱, 影响宜昌枯水位的稳定, 事关葛洲坝船闸的正常运行; 其次, 上荆江一直是制约长江“黄金水道”航道标准提升的瓶颈段之一, 分布有多个著名的碍航河段如芦家河、沙市、周公堤等, 存在的“坡陡流急”、“水浅流急”、“航宽不足”等航道问题均与枯水位降幅密切相关^[5-7], 局部航道整治工程的实施减缓了小范围内的枯水位下降速度, 但上荆江枯水位整体下降的趋势难以控制; 再者, 沿江两岸分布有大量多类别生活、生产取水及涉水工程, 枯水位降幅也会对这些工程的正常运行造成影响。

上荆江枯水位变化的重要性决定了以往不乏相关研究, 三峡水库论证阶段及蓄水运

收稿日期: 2016-12-05; 修订日期: 2017-02-23

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0402301, 2016YFC0402101); 水利部公益性行业科研专项经费资助项目(201401021); 国家科技支撑计划课题(2013BAB12B01) [Foundation: National Key R&D Program of China, No.2016YFC0402301, No.2016YFC0402101; Scientific Special Expenditure for Nonprofit Public Industry from the Ministry of Water Resources of China, No.201401021; Key Projects in the National Science & Technology Pillar Program, No.2013BAB12B01]

通讯作者: 朱玲玲(1984-), 女, 江西鄱阳人, 博士, 高级工程师, 主要从事河道演变及数值模拟研究。

E-mail: Zhull1012@foxmail.com

行以来,均认同水库蓄水将对坝下游河道调整、水位变化产生极为深刻的影响^[8],多数研究认为三峡工程运行后前10年(2003-2012年),上荆江河床大幅度冲刷,沙卵石过渡段枯水位降幅在0.3~0.4 m左右^[9],沙质河床沙市站枯水位降幅在1~3 m不等^[10-11]。三峡水库蓄水后2003-2015年,上荆江河床冲刷剧烈,且以枯水河槽冲刷为主^[12],河床下切带来的枯水位降幅十分显著^[13]。同时三峡水库175 m试验性蓄水后,开展了枯期补水调度,水库蓄水带来的河床下切和流量过程改变双重作用于枯水位变化^[14],两种效应的综合评估尚未有系统论述,尤其是枯水期补水流量大小与枯水位变化的具体关系尚不明确。本文以上荆江河床强冲刷状态和枯水位实际降幅为切入点,阐述了同流量枯水位、枯期水位、最低水位及极枯水位历时的变化特征,及其与三峡水库蓄水的直接和间接响应关系。本文取得的研究成果,有助于系统地认识上荆江的枯水情势,对其航运及其他相关功能的维持有重要参考意义。

2 研究区域和数据源

2.1 研究区域

上荆江上起枝城(上距三峡大坝坝址约60 km),下迄藕池口,全长约171.7 km,属于较稳定的微弯分汊型河道,20世纪50年代以来,河道平面形态和洲滩格局变化不大。按河床组成差异可分为两段,上段枝城—杨家脑为沙卵石河床(又称枝江河段),下段杨家脑—藕池口为沙质河床,观音寺上下分别称为沙市河段和公安河段(图1)。20世纪60年代中后期以来,受下游下荆江河段自然和人工裁弯的影响,上荆江河段溯源冲刷明显,此后至1981年葛洲坝水利枢纽运行,该段持续冲刷;三峡水库蓄水拦截了上游入库超75%的泥沙,上荆江进入强冲刷状态。

上荆江径流泥沙主要来自于宜昌以上长江干、支流。枝城以上约19 km处有支流清江入汇,沙市河段进口有沮漳河入汇。南岸有松滋口、太平口和藕池口分泄干流的水沙入洞庭湖。枝城站可作为上荆江水沙输移量分析控制站,2003-2015年枝城站年平均径流量为4100亿m³,输沙量为4880万t,年内水沙输移高度集中在汛期5-10月,水、沙输移量分别占年值的74.0%、98.2%,汛期集中输沙现象明显。

2.2 数据来源

本文水文、泥沙研究数据分析分为三峡水库蓄水前和蓄水后2个大时段,为统一时

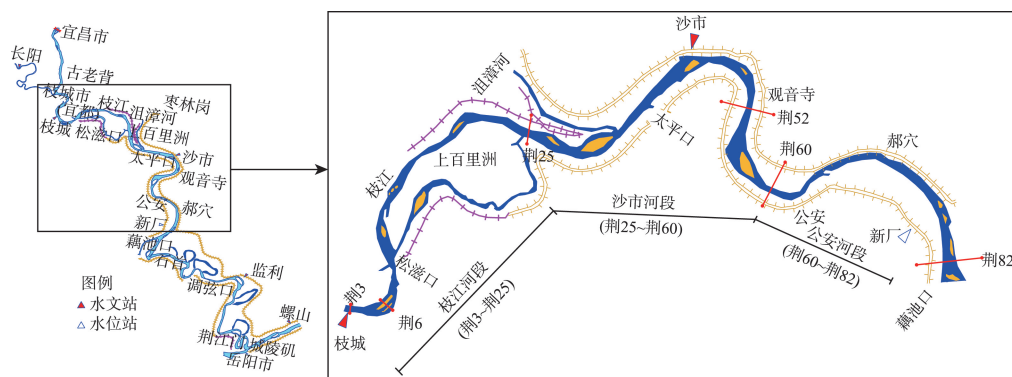


图1 上荆江河势图

Fig. 1 Location and sketch of the upper Jingjiang reach

间尺度,同时考虑到枝城站和沙市站均是1991年之后由水位站改为水文站,三峡水库蓄水前分成1956-1990年(枝城站流量采用宜昌站与清江长阳站之和,沙市站流量采用新厂站数据)、1991-2002年,蓄水后为2003-2015年,以水库蓄水为分割的2个时段总历时相近;平滩、中水和枯水河槽分别为宜昌站30000 m³/s、10000 m³/s和5000 m³/s流量水面线以下的河床,冲淤量地形法计算采用1:5000断面观测数据,观测数据均来自于长江水利委员会水文局。

