

DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640X.2017.04.006

郭怡, 孙昭华, 罗方冰. 三峡水库蓄水后宜昌枯水位的时变特征及成因[J]. 水利水运工程学报, 2017(4): 35-42. (GUO Yi, SUN Zhaohua, LUO Fangbing. Time-variation characteristics and causes of Yichang low-water level since impoundment of Three Gorges reservoir[J]. Hydro-Science and Engineering, 2017(4): 35-42. (in Chinese))

# 三峡水库蓄水后宜昌枯水位的时变特征及成因

郭怡, 孙昭华, 罗方冰

(武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072)

**摘要:** 三峡水库蓄水后, 葛洲坝枢纽下游近坝河段内枝城枯水位降幅较小, 但宜昌及宜都等位置枯水位降幅较大, 且随时间变化显示出非均匀下降的特征。为揭示该现象成因, 依据宜昌至枝城河段内枯水位、地形、河床组成等实测资料分析了各因素的时变特征, 并采用分离变量法计算分析了枯水位非均匀下降的机理。结果表明: 宜昌枯水位在 2008 年前降幅小且下降速度慢, 2008 年以后降幅增大且下降速度加快; 宜都至枝城区间冲刷是引起宜昌枯水位下降的主导因素, 宜都以上河床变形、枝城水位下降为次要因素; 宜都以上河床粗化引起阻力调整, 是导致 2008 年前宜昌枯水位降幅小的主要原因; 2012 年后, 宜昌至枝城段河床变形和阻力调整余地都不大, 未来宜昌枯水位稳定性主要取决于枝城水位变幅。

**关键词:** 坝下游; 枯水位; 河床冲淤调整; 阻力变化

**中图分类号:** TV143      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1009-640X(2017)04-0035-08

宜昌枯水位是影响葛洲坝枢纽通航条件的重要指标。早在三峡水库蓄水前, 多家单位就曾采用数值模拟等方法对宜昌枯水位下降过程开展预测研究, 但由于缺少实测资料以及计算参数难以估计, 枯水位预测结果与蓄水后实际观测结果存在偏差<sup>[1-3]</sup>。三峡水库蓄水后, 针对宜昌枯水位影响因素多的特点, 李云中等<sup>[4-8]</sup>结合原型观测资料从河道形态、河床阻力、节点控制作用等方面又开展了细致研究, 这些工作使宜昌枯水位的影响因素得到充分揭示, 并在节点控制作用等方面形成了共识。但需要注意的是, 国内外许多水库下游枯水位下降都曾呈现非均匀变化的衰减特征<sup>[9]</sup>, 这种时变特征甚至被作为水位变化趋势预测的重要参考。对于葛洲坝枢纽下游河段而言, 许多观测研究<sup>[5-6, 10-11]</sup>显示, 在芦家河等节点保持稳定、枝城水位降幅较小的同时, 宜昌枯水位在近 10 年内显示了某段时期内降幅较小而另一段时期又明显下降的阶段性变化, 这与其他水库下游枯水位降幅随时间逐渐衰减的规律明显不同, 但对于该现象的成因目前尚缺乏系统研究。

本文结合 2003—2014 年较为全面的原型观测资料, 综合分析宜昌枯水位下降历程, 以及各种影响因素随时间的变化特征, 在此基础上, 探讨各因素与宜昌枯水位变化之间的响应规律, 从而明确各影响因素主次地位随时间的演化关系, 为未来宜昌枯水位变化趋势预测以及选择控制枯水位下降的工程措施提供参考。

## 1 资料和方法

### 1.1 河段概况

已有研究普遍认为, 枝城下游关洲、芦家河等节点部位深泓高凸且河床抗冲性强, 枝城下游枯水期水面线存在明显转折, 枝城水位在一定程度上对其上游枯水位起到侵蚀基点的作用<sup>[5-6, 10-12]</sup>, 故将枝城站作为研究的下边界, 枝城以下河床冲刷的影响通过其水位变化加以体现。

收稿日期: 2016-07-21

基金项目: 国家科技支撑计划课题(2013BAB12B02); 国家自然科学基金资助项目(51579185, 51339001)

作者简介: 郭怡(1991—), 女, 河南新乡人, 硕士研究生, 主要从事河流动力学方面的研究。

E-mail: gy1003028@163.com      通信作者: 孙昭华(E-mail: lnszh@126.com)

