

三峡大坝下游水位变化与河道形态调整关系研究

杨云平^{1,2}, 张明进¹, 孙昭华², 韩剑桥³, 李华国¹, 由星莹⁴

(1. 工程泥沙交通运输行业重点实验室 交通运输部天津水运工程科学研究所, 天津 300456;
2. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072; 3. 西北农林科技大学水土保持研究所,
杨凌 712100; 4. 湖北省水利水电规划勘测设计院, 武汉 430064)

摘要: 三峡水库蓄水利用已有13年,对坝下游洪、枯水位和河道形态调整的影响已初步显现,通过对1955-2016年长江中游水位、河道地形等资料的分析,结果表明:①坝下游各水文站同流量枯水位下降、洪水位变化不大,最低水位上升,最高水位下降趋势;②2002年10月-2015年10月枯水河槽冲刷量占平滩河槽冲刷量的95.5%,冲淤分布由蓄水前“冲槽淤滩”转为“滩槽均冲”,不同蓄水阶段存在差异;③河槽冲刷过程中,上荆江及以上河段枯水位下降趋势趋缓,下荆江及以下河段下降速率增加,应采取防控措施遏制河道水位下降趋势;④枯水河槽冲刷是长江中下游航道水深提升的基础,枯水位降幅小于深槽下切深度,在河道和航道整治工程综合作用下航道尺度提升,提前5年实现了2020年航道尺度规划目标;⑤平滩水位以上河槽形态调整不大,在河床粗化、岸滩植被、人类活动等综合作用下河道综合阻力增加,出现了中洪水流量—高水位现象,应引起足够重视。三峡水库汛期调蓄作用可有效提升中下游洪水防御能力,但不排除遭遇支流洪水叠加效应,中下游洪水压力仍然较大。

关键词: 枯水位;洪水位;河床调整;成因分析;三峡大坝;长江中下游

DOI: 10.11821/dlxb201705002

1 引言

三峡工程是当今世界上最大的综合性水利枢纽工程,具有防洪、发电、航运、供水和节能减排等巨大的综合效益^[1],其建设和运行期对坝下游河道冲淤、洪枯水位等产生的影响,一直备受全球研究人员关注。河道冲淤:1950-1988年宜昌—汉口河段以淤积为主,2003-2007年转为冲刷^[2];2009-2010年与1998-2002年比较,坝下游100 km内深泓单向下切,下游为冲淤交替变化^[3-4],冲淤河槽分布逐渐由蓄水前“冲槽淤滩”转为“滩槽均冲”^[5-7],且冲刷集中在宜昌—城陵矶河段^[6],并集中在枯水河槽^[8];2012年与2002年相比较,长江中下游河道冲刷以下切为主,断面趋于窄深化发展^[9]。已有河道形态演变研究主要是基于蓄水后某一时段的比较,未全面反映不同蓄水阶段、河段单元尺度调整的差异。枯水位变化:三峡大坝下游枯水位为下降趋势^[10],与预测结果一致^[11-12],也与全球大

收稿日期:2016-12-26; 修订日期:2017-02-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(51579123, 51579185, 51339001); 国家重点研发计划(2016YFC0402106); 西北农林科技大学博士科研启动基金(2452015337); 中央级公益性科研院所基本科研业务费(TKS160103) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.51579123, No.51579185, No.51339001; National Key Research and Development Program of China, No.2016YFC0402106; Doctoral Foundation of Northwest A&F University, No.2452015337; Fundamental Research Funds for Central Welfare Research Institutes, No.TKS 160103]

作者简介: 杨云平(1985-),男,黑龙江绥化人,博士,从事水库下游水沙输移、地貌调整及河口海岸演变等相关研究。
E-mail: yangsan520_521@163.com

型水库下游枯水位下降规律一致^[13]。洪水位变化:在全球大型水库下游,洪水位表现出略有上升或变化不大的规律^[13];三峡水库蓄水后,同流量洪水位变化的认识尚未统一,争议的焦点在洪水位下降^[14]、变化不大或无明显上升^[15]、上升趋势^[16-17]等3个方面。部分研究成果表明:三峡大坝下游河道在清水下泄的条件下,没有降低洪水位,反而荆江向洞庭湖分洪减小,河道泄洪能力萎缩^[17];2003-2013年期间,汉口站流量为50000 m³/s流量对应水位有抬高趋势^[17]。洪枯水位变化成因:河道的大幅冲刷,是引起同流量枯水位下降的主因;滩地淤积、洪水河宽缩窄、床面粗化及岸滩植被等变化是洪水位抬高的控制要素^[18-19]。三峡水库蓄水后,坝下游河道形态发生调整,与蓄水前相比,河床粗化、水流漫滩天数减少、人类活动增加等要素对洪水位变化的影响缺乏关注。2016年6-8月长江中下游发生区域性洪水,螺山及以下河段超出警戒水位,但出现警戒水位对应的流量均小于1998年、2010年,其原因也是本文关注的内容。

综上,已有研究关注了三峡大坝下游河道整体冲淤,而对于洪、枯水位变化成因及河道形态调整的阶段性特征有待深入研究。本文以1955-2016年水位、河道地形等资料为分析对象,在洪枯水位、河道形态调整研究基础上,明确单元河段尺度上河道形态调整过程,结合河道综合阻力、坝下游人类活动等要素,明晰洪、枯水位变化成因,并分析水位变化与长江防洪情势和航道水深关系。

2 研究区域及水沙条件

2.1 研究区域

三峡大坝下游宜昌一大通河段长度1183 km,宜昌—杨家脑为砂卵石河段,长度约116.4 km,杨家脑以下为沙质河段,长度为1066.6 km(图1)。研究河段内干流有宜昌、枝城、沙市、监利、螺山、汉口、九江及大通站等水文站;洞庭湖分流口为松滋口、太平口和藕池口,习称洞庭湖三口,湖区有湘江、资水、沅江和澧水入汇,习称洞庭湖四水,入江水文控制站为城陵矶站;汉江入江水文控制站为皇庄站;鄱阳湖入江水文控制

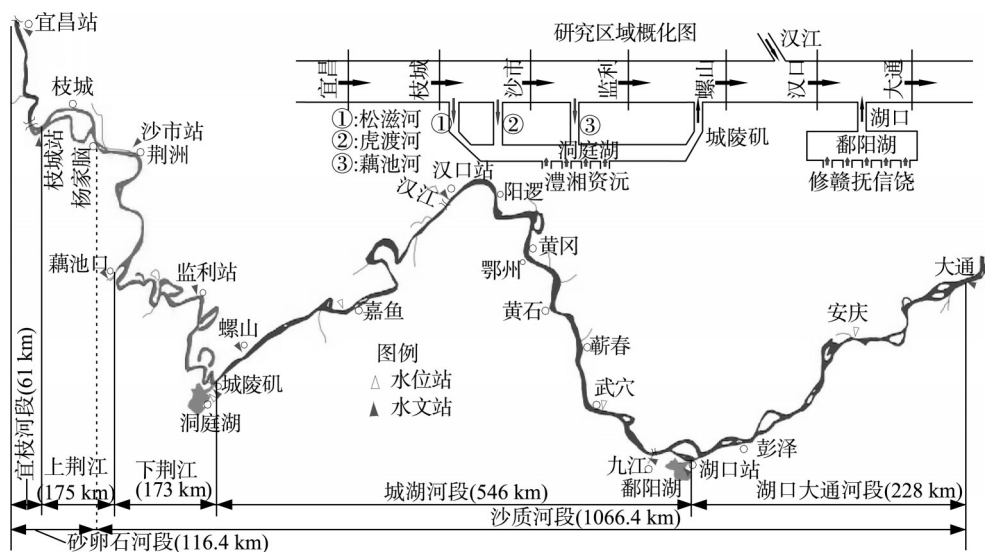


图1 三峡水库坝下游河段概略图

Fig. 1 Schematic of the river sections in the downstream of the Three Gorges Reservoir (TGR)