2 上荆江的强冲刷状态

一般而言,大型调节性水库运行对于坝下游河道的水位作用有直接和间接两种响应形式,直接响应表现为水库不同调度方式下,改变下游河道的流量及过程,从而直接引起其水位过程的变化,间接响应主要表现为水库拦沙效应下,下游河道河床因遭遇低含沙水流而冲刷下切,下边界条件改变造成枯水位的变化。上荆江枯水位下降对于三峡水库蓄水的响应同样兼有这两种形式。

三峡水库蓄水拦沙造成了上荆江的强冲刷状态。三峡水库蓄水前,自20世纪60年代末开始,上荆江先后遭遇下荆江人工裁弯、自然裁弯和葛洲坝水利枢纽运行等人类活动和突变性自然调整,河道总体呈冲刷状态,1966-2002年河段单位河长年均冲刷量约6.66万m³/km·a。1998年遭遇大水大沙年,河道内淤积了大量泥沙,此后再次进入冲刷状态,上荆江单位河长年均冲刷量一度达到12.2万m³。三峡水库蓄水后,2002年10月至2015年10月,上荆江冲刷强度为21.4万m³/km·a,超过蓄水前均值的3倍。冲刷自上而下发展,从枝江河段—公安河段,河床冲刷强度沿程递减。三峡水库175 m试验性蓄水期,沙卵石河段过渡段枝江河段冲刷强度高达33.5万m³/km·a,沙质河床起始段沙市河段次之,为29.6万m³/km·a,上荆江总体冲刷强度为26.5 m³/km·a(图2a)。受护岸工程的限制,上荆江两岸冲刷展宽的现象不明显,河床冲刷以下切为主要形式^[15](图2b、2c),至2015年10月,枝江河段、沙市河段及公安河段河床纵剖面下切幅度分别达到2.85 m、3.38 m及1.33 m。

三峡工程运用后上荆江全程冲刷,并且主要集中在中枯水河槽内,中水、枯水河槽

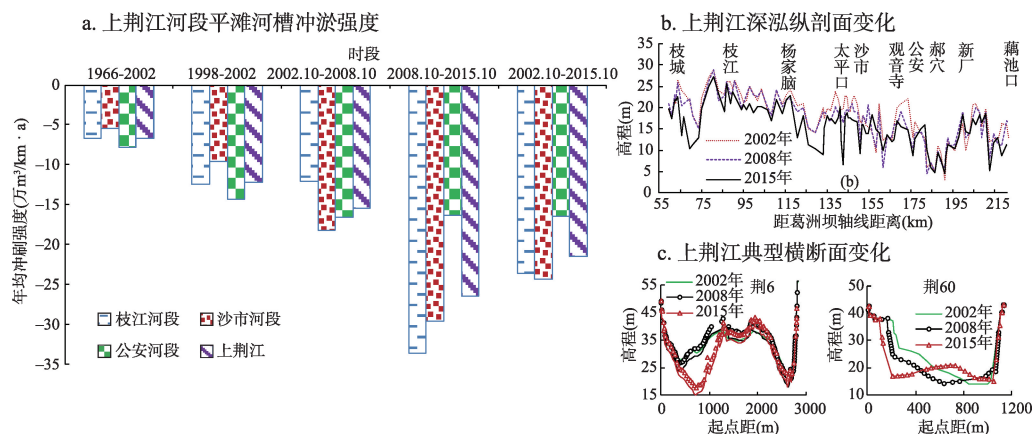


图2 三峡工程运用后上荆江河段河床冲刷强度、深泓纵剖面及典型断面变化

Fig. 2 Variations in erosion intensity, thalweg profile and cross-sections of upper Jingjiang River after water-impoundment of Three Gorges Reservoir (TGR)

冲刷量占平滩河槽的比例分别为95.3%、92.5%。受护岸工程的限制,上荆江枯水河槽冲刷展宽、分汉口门段水流分散的现象较为明显,多个河段出现了浅滩碍航现象,为此长江航道部门在多个分叉河道实施了以江心洲(滩)、边滩等守护为主的整治工程,以控制枯水河槽的宽度,保证浅滩水深条件。一方面,守护区域内的滩体冲刷变形幅度得到控制,如沙市河弯的三八滩和金城洲,部分滩体小幅度淤积,如南星洲,枝江河段的董市洲、柳条洲、芦家河河心碛坝及关洲洲体上段等均实施了守护工程,对滩体冲刷有一定限制作用,从而缓解局部枯水位下降幅度和速度^[7]。然而,另一方面,滩体守护后,次饱和水流不断地从河槽冲起泥沙对含沙量进行恢复,进一步促进了中、枯水河槽的冲刷。作为河道枯水位的下边界条件,中、枯水河槽冲刷下切带来的枯水位下降效应十分显著。因而,航道整治工程对于上荆江河道整体的枯水位下降的遏制作用仍有限。