宜昌—枝城河段全长约 60 km(图 1),河床组成以宽级配卵石夹沙为主,两岸为阶地或出露基岩,岸坡抗冲性强。已有研究表明,河段内深泓高凸的虎牙滩、古老背、宜都、龙窝等是控制枯水位的关键节点位置<sup>[8,10]</sup>。

研究河段内,水文部门布设有宜昌、枝城两水文站和磨盘溪、红花套和宜都等水位站,2003 年以来航道部门布设了白沙脑、云池、白洋等枯水位观测水尺。河段内虽有清江入汇,但其枯期径流基本可忽略,沿程站点观测数据可全面反映河道内枯期流量水位特征。

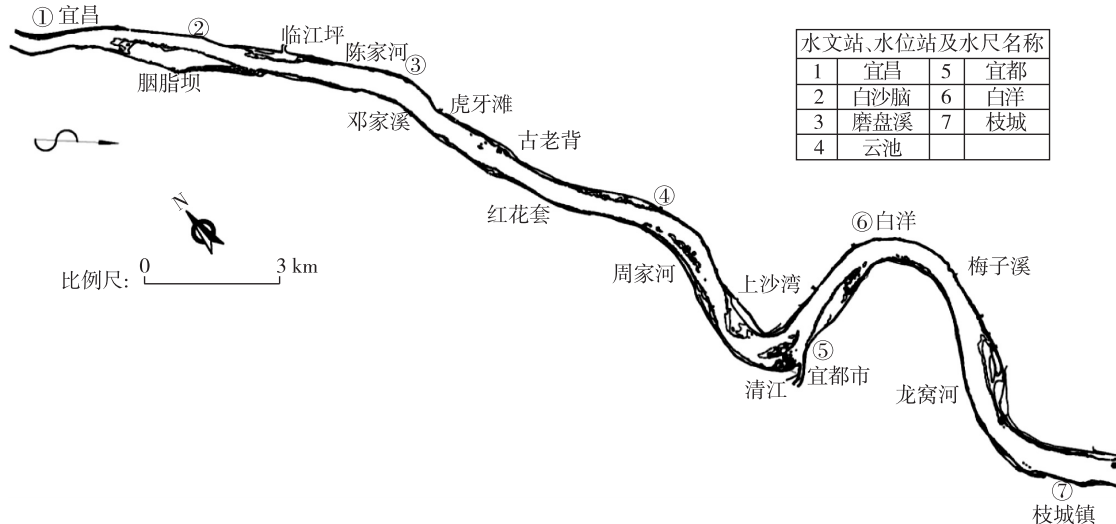


图 1 宜昌—枝城河段

Fig. 1 Sketch map of Yichang-Zhicheng river reach

## 1.2 研究资料及方法

枯水位的统计分析,以三峡水库进入正常运行期以来最枯下泄流量 $5\ 600\ \text{m}^3/\text{s}$ 作为代表性流量级(清江入汇可忽略),点绘日均水位与流量的关系,得到 $5\ 600\ \text{m}^3/\text{s}$ 流量下 2003—2014 年历年各站水位。

河床组成方面,收集了长江水文局在 2001—2011 年间的固定断面平均床沙  $D_{50}$  和床沙平均级配资料<sup>[13]</sup>,以及航道部门在该区间一些离散点的床沙级配观测资料。地形资料方面,间隔选取 2003 年、2008 年、2012 年、2014 年枯期施测的河道地形。整个河段内,沿程选取了 182 个固定断面,平均断面间距约 330 m。

除了河段出口枝城水位之外,特定流量下沿程枯水位的影响因素还包括河道地形和阻力等,它们之间作用关系可用式(1)所示的一维恒定流运动方程描述

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{Q^2}{A}\right) + gA \frac{\partial z}{\partial x} + g \frac{Q^2 n^2}{AR^{4/3}} = 0 \quad (1(a))$$

$$\frac{1}{2g} \left( \frac{Q_{j+1}^2}{A_{j+1}^2} - \frac{Q_j^2}{A_j^2} \right) + z_{j+1} - z_j + \Delta x n_j^2 \left[ \frac{Q_{j+1}^2}{A_{j+1}^2 R_{j+1}^{4/3}} \phi - \frac{Q_j^2}{A_j^2 R_j^{4/3}} (1 - \phi) \right] = 0 \quad (1(b))$$