站为湖口站，湖区有修水、赣江、抚河、信江及饶河入湖，习称鄱阳湖五河。

2.2 资料来源说明

本文涉及的水文站为宜昌、枝城、沙市、监利、螺山、汉口、九江、大通站，洞庭湖三口和城陵矶站，鄱阳湖湖口站。收集了1955-2016年大坝下游各水文站径流量、流量、输沙量和水位资料，1987-2014年宜昌—湖口河段的河道冲淤量和断面资料，1981-2016年宜昌—汉口河段沿程水尺资料，数据收集时间长度不一致，其截至年份为近3年，可充分体现近期的变化规律。各项数据来源如表1所示。

| 表1 三峡大坝下游水文泥沙观测数据来源 | | | | |
|--|----------------------|--------------|------------|----------------------|
| Tab. 1 Sediment source and hydrological data of the downstream of the Three Gorges Dam (TGD) | | | | |
| 序号 | 水文站及河段 | 资料内容 | 资料长度 | 数据来源 |
| 1 | 宜昌、枝城、沙市、监利、螺山、汉口、大通 | 水量、输沙量、流量、水位 | 1955-2016年 | 长江泥沙公报 长江水利委员会水文局 |
| 2 | 洞庭湖三口、城陵矶 鄱阳湖湖口 | 水量、沙量、流量 | | |
| 3 | 宜昌—湖口河段 | 冲淤量 | 1987-2015年 | 长江水利委员会水文局 |
| 4 | 宜昌—汉口水尺 | 水位 | 1981-2014年 | 长江航道规划设计研究院 |

2.3 水文泥沙变化

径流量和输沙量变化：1955-2015年宜昌站和大通站径流量无趋势性增加或减少，2003-2015年较1955-2002年分别减少7.7%和5.5%（图2a），主要是气候变化的影响^[20]；输沙量均呈现阶梯型减少趋势，2003-2015年减幅增加，大通站减幅小于宜昌站（图2b），这一现象与全球大型水坝下游泥沙输移规律一致^[21]。径流量和输沙量构成：三峡水库蓄水前后大通站径流量来自宜昌站、洞庭湖分汇、汉江入汇、鄱阳湖入汇及区间产汇流的比例相对稳定（图2c）；三峡水库蓄水前的3个时期大通站输沙量主要来自宜昌站，洞庭湖分沙淤积态势减缓，汉江来沙比例减小，鄱阳湖汇沙比例变化不大，干线河道呈

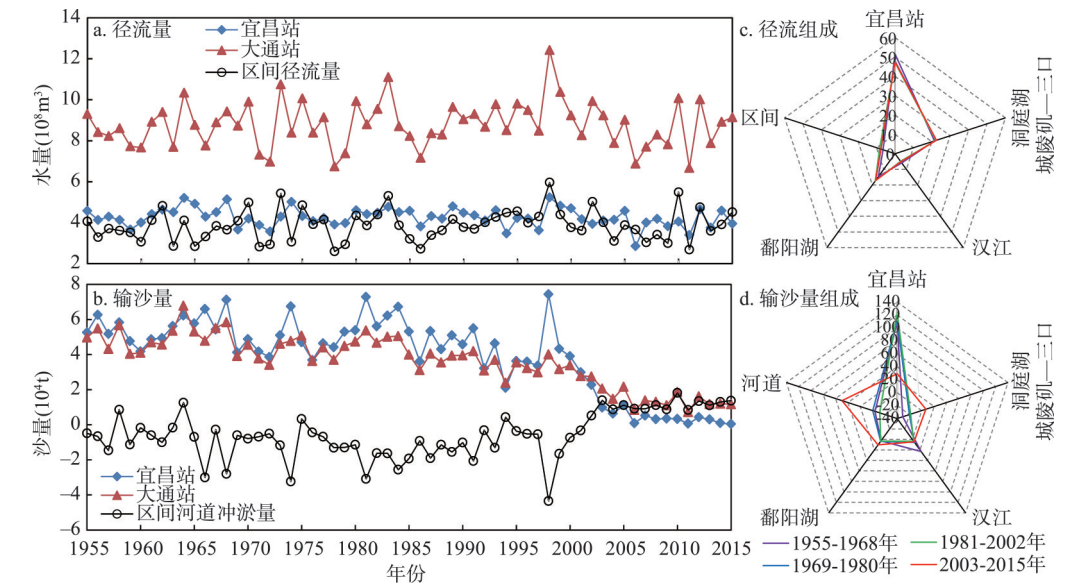


图2 三峡大坝下游水、沙通量变化

Fig. 2 Changes of discharge and flux in the downstream of the TGD

淤积态势。三峡水库蓄水后大通站输沙量来自宜昌站比例为29.2%，较蓄水前各时期比例大幅减小；洞庭湖分汇关系由分沙转变为汇沙，比例约占6.8%；汉江汇沙比例约占4.4%，与1955-2002年期间相比变化不大；鄱阳湖汇沙比例约10.2%，较蓄水前3个时期均增加；干线河道由淤积转为冲刷，冲刷沙量占大通站输沙量的49.5%。

3 三峡大坝下游河道洪、枯水位变化

3.1 同流量水位变化

选取2003年、2012年和2016年为研究代表年份，随着流量增加，宜昌、枝城、沙市、监利、螺山、汉口和九江站同流量—水位均为先减小后增大，存在增加和减少的转换临界流量，与水文站所在河段的平滩流量接近（图3）。在洪水时期，同流量洪水水位均为增大趋势，并未出现逾期的减少趋势。2016年、2012年分别与2003年比较，枯水和洪水增减趋势转换流量为减小趋势，表明大流量高洪水水位逐渐向中洪水流量高水位转变。

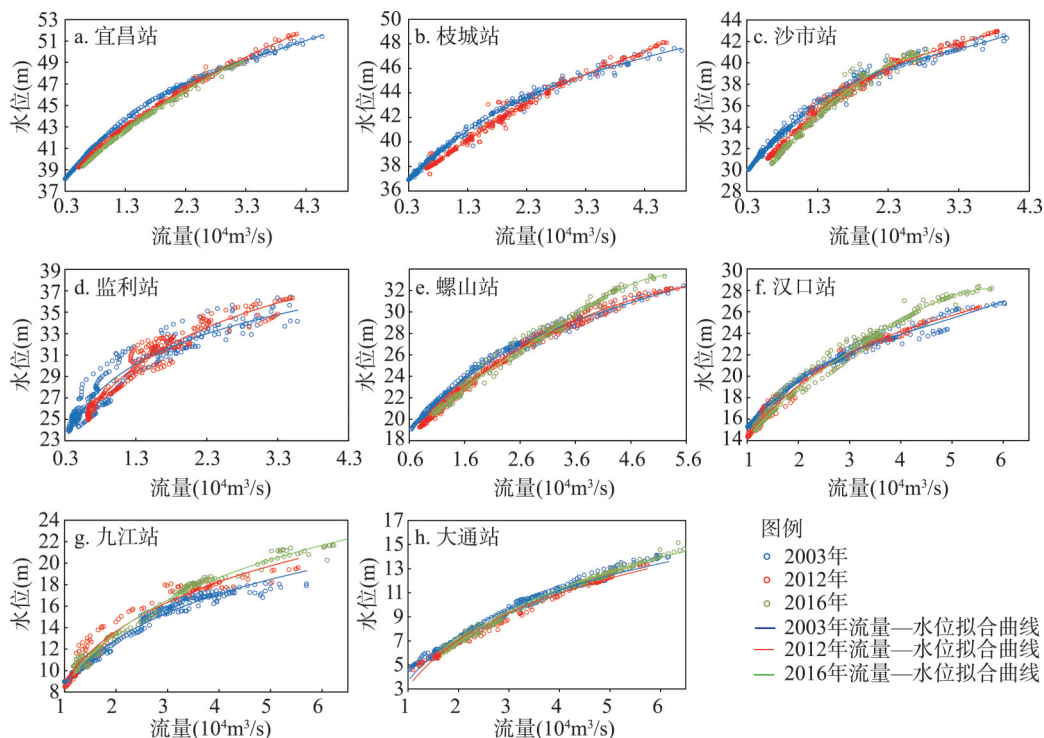


图3 三峡大坝下游水文站流量—水位关系

Fig. 3 Relationship between the water flow and water level in the lower reaches of the TGD