3 上荆江的枯水位变化

受多个因素的影响,同时考虑社会关注的热点问题,上荆江枯水位变化大体上可以分为3种形式:①同流量枯水位变化,即不考虑来流的影响,同时洞庭湖的顶托作用弱,冲淤造成的河床边界变化可作为相对单一的控制因素,河床强冲刷必然对应同流量枯水位的下降;②枯水期水位变化,三峡水库蓄水后长江干流遭遇枯水周期,水库175 m试验性蓄水后,应干流及两湖地区缓解枯水情势、保障通航条件等要求,汛前枯水期开展补水调度,使得枯水期水位既受水库运行方式的作用,也受河床下切的影响;③极枯水位变化,包括最枯水位和极枯水位历时,最枯流量受水库补水而增大,河床冲刷下切,两者作用相反。

3.1 枯水期水位变化

三峡水库175 m试验性蓄水后2008-2015年,水库对坝下游河段流量过程的调蓄作用有所增强,应坝下游生态、生活用水、航运及防洪安全等要求,先后开展了枯水期补水调度、汛期削峰调度等试验性运行方式。枯期补水调度加大了水库枯水期下泄流量,在河床大幅度冲刷下切的前提下,对于枯水位的影响主要表现为两个方面,一是缓解了上荆江汛前枯期水位下降幅度;二是改变了上荆江最枯水位持续下降的趋势,一定程度上缩短了极枯水位历时。

三峡水库蓄水前,上荆江一直处于冲刷状态,因此枯期水位1991-2002年相较于1956-1990年呈下降的趋势,11月-次年4月,枝城站月均水位降幅为0.29~0.97 m,沙市站降幅偏大,为1.30~1.53 m。三峡水库蓄水后,长江流域遭遇相对偏枯的水文周期,坝下游各控制站的年径流量相较于水库蓄水前偏小,宜昌站2003-2015年年均径流量相较于1954-2002年偏少约8.3%,但对于枯水期而言,上荆江除11月受蓄水影响流量有所减小以外,12月-次年4月平均流量均有所增大。枯水期水位变化同时受到水库蓄水对流量调节作用和河床冲刷下切的双重影响,从作用程度来看,11月两者累加作用,其水位降幅偏大,12月开始水库补水调度发挥作用,枯水位降幅减小,随后1-4月,补水强度加大。对于沙卵石河段,枝城站水库加大的下泄流量基本上能够补偿因河床下切带来的枯水位下降幅度,甚至还略有富余,尤其是补水调度的主要作用期2009-2015年,当2月平均流量相较于1991-2002年偏大2180 m³/s时,其平均水位相对抬高约0.53 m,4月枝城流量在7000~8000 m³/s左右时,水库补水近1000 m³/s可抵消河床下切带来的枯水位下降效应。维持葛洲坝水利枢纽三江航道最低通航水位是枯期补水调度的目标之一,从沙卵石河段枯水位变化与补水调度的对应关系来看,这一目标目前尚能满足,但随着河床冲刷

继续发展, 要维持最低通航水位, 水库最小下泄流量需不断增加, 至 2015 年最小下泄流量增至 5850 m³/s。对于沙质河床, 其河床冲刷下切带来的枯水位降幅较上游显著偏大, 尽管补水调度同样能使得枯期流量加大, 且变化规律与上游枝城站类似, 但并不能抵消河床下切带来的枯水位降幅, 仅在 2009-2015 年的 2 月, 当补水流量接近 2000 m³/s 时, 同期枯水位才能基本与蓄水前持平 (表 1)。

表 1 不同时段枝城和沙市站枯期月平均水位、流量变化统计表
Tab. 1 Mean monthly stage and discharge in dry season of different phases at Zhicheng and Shashi gauging stations

控制站	时段	月平均水位(m)						月平均流量(m ³ /s)					
		11 月	12 月	1 月	2 月	3 月	4 月	11 月	12 月	1 月	2 月	3 月	4 月
	1956-1990 年	38.67	36.86	35.97	35.72	36.00	37.16	10 200	5 900	4 260	3 860	4 490	7 030
	1991-2002 年	37.70	36.20	35.61	35.43	35.67	36.55	9 540	5 840	4 580	4 280	4 800	6 900
	2003-2008 年	37.49	36.10	35.64	35.51	35.86	36.59	9 400	5 950	4 890	4 650	5 500	7 430
	2009-2015 年	36.75	35.98	35.98	35.96	36.00	36.52	8 970	6 590	6 550	6 460	6 620	8 280
	枝城站 2003-2015 年	37.09	36.03	35.83	35.75	35.94	36.55	9 170	6 300	5 780	5 620	6 110	7 890
	差值 1	-0.97	-0.66	-0.36	-0.29	-0.33	-0.61	-660	-60	320	420	310	-130
	差值 2	-0.21	-0.1	0.03	0.08	0.19	0.04	-140	110	310	370	700	530
	差值 3	-0.95	-0.22	0.37	0.53	0.33	-0.03	-570	750	1 970	2 180	1 820	1 380
	差值 4	-0.61	-0.17	0.22	0.32	0.27	0	-370	460	1 200	1 340	1 310	990
	1956-1990 年	33.82	31.99	30.98	30.61	30.95	32.26	9 520	5 870	4 300	3 870	4 380	6 460
	1991-2002 年	32.39	30.46	29.55	29.21	29.63	30.96	9 680	6 230	4 900	4 480	5 050	6 990
	2003-2008 年	31.84	29.86	29.05	28.77	29.46	30.59	9 290	6 140	5 030	4 750	5 680	7 440
	2009-2015 年	30.65	29.21	29.30	29.20	29.33	30.25	8 690	6 520	6 550	6 440	6 620	8 040
	沙市站 2003-2015 年	31.20	29.51	29.18	29.00	29.39	30.41	8 970	6 340	5 850	5 660	6 180	7 760
	差值 1	-1.43	-1.53	-1.43	-1.40	-1.32	-1.30	160	360	600	610	670	530
	差值 2	-0.55	-0.6	-0.5	-0.44	-0.17	-0.37	-390	-90	130	270	630	450
	差值 3	-1.74	-1.25	-0.25	-0.01	-0.3	-0.71	-990	290	1 650	1 960	1 570	1 050
	差值 4	-1.19	-0.95	-0.37	-0.21	-0.24	-0.55	-710	110	950	1 180	1 130	770