式中: $Q$ 为流量; $A$ 为断面过水面积; $z$ 为水位; $n$ 为糙率; $R$ 为水力半径; $j$ 为离散断面标号; $\Delta x$ 为断面间距; $\phi$ 为权重因子;式(1(b))为式(1(a))的差分离散形式。将各年地形、沿程水位等实测资料代入,可得到不同时期曼宁糙率。

天然情况下,影响水位的因素相互交织,许多研究曾采用分离变量的思想,在模型中假设阻力、河床变形及出口水位中的一种因素发生变化,从而定量概化单因素的作用,如李云中<sup>[4, 11, 14]</sup>的研究均采用了类似分析方法。实际上,将式(1(a))中最左端的动量项忽略后即为曼宁公式,其差分形式为

$$z_j = \frac{n_j^2 Q^2}{BH^{10/3}} \Delta x + z_{j+1} \quad (2)$$

式中:  $\bar{B}$ ,  $\bar{H}$  为微段内平均河宽和水深。河段内岸坡稳定, 以糙率和水深调整为主。将式(2)采取级数展开并忽略高阶小量亦可看出, 进口水位增量可近似为糙率、水深(形态)单独变化引起的增量之和。因此, 在本河段采用分离变量思路来分析单因素作用是可行的。

## 2 宜昌站及其下游枯水位变化规律

图2为宜昌至枝城河段内不同位置水位(5 600 m<sup>3</sup>/s 流量级, 下同)相对于2003年的下降值, 可见河段内水位降幅总体呈现出“中间大、两端小”的态势, 枝城水位降幅最小, 降幅最大位置在宜都附近。

统计特征流量下宜昌站及其下游各水尺枯水位降幅随时间发展历程如图3(枯水位累计降幅与2003—2014年总降幅的比值), 可见2008年前宜昌水位降幅较小, 2008年以后, 宜昌水位下降速率明显加快, 至2012年后才重新趋缓, 该特征在磨盘溪以上均存在, 以宜昌站最为明显。云池、宜都附近, 2012年前水位降幅随时间发展较为均匀, 2012年后有所趋缓。宜都以下, 水位下降速率在2005—2011年较快, 2011年后较缓, 以枝城站最为明显。

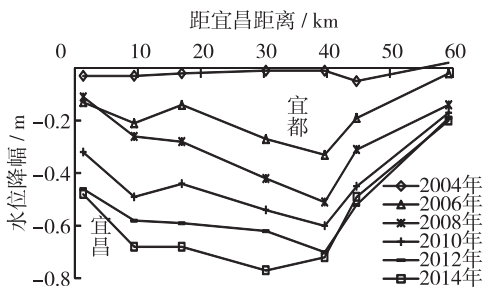


图2 沿程水尺水位降幅(5 600 m<sup>3</sup>/s)  
Fig. 2 Water-level decline along reach (5,600 m<sup>3</sup>/s)

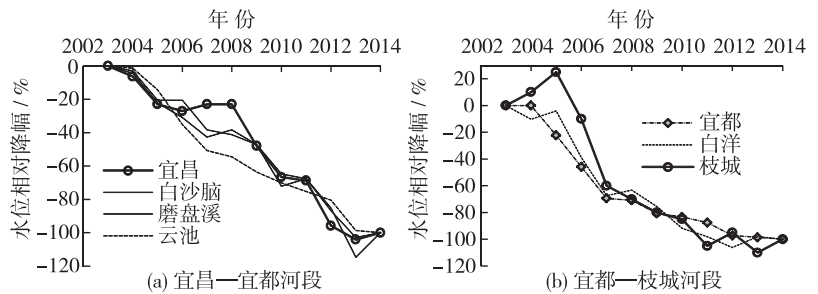


图3 各水尺水位下降历程(5 600 m<sup>3</sup>/s)  
Fig. 3 Water-level lowering curves given by staff gauges (5,600 m<sup>3</sup>/s)

## 3 宜昌枯水位影响因素变化特征

### 3.1 侵蚀基准面水位变化

以往研究认为, 宜昌枯水位稳定性直接受枝城枯水位的影响, 定床条件下枝城水位降幅与宜昌水位降幅之间存在约3:1的响应关系<sup>[12]</sup>。但由图2和3可见, 枝城站枯水位总降幅仅0.22 m, 各个时期均是河段内水位降幅最小的位置。尤其是2006年以前, 枝城水位无明显降幅, 但宜都及其以上水位仍存在明显下降。这说明河段出口水位变化不是引起宜昌枯水位变化的主要原因。