3.2 最高、最低水位变化

最低水位变化（图4）：三峡水库蓄水前，宜昌、枝城、沙市站年最低水位呈波动下降，蓄水后为上升趋势，螺山站和汉口站蓄水前后整体为上升趋势。最高水位变化（图4）：三峡水库蓄水前，宜昌、枝城、沙市站年最高水位呈波动下降，蓄水后无明显趋势性，其蓄水后的最大值低于蓄水前；三峡水库蓄水前螺山、汉口站最高水位略有抬高，蓄水后趋势性不明显。

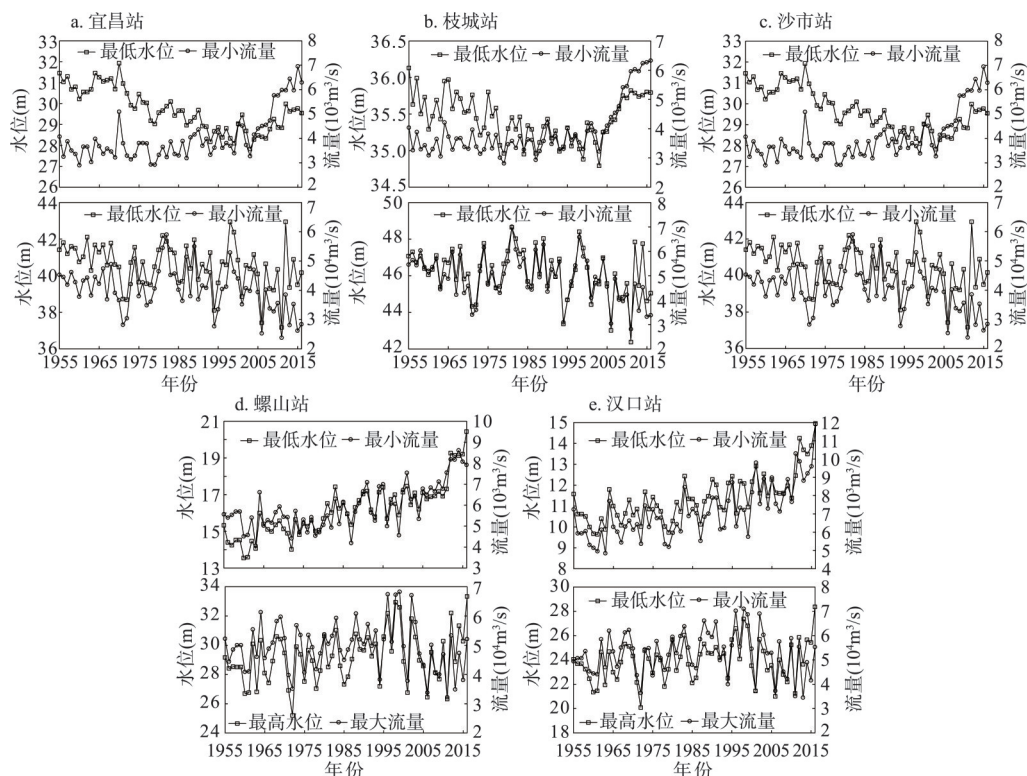


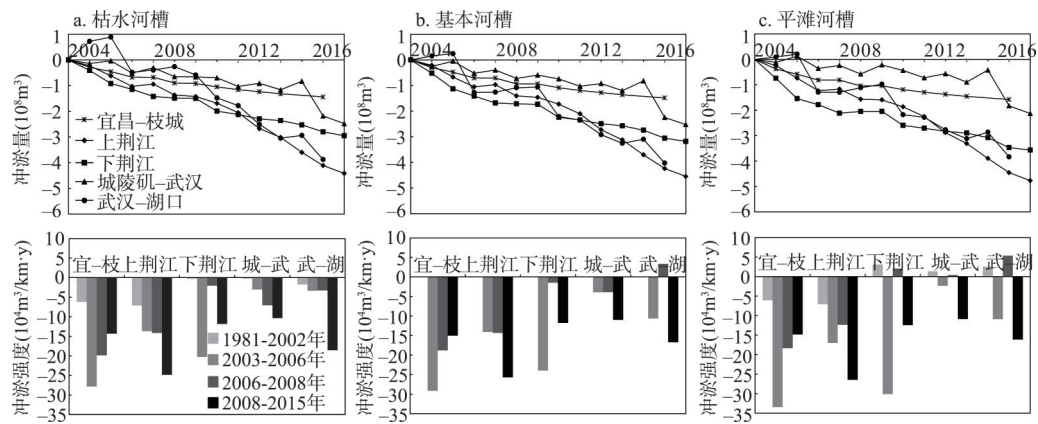
图4 三峡大坝下游水文站最高水位及最低水位变化

Fig. 4 Highest and lowest water levels in the downstream hydrologic stations of the TGD

4 三峡大坝下游河道冲淤调整过程

4.1 三峡水库蓄水前后河槽冲淤变化

1981-2002年期间, 宜昌—湖口河段枯水河槽冲刷, 宜昌—枝城及上荆江河段冲刷集中在枯水河槽, 枯水—平滩河槽之间略有淤积; 下荆江、城陵矶—汉口及汉口—湖口河段为淤积趋势, 表现出“冲槽淤滩”的演变特点^[6-7, 9]。2003-2015年期间, 宜昌—枝城、上荆江、下荆江、城陵矶—汉口、汉口—湖口河段总冲刷量分别为 -1.44 亿 m^3 、 -4.11 亿 m^3 、 -2.80 亿 m^3 、 -2.18 亿 m^3 、 -3.89 亿 m^3 (图5, 其中宜昌—枝城、汉口—湖口缺少2014年10月-2015年10月期间数据)。对应三峡水库不同的蓄水位阶段, 划分为2003-2006年、2006-2008年及2008-2015年比较单位河长枯水河槽、基本河槽和平滩河槽冲刷强度变化规律 (图5): 宜昌—枝城河段各河槽冲刷强度减弱; 上荆江枯水河槽和基本河槽冲刷强度增强, 平滩河槽为先减弱后增强; 下荆江各河槽单冲刷强度先减弱后增强; 城陵矶—汉口河段枯水河槽和基本河槽冲刷强度呈增强趋势, 平滩河槽先减弱后增强; 汉口—湖口河段枯水河槽冲刷强度增强, 基本河槽和平滩河槽先减弱后增强。单位河长冲刷强度沿程变化特点: 2003-2006年期间宜昌—枝城河段最大, 下荆江河段次之, 城陵矶—湖口河段最小; 2006-2008年期间最大区域在宜昌—枝城河段, 上荆江河段次之, 下荆江河段最小; 2008-2015年期间最大区域在上荆江河段, 汉口—湖口河段次之。2008-2015年期间单位河长冲刷强度最大区域已由2003-2008年期间的宜昌—枝城河段下移至上荆江, 同时下荆江及其下游河段冲刷强度增加, 受清水下泄的影响程度逐渐增强。