注: 差值 1 为 1991-2002 年与 1956-1990 年相比较; 差值 2、3、4 分别是 2003-2008 年、2009-2015 年、2003-2015 年与 1991-2002 年相比较。

三峡水库枯期补水调度主要集中在 12 月-次年 4 月, 期间, 沙卵石河段流量增大对水位的抬高作用能够抵消河床下切造成的枯水位降幅, 1-3 月尚有一定富余, 对于维持近坝段最低枯水位稳定有关键作用, 沙质河段流量增大同样能够缓解河床下切对于枯水位的影响, 由于该段枯水位降幅偏大, 当前的补水强度还不足以消除河床下切的影响。

3.2 极枯水位及历时变化

三峡水库蓄水前, 上荆江年最小流量无明显变化趋势, 但最枯水位持续下降 (图 2), 河床冲刷是这一现象产生的主要原因。20 世纪 60 年代后期开始, 上荆江先后经历了因下荆江自然裁弯和人工裁弯带来的溯源冲刷、葛洲坝水利枢纽运行后的河床冲刷, 几十年间河床基本处于冲刷状态, 1966-2002 年上荆江枯水河槽的河床平均高程累积下降约 0.96 m。三峡水库蓄水后, 长江流域遭遇相对偏枯的水文周期, 2006 年是流域性的极枯水文年, 2011 年长江中游洞庭湖、鄱阳湖遭遇旱情, 多项研究指出三峡水库蓄水加速了两湖地区枯水位下降^[16], 甚至是两湖枯水情势的主要诱因^[17]。实际上, 三峡水库蓄水补水调度一定程度上改变了最枯水位持续下降的趋势, 历年最枯水位变化过程出现转折,

由下降转为上升,尤其是枝城站,1991-2002年最低枯水位均值为35.12 m,2003-2015年最低枯水位均值抬升至35.49 m(图3a)。类似地,沙市站1991-2002年最低枯水位均值为28.67 m,在河床大幅度冲刷下切的前提下,2003-2015年最低枯水位均值仍能达到28.58 m,与蓄水前相当(图3b)。可见,水库补水调度对于上荆江最低枯水位的积极效应比较明显。

不仅如此,从极枯水位持续历时来看,以1991年以来年内出现频率不超过20%为标准,确定枝城站年内水位低于35.5 m,沙市站低于29.0 m的持续时间如表2所示。三峡水库蓄水前上荆江极枯水位历时呈增加趋势,枝城、沙市站极枯水位历时分别由1956-1990年的16 d、0 d增至1991-2002年内的47 d、18 d。三峡水库蓄水后,沙卵石河段内,水库补水调度基本上能够消除枯水周期及河床冲刷下切对于极枯水位历时的双重影响,补水调度期2009-2015年枝城站基本不再出现低于35.5 m的水位。可见,沙质河段内,补水调度对极枯水位历时也有一定的积极效应,但是枯水周期及河床冲刷下切的影响程度更大。可以预见,若水库不进行枯水补水,即对比2008年前后的情况,沙市站极枯水位历时会更长。三峡水库蓄水后,尽管上荆江同时遭遇枯水周期和河床冲刷下切,其沙卵石极枯水位历时却仍有所下降,不能否认,这与水库的枯期补水调度关系密切;对于下游沙质河床,虽然蓄水后相较于蓄水前极枯水位历时有所增加,但在枯期补水调度主要作用期2009-2015年内,相较于补水调度前的2003-2008年,水库补水对于其枯水历时仍有一定的缩短作用。

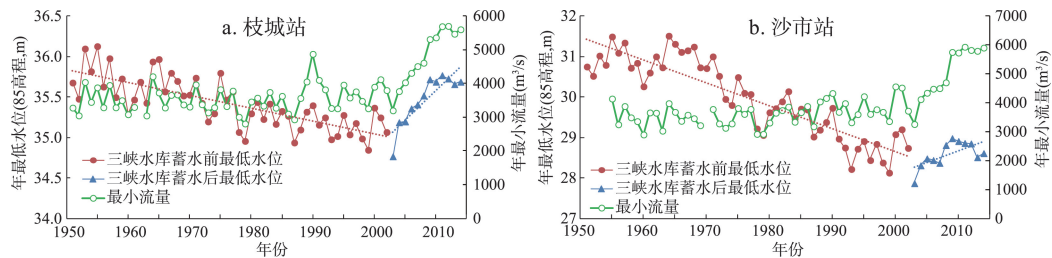


图3 上荆江枝城站、沙市站年最小流量和最枯水位变化过程

Fig. 3 Variations in minimum flow and lowest water level at Zhicheng and Shashi gauging stations