### 3.2 不同时期河道冲淤调整

以宜都为界将宜昌—枝城河段分为上下两段, 分别统计分析了枯水河槽( $Q=5\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ )冲淤量变化。宜昌—宜都河段长约40 km, 该区间冲刷量仅在蓄水后的2003年较大, 2004年以后即进入小幅冲淤交替状态(图4)。宜都—枝城河段长约20 km, 从河段内总冲刷量随时间变化关系来看(图4), 2010年以后冲刷趋势减缓。

宜昌至枝城河段内, 沿程深泓形态以及过水断面面积调整对枯水位影响较大<sup>[8]</sup>。比较本河段深泓变化(图5)可见: 2003—2014年, 宜昌—宜都深泓平均下切1.7 m, 主要发生在三峡水库蓄水后的前3年, 而对枯水

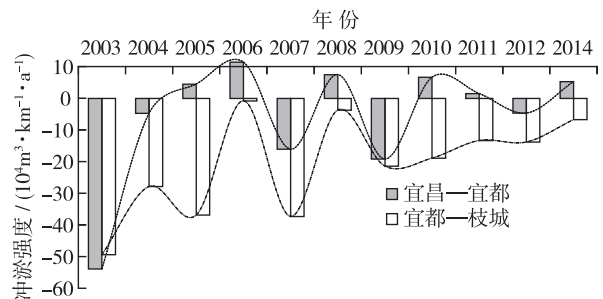


图4 宜昌至枝城河段2003—2014年历年冲淤强度变化  
Fig. 4 Changes of scouring and siltation intensity in Yichang-Zhicheng reach from 2003 to 2014

位起主要控制作用的高凸浅滩段则相对稳定,沿程过水断面面积变化较小,至2014年沿程平均过水断面面积增大不足5%(图6);2003—2014年宜都—枝城河段深泓平均下切6.5 m,下切明显部位多为深泓下凹的深槽,尤其是宜都—白洋段,深槽段过水断面面积显著增大,至2014年沿程过水断面面积平均增大50%左右。由这些统计结果可见,河床地形调整以宜都以下幅度最大,对枯水位影响不可忽视。

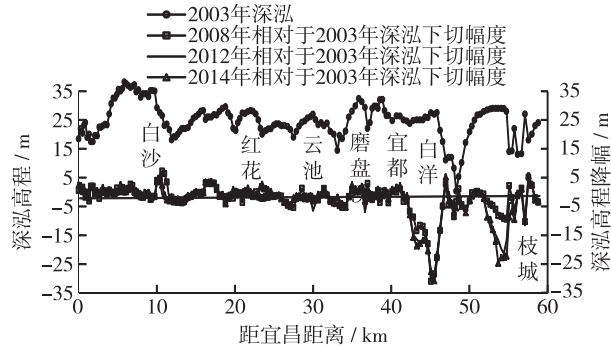


图5 宜昌至枝城河段2003年以来沿程深泓变化  
( $5\,600\text{ m}^3/\text{s}$ )

Fig. 5 Changes of thalweg longitudinal profile in Yichang-Zhicheng reach since 2003 ( $5\,600\text{ m}^3/\text{s}$ )

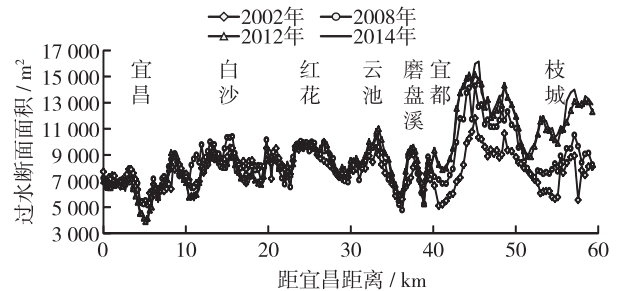


图6 宜昌至枝城2003年以来沿程过水断面面积变化( $5\,600\text{ m}^3/\text{s}$ )

Fig. 6 Changes of cross-section area in Yichang-Zhicheng reach since 2003 ( $5\,600\text{ m}^3/\text{s}$ )