注：图中各河段枯水河槽、基本河槽和平滩河槽计算对应的流量均为宜昌流量为5000 m³/s、10000 m³/s、30000 m³/s。

图5 宜昌—湖口河段单位河长河床冲淤过程变化

Fig. 5 Erosion and deposition changes in the channels of the Yichang-Hukou Section

4.2 河道冲淤分布变化

枯水河槽定义为深槽，枯水—基本河槽之间为低滩，基本—平滩河槽之间为高滩。表2统计了枯水河槽、低滩和高滩冲淤量占平滩河槽冲淤量的比例，分析表明：

(1) 三峡水库蓄水前宜昌—枝城、上荆江河段枯水河槽冲刷，高、低滩小幅淤积；下荆江、城陵矶—湖口河段枯水河槽冲刷，高、低滩大幅淤积，表现出“冲槽淤滩”的演变特点。

(2) 2003-2008年宜昌—枝城、上荆江和下荆江河段枯水河槽、高、低滩均为冲刷趋势；城陵矶—汉口河段与三峡水库蓄水前一致，表现出“冲槽淤滩”的演变特点，且淤积集中在高滩；汉口—湖口河段为枯水河槽和低滩冲刷，高滩略有淤积。

(3) 2008-2015年与2003-2008年相比，宜昌—枝城、荆江河段冲刷更集中在枯水河槽，滩地冲刷比例减小；城陵矶—汉口河段冲刷集中在枯水河槽，低滩由淤积转为冲刷，高滩淤积减缓；汉口—湖口河段冲刷集中在枯水河槽，低滩由冲刷转为淤积，高滩持续淤积，表现出“冲槽淤滩”的演变特点。

表2 宜昌—湖口河段河槽冲淤比例变化

Tab. 2 Erosion and deposition proportion changes in the Yichang-Hukou Section

| 时间段 | 河段名称 | 宜昌—枝城 | 上荆江 | 下荆江 | 城陵矶—汉口 | 汉口—湖口 |
|-----------------------------------|---------|-------|-------|--------|--------|--------|
| | 河长(km) | 60.8 | 171.7 | 175.5 | 251.0 | 295.4 |
| 三峡水库蓄水前 (1981-2002年) | 枯水河槽(%) | 102.0 | 100.6 | 9.2 | 17.5 | 69.6 |
| | 低滩(%) | -2.0 | -0.6 | -109.2 | -117.5 | -169.6 |
| | 高滩(%) | | | | | |
| 2003-2008年 (2002年10月-2008年10月) | 枯水河槽(%) | 88.6 | 89.6 | 73.2 | 301.8 | 60.4 |
| | 低滩(%) | 1.7 | 2.2 | 11.6 | -30.7 | 48.3 |
| | 高滩(%) | 9.6 | 8.2 | 15.2 | -171.1 | -8.7 |
| 2009-2014年 (2008年10月-2015年11月) | 枯水河槽(%) | 96.4 | 94.0 | 95.4 | 95.3 | 115.0 |
| | 低滩(%) | 4.8 | 3.1 | -0.4 | 5.8 | -11.4 |
| | 高滩(%) | -1.1 | 2.9 | 5.0 | -1.1 | -3.6 |

注：表中正值表示冲刷比例，负值表示淤积比例。

5 枯水位变化的成因及其对航道水深的影响分析

5.1 枯水位变化与河道冲淤关系

2014年10月与2002年10月相比较,坝下游410 km河段内深泓为平均下切约1.50 m,其下游为冲淤交替变化(图6)。2003-2014年航行基准面水位与1981-2002年进行比较,在近坝段240 km内平均下降1.10 m,其下游为增加趋势。其中深泓下切集中在宜昌一枝城、上荆江和下荆江河段,水位下降主要在宜昌一枝城、上荆江河段(图6),在未来一段时期,应防控下荆江河段河床下切引起的枯水位下降。

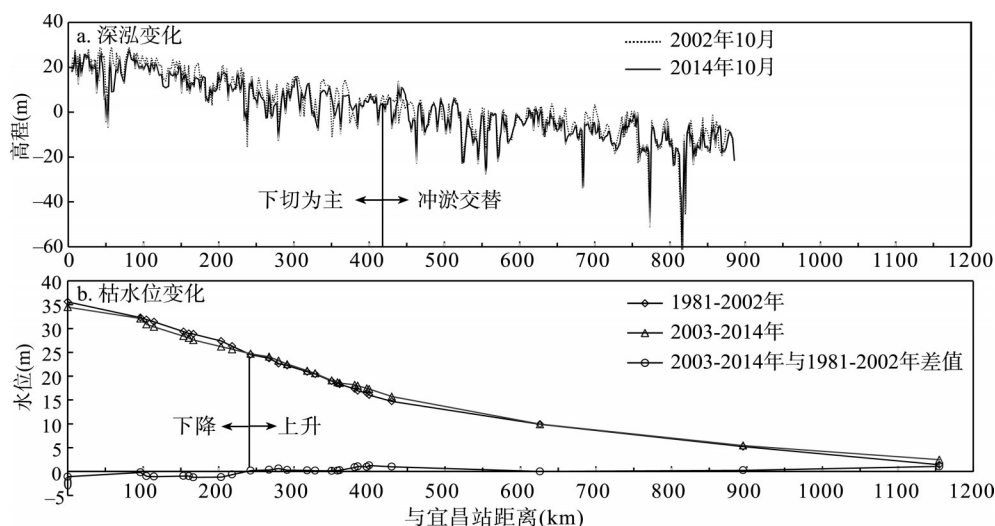


图6 三峡大坝下游河道深泓与枯水位关系

Fig. 6 Relationship between the thawed and dry TGR

以2003年、2008年和2014年枯水期(宜昌站流量为 $5600 \text{ m}^3/\text{s}$)为代表时间(图7),分析表明:2008-2014年与2003-2008年宜昌—磨盘溪、陈二口—汉口河段之间水位降幅增大,云池—枝城河段降幅减小。在沿程上,以枝城水尺分界,上、下游水位降幅均为先增大后减小,表明枝城河段对上下游水位的维持起到卡口或节点控制作用。枝城以下水位降幅有所增加,并有向上游传递趋势,应关注枝城以下河段因枯水河槽冲刷引起水位下降的溯源传递作用。