表2 上荆江枝城站、沙市站极枯水位历时变化统计

Tab. 2 Variation in duration of extremely low water level at Zhicheng and Shashi gauging stations

统计项目	特征值	1956-1990年	1991-2002年	2003-2008年	2009-2015年	2003-2015年
枝城站水位低于35.5 m历时(d)	最大值	90	85	85	0	85
	平均值	16	47	28	0	13
沙市站水位低于29.0 m历时(d)	最大值	0	52	96	68	96
	平均值	0	18	48	31	39

3.3 同流量枯水位变化

(1) 三峡水库蓄水前

三峡水库蓄水前,上荆江先后经历了下荆江裁弯缩短流程的下边界水位下降、河床溯源冲刷下切及葛洲坝运行沿程冲刷下切等影响,同流量枯水位一直处于持续下降的趋势。但不同工程形式的主要作用区域及影响程度有所区别,下荆江裁弯对于较远的沙卵石河段影响较小,1966-1975年枝城站7000 m³/s对应枯水位累积降幅约0.33 m,且无明显发展趋势,对沙市站枯水位影响较为直接,其降幅为1.07 m。此后直至1993年,上荆

江一直处于裁弯工程和葛洲坝枢纽运行的双重影响下，其枯水位下降仍较为明显，至1993年，枝城站、沙市站7000 m³/s下枯水位累积降幅分别达到1.06 m、2.42 m。随着河床逐渐调整，加之1998年长江流域遭遇特大洪水，挟带大量泥沙至长江中下游，上荆江河床普遍淤积^[18]，使得1993-2003年枯水位下降幅度较小，至2003年枝城站、沙市站枯水位累积降幅分别增至1.12 m、2.63 m（表3）。

表3 三峡水库蓄水前后上荆江枝城站、沙市站同流量下枯水位累积降幅

Tab. 3 Drop of low water level at Zhicheng and Shashi gauging stations before and after the water impoundment of TGR														
控制站	流量(m ³ /s)	时段	1966	1970	1975	1980	1987	1991	1993	1996	1998	2001	2002	2003
枝城站	5000	相对于1966年水位 累积降幅(m)	0	0.32	0.34	0.43	0.87	0.93	0.92	0.88	0.93	0.83	1.02	1.04
	7000		0	0.32	0.33	0.65	0.84	1.07	1.06	0.99	0.84	1.22	1.25	1.12
沙市站	6000		0	0.28	0.96	1.07	1.86	2.42	2.68	2.69	2.37	2.56	2.69	2.70
	7000		0	0.35	1.07	1.19	1.53	2.17	2.42	2.40	2.33	2.39	2.45	2.63
			三峡水库初期运行期						三峡水库175 m试验性蓄水期					
控制站	流量(m ³ /s)	时段	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
枝城站	5000	相对于2003年水位 累积降幅(m)	0.01	0	-0.10	-0.13	-0.13	-0.27	-0.29					
	7000		0	-0.02	-0.18	-0.25	-0.25	-0.41	-0.41	-0.49	-0.54	-0.58	-0.59	-0.59
沙市站	6000		-0.31	-0.31	-0.44	-0.48	-0.43	-0.76	-1.01	-1.28	-1.30	-1.50	-1.60	-1.74
	7000		-0.32	-0.31	-0.40	-0.44	-0.36	-0.73	-0.82	-1.15	-1.20	-1.34	-1.43	-1.64

为明确引起枯水位下降的主要因素，建立7000 m³/s流量下，上荆江枯水位与枯水河槽平均高程相对于1966年的累积降幅的相关关系，以及两控制站枯水位下降幅度的关系（图4）。两者存在较为明显的正向关系，且沙市站两者关系较好，枝城站较差，表明三峡水库蓄水前河床下切和下游水位下降是枯水位变化的主要控制因素。枯水位下降的沿程差异性有两方面控制因素，一方面主要工程作用程度不同，下荆江裁弯的影响程度较葛洲坝枢纽运行更大^[19]，且对沙市站的作用更为明显；另一方面沙卵石河段内分布有多个深泓高凸的控制性节点，节点的卡口效应对下游枯水位下降上溯的阻隔作用较强。

(2) 三峡水库蓄水后

三峡水库蓄水后，上荆江进入强冲刷状态，同流量上荆江枯水位下降明显。枝城站7000 m³/s下，2015年相对2003年枯水位累积下降约0.59 m，且下降主要发生在2009年之前，2009年相对于2003年枯水位累积下降约0.41 m，之后枯水位下降幅度减缓；沙市站枯水位下降幅度更大，7000 m³/s下，2015年相对2003年枯水位累积下降约1.64 m，与枝城站相反，沙市站枯水位下降主要发生在2008年之后，2008年相对于2003年枯水位累积下降仅为0.36 m，之后枯水位下降速度加快（表3）。忽略统计时段内流量出现频率的差异，同时，2003年后枯水期荆江南岸的松滋口、太平口及藕池口均基本处于断流状态，河床冲刷下切可以认为是影响同流量枯水位下降的单一控制因素。

紧邻坝下游的沙卵石河段（宜昌—枝城河段）和沙质河床起始段沙市河段冲刷发展十分迅速，河床冲刷以纵向下切为主，横向展宽并不明显，河床高程刷低与枯水位下降的对应关系明确（图4）。上荆江同流量枯水位下降的基本控制因素明确，一是河床的冲刷下切，集中体现在沙市站，其枯水位几乎与枯水河槽平均高程等幅下降，二是下游水位下降的传递效应，枝城站枯水位下降兼有河床下切和下游水位下降两方面因素。显然，枝城站枯水位与下游水位下降的关系并不连续，2009年之前，其枯水位下降速度比沙市站更快，其主要原因在于沙卵石河段冲刷发展极为迅速，尤其是深泓高凸段的覆盖