绘制各河段冲淤量与水位降幅的关系曲线(图8),两者表现出较好的相关性,随着

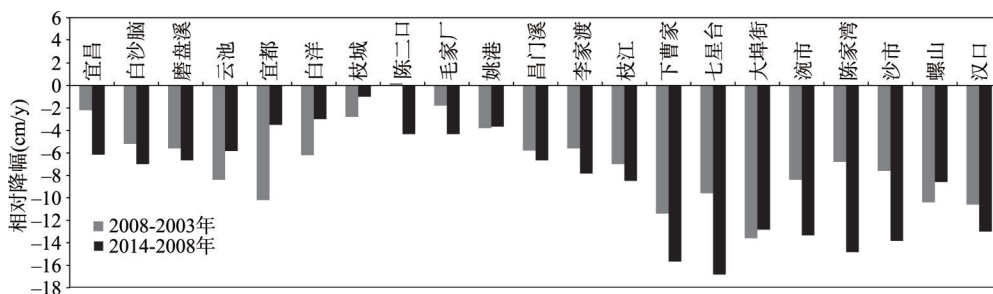


图7 宜昌—汉口河段水位下降过程

Fig. 7 Process of water level decline in Yichang-Hankou Section

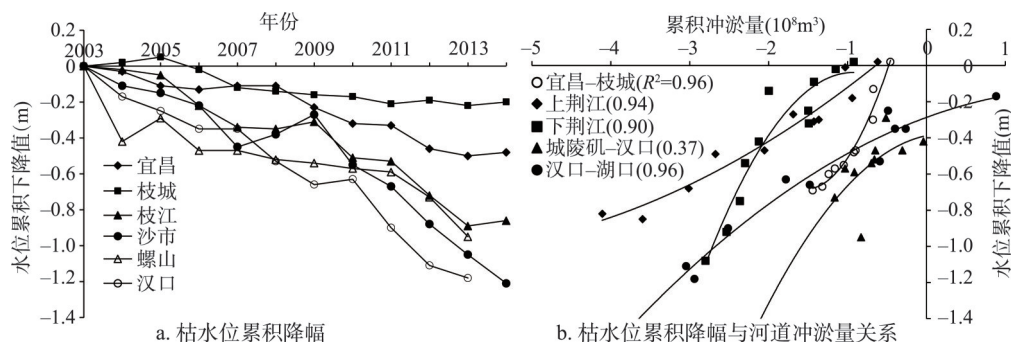


图8 河床冲淤量与枯水位关系

Fig. 8 Erosion and siltation amount of dry riverbed and its relationship with low water level

河道累积冲刷量增加枯水位为下降趋势。宜昌—枝城、上荆江河段枯水位随累积冲刷量增大其水位降幅有所减缓, 下荆江、城陵矶—汉口、汉口—湖口河段为增加趋势, 随着下荆江以下至湖口河段冲刷强度增强, 同流量枯水位仍存在进一步下降的可能。

5.2 枯水位变化与航道水深关系

三峡水库蓄水后, 坝下游河槽冲刷是航道水深提升的基础, 为了防控岸线崩退、边心滩萎缩、通航主汊道枯水期分流减少等不利变化, 2003-2015年期间长江航道管理部门对中下游航道实施了系统的整治工程。工程实施后, 宜昌—城陵矶、城陵矶—武汉、武汉—安庆河段航道水深由2003年的2.9 m、3.2 m和4.0 m, 提升至2015年的3.5 m、3.7 m和4.5 m, 航深提高了0.50~0.60 m, 同时航宽也增加。2015年航道尺度与长江干线2020年规划目标对比^[21-22], 提前5年实现了规划目标。

6 洪水位变化成因及对防洪情势的影响分析

6.1 河湖关系及干线河道冲淤对洪水位变化的影响

从泥沙冲淤平衡角度分析 (图9): 1960-2006年洞庭湖湖区泥沙淤积, 2007-2015年湖区为冲刷趋势; 1960-1999年鄱阳湖湖区泥沙为冲淤交替, 2000-2015年为冲刷趋势。实际上洞庭湖和鄱阳湖湖区均存在河道采砂^[23], 三峡水库蓄水后湖区冲刷量可能更大。三峡水库蓄水后, 洞庭湖和鄱阳湖湖区冲刷趋势, 一定程度增加了湖区调蓄容积, 可减少湖泊对于干线洪水组成的贡献, 可降低干线防洪压力。两湖对于干线洪水的影响在入江径流量上, 决定是上游洪水还是湖泊洪水叠加造成的干流洪水, 但对于同流量洪水位抬高

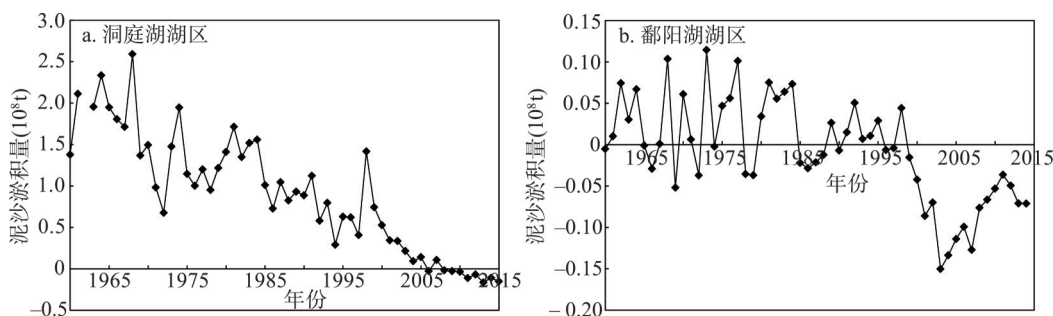


图9 洞庭湖和鄱阳湖湖区的泥沙淤积情况

Fig. 9 Sedimentation in the Dongting and Poyang lakes

的贡献不是主要的。

在河道形态特征上,下游河道边界的卡口对洪水排泄具有阻碍作用^[24],武汉—九江河段在 $Q \geq 50000 \text{ m}^3/\text{s}$ 以上时,田家镇卡口阻滞上游洪水下泄时间约2~3天^[25],也会造成上游洪水位的壅高。三峡水库蓄水前,长江中下游干线河道整体淤积^[26-27],是长江干流同流量洪水位抬高的主要原因。三峡水库蓄水后,坝下游河道平滩河槽均冲刷,尤其是枯水河槽(图6,表2),在理论上不仅可以降低枯水位,也可以降低洪水位,但河槽冲刷趋势与洪水位抬高不一致,在同流量洪水位抬高的原因的研究中,应从河道冲刷过程中的河道形态、床面阻力及人类活动影响等方面展开。

6.2 三峡水库蓄水后洪水位变化原因分析

三峡水库蓄水后,河床大幅度冲刷下切,但洪水位并出现预期中的下降趋势,但由于水库调蓄作用使得最大流量减小,防洪安全得到保障。未来一段时间,三峡水库实行汛期削峰调度^[28],中洪水流量时期水位增加是关注的重点,其形成原因也是关注的重点。本节从河床粗化、岸滩植被、港口及航道整治工程等人类活动直接或间接的影响出发,同时考虑河道形态调整因素,分析三峡水库蓄水后各要素变化与中洪水流量水位升高的关系。

6.2.1 河床粗化的影响 河床表层泥沙粗化,床面阻力增大,相应的壅高河道水位。三峡水库蓄水后,坝下游河道床面表层泥沙为粗化趋势^[29-30],宜昌一枝城河段床沙 D_{50} 由2003年11月的0.638 mm增大到2010年10月的30.4 mm,增大达48倍;枝城至大埠街(杨家脑)河段床沙 D_{50} 比蓄水前增大20倍左右。文献[31]与文献[29-30]计算数据相同,计算三峡蓄水前后河床的糙率数值(表3),坝下游61 km(宜昌—枝城)、61~111 km、111~319 km、319~865 km河段内的糙率分别增大91%、65%、3%和2%。数学模型计算表明^[31]:在宜昌—杨家脑的砂卵石河段,河床在糙率增大后,宜昌站5000 m^3/s 、10000 m^3/s 、23000 m^3/s 、35000 m^3/s 的水位平均增加1.57 m、2.04 m、2.7 m、3.3 m,大于各流量下的水位实际降幅,充分说明床沙粗化有效抑制砂卵石河段枯水位下降;杨家脑以下的沙质河段,在宜昌流量为5000 m^3/s 、10000 m^3/s 、23000 m^3/s 、35000 m^3/s 时,水位平均增大值分别0.13 m、0.11 m、0.16 m、0.16 m,相对于深泓下切值,水位增幅有限。