层冲刷集中在这一时期;2009年之后,一方面沙卵石河段冲刷强度下降,且深泓高凸段(一般指芦家河卡口段^[9])相对稳定(图2b),对于当地及下游枯水位下降的上溯有较好的阻滞效应,这在以往众多研究中已达成共识^[9,20];另一方面河床粗化显著,由沙卵石河段河床组成粗化成卵石夹沙,2010年之后多个断面无法取到床沙,所有的固定观测断面床沙小于0.25 mm的泥沙颗粒沙量百分数都在下降(图5),17个断面的均值由2003年的69.4%下降至2010年的24.4%,相比较而言,下游沙质河床也在粗化,但粗化程度显然较上游沙卵石河段偏弱,2003-2014年,37个固定断面床沙<0.25 mm的泥沙颗粒沙量百分数均值仅下降12.7个百分点。两方面综合作用下,下游沙质河床枯水位快速下降,枝城站枯水位下降的速度趋于减缓(图4c)。

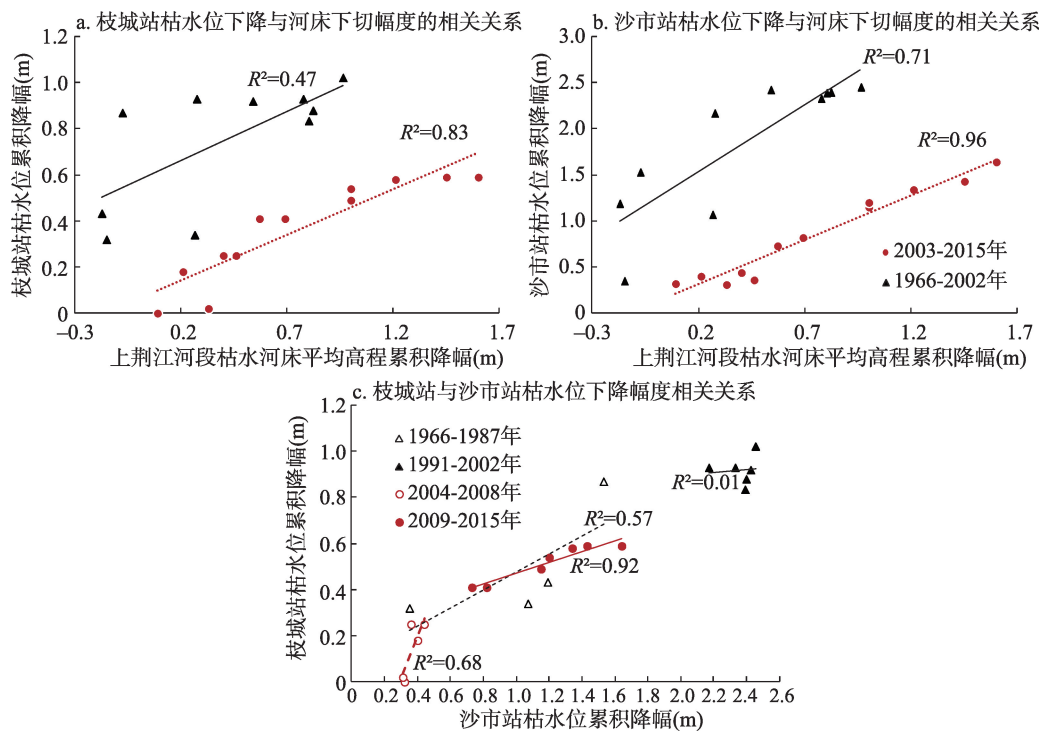


图4 枝城、沙市枯水位降幅相关关系及其与河床平均高程下切的关系

Fig. 4 Correlation between drop of low water level and bed scour at Zhicheng and Shashi gauging stations

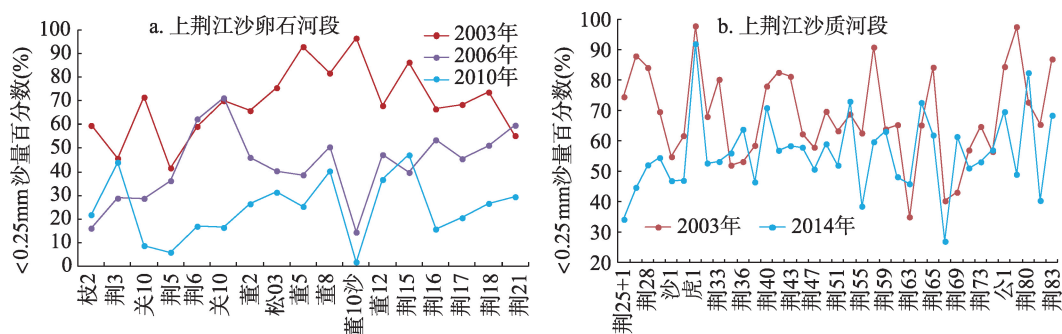


图5 2003年以来上荆江沙卵石河段、沙质河床固定断面床沙<0.25 mm颗粒沙重百分数变化

Fig. 5 Variations in bed sands ($d<0.25$ mm) of gravel and sandy channel in upper Jingjiang reach since 2003