6.2.2 岸滩植被对洪水位变化的影响 岸滩植被能防止水流侵蚀河岸,维持河床稳定^[32],同时也会增加水流行进阻力,流速减小,水位抬高,一定程度上影响河道防洪能力^[33]。2011年美国密西西比河发生大洪水,其流量小于1927年和1973年大洪水^[34],由于高海拔区(对应高滩区域)植被茂盛产生的壅水作用进一步增加洪水位抬高^[35],发生了中水流量—高水位的区域性洪水。三峡水库蓄水后,2009-2016年与2003-2008年比较,漫滩以上流量天数略有缩短(图10)。以2016年为分析对象,螺山以下河段平滩流量天数大幅增加,水流漫滩时间长(图10)。2016年长江中游螺山以下河段发生洪水,且水流漫滩天数增加,在前期的中枯水年份漫滩天数少,滩地植被相对茂盛,会加大对洪水位的壅高程度,影响河道行洪能力。在宜昌—城陵矶河段,在三峡水库削峰和洞庭湖三口分流等综合作用下,漫滩天数几乎未出现,荆江河段的防洪安全得到保障。以武汉河段为例,2016年该河段的洪水更多地是由该河段内倒水、举水、巴水、浠水等支流来流量偏

表3 河床粗化引起的糙率变化^[31]

Tab. 3 Roughness change due to riverbed coarsening^[31]

| 河床组成类型 | 砂卵石河段 | 砂卵石—沙质过渡段 | 沙质河段 | |
|--------|--------------|---------------|---------------|----------------|
| 河段 | 宜昌—枝城(61 km) | 枝城—大埠街(50 km) | 荆江沙质段(208 km) | 城陵矶—湖口(546 km) |
| 增加倍数 | 1.91 | 1.65 | 1.03 | 1.02 |

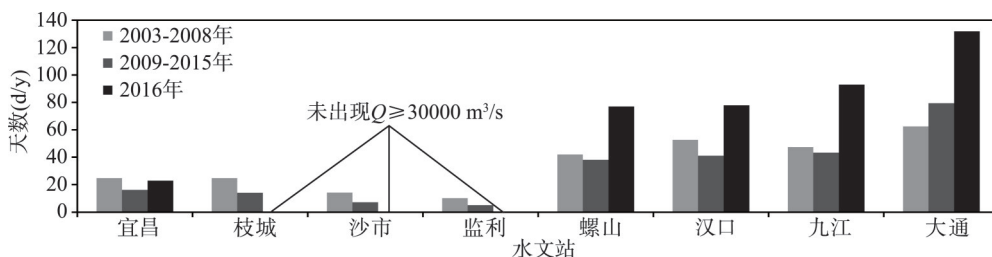


图10 三峡水库调节作用及平滩以上流量天数变化

Fig. 10 The regulation effect of the Three Gorges Reservoir and the change of the flow days

大, 顶托干线水位作用增加所致, 其最大流量可达 $24800 \text{ m}^3/\text{s}$ (出现时间为2016年6月30日, 数值为九江站与汉口站流量的差值), 也是2016年武汉河段洪水水位偏高的原因之一。

6.2.3 坝下游人类活动对洪水水位变化的影响 长江中游荆江河段是防洪重点区域, 素有“万里长江, 险在荆江”的说法。长江中下游两侧岸线分布有大量的港区、码头、桥梁及景观工程等, 占用部分的长江防洪水域, 缩窄了洪水河宽。其中单体工程建设对防洪影响较小, 而桥梁群和码头群等工程共同作用后引起河道洪水水位和流场的叠加影响, 对河道行洪与河势稳定不利^[36]。自1998年长江大洪水过后, 长江水利委员会对整个中下游岸线堤防进行了加固和提高, 降低了同流量—洪水水位抬高对堤防安全的风险。

长江中下游素有“黄金水道”的美誉, 2003-2015年期间, 长江航道局对碍航滩段实施了针对性的航道整治工程: 砂卵石河段工程形式为护底, 目的是稳定河槽, 防控河床进一步冲刷引起的航道水位下降; 沙市以下沙质河段对边滩和心滩进行守护, 在江心洲头实施守护和调整型工程; 同时为提高边界的稳定性, 实施了岸线加固或守护工程, 维持航道边界稳定的同时也增加阻水程度。在2015年6月论证阶段, 《长江宜昌—安庆段提高航道标准对河势控制与防洪影响研究》报告显示^[37], 29个碍航滩段整治工程实施后, 10个滩段最大阻水率在5%~12.2%, 19个滩段阻水率介于0~5%, 其中7个滩段洪水水位最大壅高5~12.4 cm, 22个滩段洪水水位最大壅高1~5 cm。航道整治工程主要是枯水河槽的整治, 对洪水水位的影响有限, 在工程设计过程中通过优化实施方案和相应补偿措施, 降低对洪水水位的影响程度。

6.3 洪水水位变化对长江中游防洪情势的影响 武汉市是长江中游防洪的重点城市, 以汉口站为例, 2003-2016年期间, 汉口站超过警戒水位的年份有2010年和2016年, 其中2010年最高水位仅超过警戒水位1 cm, 2016年7月7日超警戒水位107 cm, 最高水位为1870年以来的第5位。计算不同年份警戒水位对应的流量(图11): 宜昌站、螺山站和汉口站达到防洪警戒水位的流量逐渐减小, 2016年较1998年分别减小 $10600 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $10700 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $8500 \text{ m}^3/\text{s}$, 2016年与2003年相比较, 也为减小趋势。在近坝段的宜昌站, 因三峡水库削峰作用, 大幅减小了下泄流量, 超过警戒水位天数大幅减少, 多数年份未超过警戒水位, 防洪情势大幅缓解。三峡水库蓄水前, 螺山河段淤积是造成该区域洪水水位抬高的主要原因^[28], 蓄水后螺山—汉口河段冲刷, 由于河道综合阻力, 引起的壅水作用较为明显, 是螺山站洪水水位抬高在三峡水库蓄水前后差异的原因所在。2016年7月, 长江中下游发生区域性大洪水, 通过三峡水库及上游梯级水库联合调度, 拦蓄洪水 227 亿 m^3 , 分别降低荆江河段、城陵矶附近区域、武汉以下河段水位 $0.8\sim 1.7 \text{ m}$ 、 $0.7\sim 1.3 \text{ m}$ 、 $0.2\sim 0.4 \text{ m}$, 减少超警戒堤段长度 250 km , 有效减轻了长江中游城陵矶河段和洞庭湖区域防洪压力, 避免了荆江河段超警和城陵矶地区分洪, 确保了荆江河段人民群众生命安全, 确保了长江干堤和重要基础设施安全。

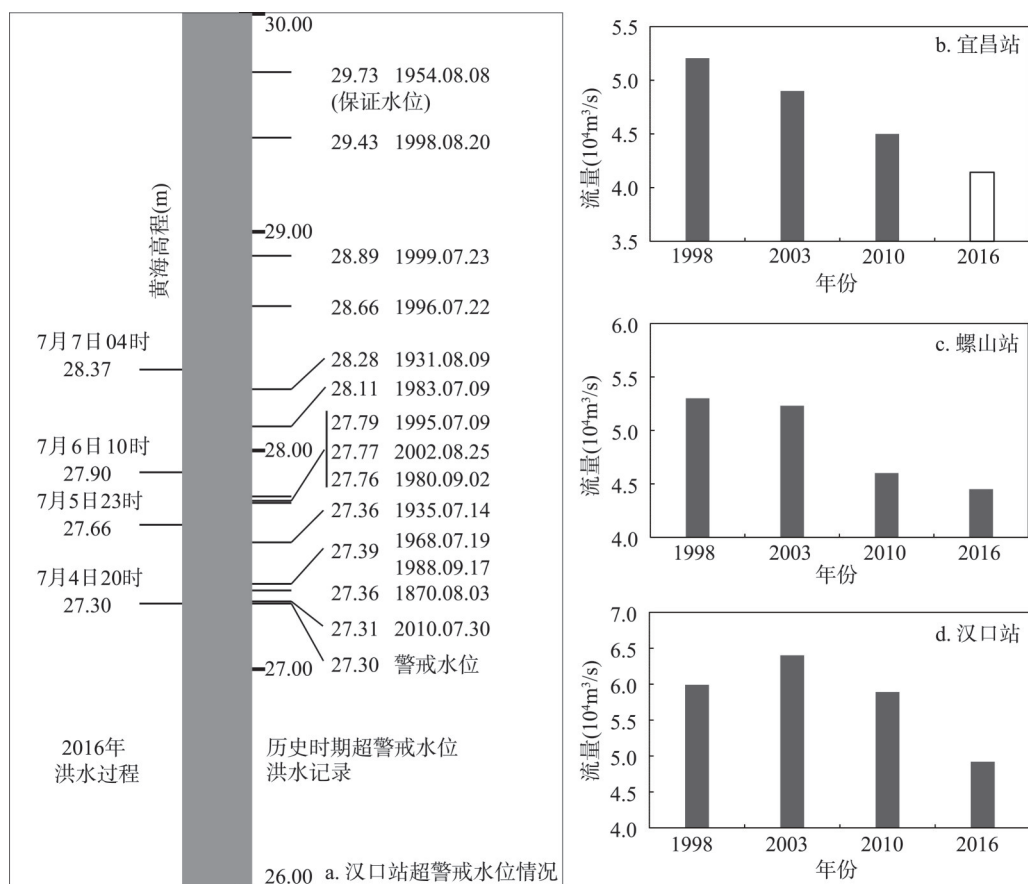


图 11 长江中下游防洪损失流量变化

Fig. 11 Flood control losses in the middle and lower reaches of the Yangtze River

依据三峡水库调度规则, 三峡水库拟实行中小洪水调度, 进一步增加流量调平幅度^[29], 将有效缓解宜昌—城陵矶河段防洪情势, 在荆江大堤防洪标准提升后, 该河段防洪压力大幅缓解。螺山以下河段受湖泊和支流洪水的影响较大, 在干流、湖泊、支流洪水及降雨的综合作用下, 螺山以下河段仍是防洪的重点区域。可以预见, 三峡水库拦蓄中小洪水后, 一旦遭遇特大洪水, 有效防洪能力必然进一步降低^[15]。针对目前长江中下游出现的中洪水流量高水位现象, 尚难判别这一现象是否是趋势性变化还是过程性调整, 主要是研究过程中未滤除水位、流量变化的随机因素。在三峡水库蓄水后, 长江中下游虽未发生类同于1954年、1998年的流域大洪水, 但防洪警戒水位对应流量减小, 大流量高洪水水位逐渐向中洪水流量高水位转变, 应引起足够的重视。

7 结论

三峡水库蓄水利用已有13年, 175 m试验性蓄水至今也有7年, 对坝下水位及河道形态调整产生了深刻影响。本文通过60余年实测水位、河道形态调整资料的分析, 得出的主要结论为:

(1) 三峡大坝下游同流量枯水位下降趋势, 中洪水水位相对抬高, 因枯季水库下泄流

量增加, 坝下游最低水位升高, 洪季削减洪峰作用, 最高水位下降。

(2) 伴随河道冲刷与深泓下切, 同流量枯水位下降, 在航道整治叠加作用下, 同流量枯水位降幅小于枯水河槽河床高程下切值, 航道水深增加, 是三峡水库蓄水后坝下游航道水深提升的基础,

(3) 枯水河槽冲刷是枯水位下降的主要原因, 上荆江及以上河段枯水位下降趋势减缓, 下荆江及以下河段下降速率存在增加趋势, 需引起航道管理部门重视。

(4) 三峡水库蓄水后, 河床粗化、岸滩植被、人类活动等作用使得同流量洪水位提升; 宜昌—监利河段同流量洪水位虽有一定的升高, 由于三峡水库汛期削峰调度, 下泄流量大幅减少, 超过防洪警戒水位的天数减少或未出现, 该段的防洪情势大幅缓解; 螺山及以下河段出现了中洪水流量高水位的现象, 应引起足够重视, 三峡水库可有效提升中下游洪水防御能力, 但不排除遭遇支流洪水叠加效应, 中下游洪水压力仍然较大。

参考文献(References)

- [1] Zheng Shouren. Reflections on the Three Gorges Project since its operation. *Engineering*, 2016(2): 389-397.
- [2] 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.
- [3] Yuan Weihao, Yin Daowei, Finlayson Brian, et al. Assessing the potential for change in the middle Yangtze River channel following impoundment of the Three Gorges Dam. *Geomorphology*, 2012, 147/148(8): 27-34.
- [4] Dai Zhijun, Liu James T. 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.
- [5] Dai S B, Lu X X. Sediment load change in the Yangtze River (Changjiang): A review. *Geomorphology*, 2014, 215(12): 60-73.
- [6] Xu Quanxi, Yuan Jing, Wu Wenjun, 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] Xu Quanxi. Research on reservoir sedimentation and downstream channel erosion of dam after impoundment of Three Gorges Reservoir. *Yangtze River*, 2012, 43(7): 1-6. [许全喜. 三峡水库蓄水以来水库淤积和坝下游冲刷研究. *人民长江*, 2012, 43(7): 1-6.]
- [8] Han Jianqiao, Sun Zhaohua, Huang Ying, et al. Features and causes of sediment deposition and erosion in Jingjiang reach after impoundment of the Three Gorges Project. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2014, 45(3): 277-285, 286. [韩剑桥, 孙昭华, 黄颖, 等. 三峡水库蓄水后荆江沙质河段冲淤分布特征及成因. *水利学报*, 2014, 45(3): 277-285, 286.]
- [9] Xu Quanxi, Zhu Lingling, Yuan Jing. Research on water-sediment variation and deposition-erosion in middle and lower Yangtze River. *Yangtze River*, 2013, 44(23): 16-21. [许全喜, 朱玲玲, 袁晶. 长江中下游水沙与河床冲淤变化特征研究. *人民长江*, 2013, 44(23): 16-21.]
- [10] 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.]
- [11] Lu Yongjun, Chen Zhicong, Zhai Lianbai, et al. Impact of the Three Gorges Project on the water level and navigation channel in the near-dam reach downstream the Gezhouba Project. *Engineering Science* 2002, 4(10): 67-72. [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. *中国工程科学*, 2002, 4(10): 67-72.]
- [12] Fang Hongwei, Han Dong, He Guojian, et al. Flood management selections for the Yangtze River midstream after the Three Gorges Project operation. *Journal of Hydrology*, 2012, 432/433(8): 1-11.
- [13] Bormann Helge, Pinter Nicholas, Elfert Simon. Hydrological signatures of flood trends on German rivers: Flood frequencies, flood heights and specific stages. *Journal of Hydrology*, 2011, 404(1/2): 50-66.
- [14] Jiang Jiahu, Huang Qun. Sub-element method for seepage analysis with free surface. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1997(8): 40-44. [姜加虎, 黄群. 三峡工程对其下游长江水位影响研究. *水利学报*, 1997(8): 40-44.]
- [15] Li Yitian, Sun Zhaohua, Liu Yun, et al. Channel degradation downstream from the Three Gorges Project and its impacts on flood level. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2009, 135(9): 718-728.