三峡水库拦沙效应下,上荆江河床冲刷不可避免,造成同流量枯水位大幅下降。枯水位下降过程、累积降幅与河床冲刷发展过程、平均高程累积降幅的对应关系较好。沙质河段水位降幅显著地较沙卵石河段偏大,产生的原因主要在于沙卵石河段深泓高凸段较为稳定,对枯水位仍有较强的卡口控制作用,且河床粗化显著,糙率增大,也能一定程度上抑制水位降幅,加之沙卵石河段2008年之后陆续实施了以维持枯水位稳定为主要目标的航道整治工程,通过限制关键洲滩来缓解枯水位下降速度^[4]。

4 结论

(1) 三峡水库蓄水后,同流量枯水位下降与河床冲刷对应关系明显,沙市站枯水位几乎和枯水河槽平均高程等幅下降。2009年之前沙卵石河段枯水位下降速度快,之后趋于缓慢,沙质河段则相反;水位累积下降幅度沙质河段较沙卵石河段显著偏大,深泓高凸段相对稳定、河床粗化、航道整治工程等是沙卵石河段枯水位降幅偏小的主要原因。

(2) 三峡水库补水调度加大枯水期下泄流量,减缓了上荆江汛前枯期因河床下切造成的水位降幅。1-4月枝城站水库补水调度能够补偿因河床下切带来的枯水位降幅,枯水补水效应沿程递减,沙市站仅在2月,当补水流量接近2000 m³/s时,平均枯水位才能与蓄水前持平。

(3) 三峡水库枯期补水调度改变了上荆江最枯水位持续下降的趋势。蓄水后河床大幅冲刷下切条件下,枝城站最低枯水位均有所抬升,沙市站最低枯水位均值与蓄水前基本持平;补水调度使得枝城站年内极枯水位历时缩短明显,调度期内沙市站极枯水位历时也较调度前有所减少。

参考文献(References)

- [1] SAAD M B A. Nile River morphology changes due to the construction of High Aswan Dam in Egypt. The Planning Sector Ministry of Water Resources and Irrigation, 2002.
- [2] Pinter Nicolae, Heine R A. Hydrodynamic and morph dynamic response to river engineering documented by fixed-discharge analysis, Lower Missouri River, USA. Journal of Hydrology, 2005, 302(1): 70-91.
- [3] Williams G P, Wolman M G. Downstream effects of dams on alluvial rivers, U.S. Geological Survey Professional Paper, 1984: 1286, 38.
- [4] Sun Zhaohua, Li Yitian, Li Ming, et al. Effect of channel degradation on lower level in Yichang-Shashi reach in the Yangtze River. Hydro-Science and Engineering, 2007(4): 14-20. [孙昭华, 李义天, 李明, 等. 长江中游宜昌—沙市段河床冲淤与枯水位变化. 水利水运工程学报, 2007(4): 14-20.]
- [5] Jiang Ling, Li Yitian, Sun Zhaohua, et al. Channel evolution of Jingjiang reach and its influences on waterway after impoundment of the Three Gorges Project. Journal of Basic Science and Engineering, 2010, 18(1): 1-10. [江凌, 李义天, 孙昭华, 等. 三峡工程蓄水后荆江沙质河段河床演变及对航道的影 响. 应用基础与工程科学学报, 2010, 18(1): 1-10.]
- [6] Chen Fei, Fu Zhongmin, Liu Huaihan, et al. Analysis of navigation conditions in gravel bed reach at initial impounding stage of Three Gorges Reservoir. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012, 31(5): 127-132. [陈飞, 付中敏, 刘怀汉, 等. 三峡蓄水初期坝下沙卵石河段航道条件分析. 水力发电学报, 2012, 31(5): 127-132.]
- [7] Zhu Lingling, Li Yitian, Sun Zhaohua, et al. Preliminary analysis on the Zhijiang-Jiangkou channel evolution trend after the impoundment of Three Gorges Project. Journal of Sediment Research, 2009(2): 8-15. [朱玲玲, 李义天, 孙昭华, 等. 三峡蓄水后枝江—江口水道演变趋势初步分析. 泥沙研究, 2009(2): 8-15.]
- [8] Chen Zhongyuan, Wang Zhanghua, Finlayson Brian, et al. Implications of flow control by the Three Gorges Dam on sediment and channel dynamics of the Middle Yangtze (Changjiang) River, China. Geology, 2010, 38(11): 1043-1046.
- [9] Sun Zhaohua, Huang Ying, Cao Qixin, et al. Spatial and temporal variations of the low flow stage in the immediate