- [16] Zhang Man, Zhou Jianjun, Huang Guoxian. 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.]
- [17] Mei Xuefei, Dai Zhijun, Gelder P H A J M, et al. Linking Three Gorges Dam and downstream hydrological regimes along the Yangtze River, China. *Earth and Space Science*, 2015, 2(4): 94-106.
- [18] Moshe L B, Haviv I, Enzel Y, et al. Incision of alluvial channels in response to a continuous base level fall: Field characterization, modeling, and validation along the Dead Sea. *Geomorphology*, 2008, 93(3/4): 524-536.
- [19] Greene S L, Knox J C. Coupling legacy geomorphic surface facies to riparian vegetation: Assessing red cedar invasion along the Missouri River downstream of Gavins Point dam, South Dakota. *Geomorphology*, 2014, 204(1): 277-286.
- [20] Yang S L, Xu K H, Milliman J D, et al. Decline of Yangtze River water and sediment discharge: Impact from natural and anthropogenic changes. *Scientific Reports*, 2015, (5): 12581.
- [21] Maren D S V, Yang Shilun, He Qing. The impact of silt trapping in large reservoirs on downstream morphology: The Yangtze River. *Ocean Dynamics*, 2013, 63(6): 691-707.
- [22] Cao Fengshuai, Xiao Xin, Wu Peng, et al. Yangtze River: China's golden waterway. *Civil Engineering*, 2010, 163(5): 15-18.
- [23] Zhu Lingling, Chen Jianchi, Yuan Jing, et al. Sediment erosion and deposition in two lakes connected with middle Yangtze River and the impact of Three Gorges Reservoir. *Advances in Water Science*, 2015, 25(3): 348-357. [朱玲玲, 陈剑池, 袁晶, 等. 洞庭湖和鄱阳湖泥沙冲淤特征及三峡水库对其影响. *水科学进展*, 2015, 25(3): 348-357.]
- [24] Zhang Qiang, Shi Yafeng, Xiong Ming, et al. Geometric properties of river cross sections and associated hydrodynamic implications in Wuhan-Jiujiang river reach, the Yangtze River. *Journal of Geographical Sciences*, 2009, 19(1): 58-66.
- [25] Shi Yafeng, Zhang Qiang, Chen Zhongyuan, et al. Channel morphology and its impact on flood passage, the Tianjiazhen reach of the middle Yangtze River. *Geomorphology*, 2007, 85(3): 176-184.
- [26] Yu Minghui, Duan Wenzhong, Yu Weiqing. Analysis of river bed change of Yangtze River and flood level variation. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2005, 38(3): 1-5, 18. [余明辉, 段文忠, 余蔚卿. 长江中下游河床冲淤与洪水位变化. *武汉大学学报(工学版)*, 2005, 38(3): 1-5, 18.]
- [27] Tang Jinwu, Li Yitian, Sun Zhaoxue, 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.]
- [28] Zheng Shouren. Risk analysis of implementing middle- small flood dispatch by Three Gorges Project and countermeasures. *Yangtze River*, 2015, 46(5): 7-12. [郑守仁. 三峡水库实施中小洪水调度风险分析及对策探讨. *人民长江*, 2015, 46(5): 7-12.]
- [29] Yang Yunping, Zhang Mingjin, Li Yitian, et al. Suspended sediment recovery and bedsand compensation mechanism affected by the Three Gorges Project. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(7): 1241-1254. [杨云平, 张明进, 李义天, 等. 长江三峡水坝下游河道悬沙恢复和床沙补给机制. *地理学报*, 2016, 71(7): 1241-1254.]
- [30] Zhang Wei, Yang Yunping, Zhang Mingjin, et al. Mechanisms of suspended sediment restoration and bed level compensation in downstream reaches of the Three Gorges Projects (TGP). *Journal of Geographical Sciences*, 2017, 27(4): 463-480.
- [31] Han Jianqiao. The interaction mechanism between longitudinal water and sediment transport and channel morphology in the downstream of Three Gorges Reservoir [D]. Wuhan: Wuhan University, 2015. [韩剑桥. 三峡水库下游纵向水沙输移与河道形态相互作用机制研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2015.]
- [32] Chen S C, Chan H C, Li Y H. Observations on flow and local scour around submerged flexible vegetation. *Advances in Water Resources*, 2012, 43(6): 28-37.
- [33] Heidi M Nepf. Hydrodynamics of vegetated channels. *Journal of Hydraulic Research*, 2012, 50(5): 262-279.
- [34] Day J, Cable J, Lane R, et al. Sediment deposition at the Caernarvon Crevasse during the Great Mississippi Flood of 1927: Implications for coastal restoration. *Water*, 2016, 8(2): 38.
- [35] Carle M V, Sasser C E, Roberts H H. Accretion and vegetation community change in the Wax Lake Delta following the historic 2011 Mississippi River Flood. *Journal of Coastal Research*, 2015, 313(3): 569-587.
- [36] Zhang Xibing, Lu Jinyou, Li Qiusheng. Preliminary study on accumulated influence of the bankline use on flood control in the middle and lower reaches of the Yangtze River. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2011, 20(9): 1138-1142. [张细兵, 卢金友, 蔺秋生. 长江中下游岸线利用对防洪累积影响初步研究. *长江流域资源与环境*, 2011, 20(9): 1138-1142.]

- [37] Changjiang River Scientific Research Institute of Changjiang River Water Resources Commission, Yichang to Anqing improving waterway standard effects on flood control and river regime control report in Yangtze River [R]. 2015: 299-308. [长江水利委员会长江科学院. 长江宜昌至安庆段提高航道标准对河势控制与防洪影响报告[R]. 2015: 299-308.]

The relationship between water level change and river channel geometry adjustment in the downstream of the Three Gorges Dam (TGD)

YANG Yunping^{1,2}, ZHANG Mingjin¹, SUN Zhaohua², HAN Jianqiao³,
LI Huaguo¹, YOU Xingying⁴

(1. Key Laboratory of Engineering Sediment, Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, Ministry of Transport, Tianjin 300456, China; 2. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 3. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, Shaanxi, China; 4. Hubei Provincial Water Resources and Hydropower Planning Survey and Design Institute, Wuhan 430064, China)

Abstract: In this study, data measured from 1955-2016 was analyzed to study the relationship between the water level and river channel geometry adjustment in the downstream of the Three Gorges Dam (TGD) after the impoundment of the dam. The results highlighted the following facts: (1) for the same flow, the drought water level decreased, however, flood water level changed little. The lowest water level increased, while the highest water level decreased at the hydrologic stations in the downstream of the dam; (2) the distribution of erosion and deposition along the river channel changed from "erosion at channels and deposition at bankfulls" to "erosion at both channels and bankfulls"; the ratio of low water channel erosion to bankfull channel erosion was 95.5% from October 2002 to October 2015, with variations in different impoundment stages; (3) the drought water level decrease slowed down during the channel erosion in the Upper Jingjiang River and the reaches ahead but sped up in the Lower Jingjiang River and the reaches behind; concrete measures should be taken to prevent the decrease in the channel water level; (4) erosion was the basis for channel dimension upscaling in the middle reaches of the Yangtze River; the drought water level decrease was smaller than the thalweg decline; both channel water depth and width increased under the combined effects of the channel and waterway regulations; and (5) the geometry of the channels above the bankfulls did not change much; however, the comprehensive channel resistance increased under the combined effects of the river bed coarsening, bench vegetation, and human activities; as a result, the flood water level increased markedly and moderate flood to high water level phenomena occurred, which should be considered. The Three Gorges Reservoir effectively enhances the flood defense capacity of the middle and lower reaches of the Yangtze River; however, the superposition effect of tributary floods cannot be ruled out.

Keywords: low water level; flood level; riverbed adjustment; cause analysis; Three Gorges Dam; middle and lower reaches of the Yangtze River