- downstream reach of the Three Georges Dam. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2015, 23(4): 694-704. [孙昭华, 黄颖, 曹绮欣, 等. 三峡近坝段枯水位降幅的时空分异性及成因. *应用基础与工程科学学报*, 2015, 23(4): 694-704.]
- [10] Yangtze River Academy. 1-D mathematic model calculation and analysis of scour-silting for Yichang to Datong reach downstream the Three Gorges Project//*Research on Sediment Problems of Three Gorges Reservoir Construction on Yangtze River*. Vol.7. Beijing: Intellectual Property Publishing House, 2002: 258-311. [长江科学院. 三峡水库下游宜昌至大通河段冲淤一维数模计算分析(二)//*长江三峡工程泥沙问题研究(第七卷)*. 北京: 知识产权出版社, 2002: 258-311.]
- [11] China Hydropower Engineering Research Academy. River scour-silting calculation downstream from TGP//*Research on Sediment Problems of Three Gorges Reservoir Construction on Yangtze River*. Vol.7. Beijing: Intellectual Property Publishing House, 2002: 149-210. [中国水利水电科学研究院. 三峡水库下游河道冲淤计算研究//*长江三峡工程泥沙问题研究(第七卷)*. 北京: 知识产权出版社, 2002: 149-210.]
- [12] Xu Quanxi. Study of sediment deposition and erosion patterns in the middle and downstream Changjiang mainstream after impoundment of TGR. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2013, 32(2): 146-154. [许全喜. 三峡工程蓄水运用前后长江中下游干流河道冲淤规律研究. *水力发电学报*, 2013, 32(2): 146-154.]
- [13] Han Jianqiao, Sun Zhaohua, Li Yitian, et al. Changes and caused of lower water level in Yichang-Chenglingji reach after impounding of Three Gorges Reservoir. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2011, 44(6): 685-690. [韩剑桥, 孙昭华, 李义天, 等. 三峡水库蓄水后宜昌至城陵矶河段枯水位变化及成因. *武汉大学学报(工学版)*, 2011, 44(6): 685-690.]
- [14] Huang Yue, Yao Shiming, Lu Jinyou. Impact of TGP operation on the hydrologic regime in the downstream main channel of the dam. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2011, 28(7): 76-81. [黄悦, 姚仕明, 卢金友. 三峡水库运用对坝下游干流河道水文情势的影响研究. *长江科学院院报*, 2011, 28(7): 76-81.]
- [15] Xia Junqiang, Zong Quanli, Deng Shanshan, et al. Adjustments in reach-scale bankfull channel geometry of Jingjiang reach after operation of Three Gorges Project. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2015, 49(2): 238-245. [夏军强, 宗权利, 邓姗姗, 等. 三峡工程运用后荆江河段平滩河槽形态调整特点. *浙江大学学报(工学版)*, 2015, 49(2): 238-245.]
- [16] Lai Xijun, Jiang Jiahu, Huang Qun. Water storage effects of Three Gorges Project on water regime of Poyang Lake. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2012, 31(6): 132-148. [赖锡军, 姜加虎, 黄群. 三峡工程蓄水对鄱阳湖水情的影响格局及作用机制分析. *水力发电学报*, 2012, 31(6): 132-148.]
- [17] Zhang Q, Li L, Wang Y G, et al. Has the Three-Gorges Dam made the Poyang Lake wetlands wetter and drier? *Geophysical Research Letters*, 2012, 39: L20402. doi: 10.1029/2012GL053431.
- [18] Ou Chaoming, Li Jingbao, Zhou Yongqiang, et al. Evolution characters of water exchange abilities between Dongting Lake and Yangtze River. *Journal of Geographical Sciences*, 2014, 24(4): 731-745.
- [19] Tao Jiayuan. The influence of straightening the Jingjiang River on it and the Dongting Lake. *Journal of Central China Normal University (Natural Sciences)*, 1989, 23(2): 263-267. [陶家元. 荆江裁弯工程对荆江和洞庭湖的影响. *华中师范大学学报(自然科学版)*, 1989, 23(2): 263-267.]
- [20] Li Yitian, Ge Hua, Sun Zhaohua. Primary analysis of the bottle-neck reach impact on Yichang water level in dry season downstream from Gezhouba. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2007, 15(4): 435-444. [李义天, 葛华, 孙昭华. 葛洲坝下游局部卡口对宜昌枯水位影响的初步分析. *应用基础与工程科学学报*, 2007, 15(4): 435-444.]

Response of low water level change to bed erosion and the operation of Three Gorges Reservoir in upper Jingjiang reach

ZHU Lingling¹, YANG Xia², XU Quanxi¹

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

2. Three Gorges Construction and Operation Management Department, Yichang 443133, Hubei, China)

Abstract: The upper Jingjiang reach, which is located at the beginning of sandy channel downstream from the Three Gorges Reservoir (TGR), is undergoing continuous erosion. As a response to riverbed erosion, there has been an obvious water level drop during the dry seasons in the past decades. And this phenomenon has drawn much attention because of its close connections with irrigation, navigation, water environment, dike safety, and so on. In this article, by using the reorganized data of the gauging stations, elaborate efforts were made to examine the characteristics of the low water level in upper Jingjiang reach, including the variations in the same discharge, the same stage and the annual minimum. Besides, the impacts of the TGR operation in dry seasons were also analyzed. This operation mainly refers to the increase of the water release from TGR when its water level almost reached 175 m, which was to ease the drought-prone downstream since 2009. The results show that: (1) the drop of the water level in the discharge of 7000 m³/s were 0.59 m and 1.64 m at Zhicheng and Shashi gauging stations from 2003 to 2015, respectively. On the contrary, the lowest water level has been raised, and the duration of extremely low water level has been reduced since the impoundment of TGR; (2) The drop of low water level was evidently affected by the river bed erosion at Shashi gauging station. The drop of its low water level and the erosion of the nearly river bed were found to be of almost the equal magnitude. However, a smaller drop of low water level at Zhicheng gauging station has arisen, under the comprehensive influences of channel morphology, river bed armoring and channel regulation works; (3) The compensation operation of TGR in dry seasons can raise the monthly-averaged water level from January to April by increasing its water release. In addition, the annual lowest water level was raised, and the extremely low water level duration has been reduced. However, such compensation still cannot eliminate the impact of river bed erosion at Shashi station, even if the compensating discharge reached 2000 m³/s.

Keywords: upper Jingjiang reach; low water level for same discharge; low water level; annual lowest water level; compensation operation of TGR in dry season