### 3.3 河床粗化与糙率调整

航道部门2008年在宜都以上洲滩和主槽的床沙取样显示,床面上70%以上均为大于16 mm的卵砾石。由水文部门观测的沿程断面床沙 $D_{50}$ 随时间变化可以看出(图7),2003年以后宜昌—枝城全河段床沙 $D_{50}$ 显著增大,河段整体呈现粗化。宜昌—宜都区间河床组成先粗化后细化,河床表层平均 $D_{50}$ 由2003年的0.76 mm增大到2009年的40.50 mm,为2003年的53倍,至2011年又变为18.10 mm,为2003年的24倍。宜都—枝城河段,河床粗化发展过程较宜昌—枝城河段为缓,床沙明显粗化出现在2008年后,2003年至2011年床沙平均 $D_{50}$ 由0.30 mm增大到7.00 mm,由细沙为主转化为沙夹卵石为主。

据已有研究发现,沙卵石河段内床面沙粒阻力是河道阻力的重要组成部分,且粒径粗化前后糙率系数变化与床沙 $D_{50}^{1/6}$ 变化成正比<sup>[15]</sup>。根据式(1)反推河段内宜昌—宜都、宜都—枝城区间的平均糙率,计算结果显示,宜昌—宜都段2008年糙率为2003年的1.26倍,2012年糙率为2003年的1.16倍,糙率先增后减的变化过程与床面粒径变化类似(同时段内 $D_{50}^{1/6}$ 分别为1.94倍和1.70倍);而宜都—枝城段糙率略呈增大趋势,与2003年相比,2008年及2012年的糙率均2003年的1.05倍(同时段内 $D_{50}^{1/6}$ 分别为1.32倍和1.69倍)。

## 4 三峡水库蓄水后宜昌枯水位变化机理

采用分离变量分析思路,定量分析各影响因素对宜昌枯水位的影响。计算分析均在 $5\,600\text{ m}^3/\text{s}$ 的恒定流量级下开展。

### 4.1 不同时期地形变化对宜昌枯水位的影响

以2003, 2008, 2012和2014年地形分别代表水库蓄水前后不同时期地形,糙率均采用2003年地形率

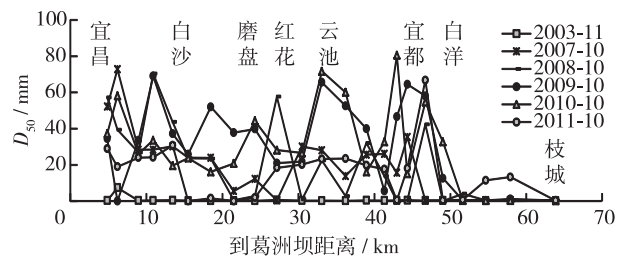


图7 宜昌—枝城河床表层床沙平均 $D_{50}$ 历年变化

Fig. 7 Changes of mean sediment grain size  $D_{50}$  on bed surface of Yichang-Zhicheng reach

定值,尾门水位采用2003年值,以2003年水位为基准对比地形调整对宜昌水位的影响。

分两个区间的计算结果如图8,由图可见:宜昌—宜都区间内,因河床地形调整,至2008年、2012年、2014年宜昌枯水位分别下降0.20,0.23和0.26 m;宜都—枝城区间内,至2008年、2012年、2014年宜都枯水位分别下降0.40,0.51和0.52 m。

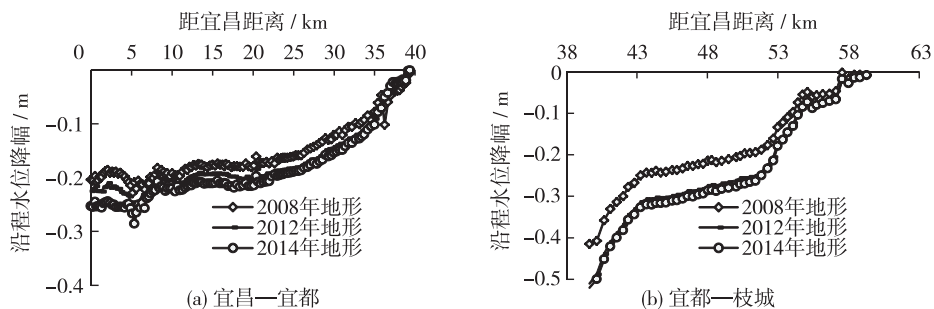


图8 分区间地形调整影响( $5\,600\text{ m}^3/\text{s}$ )

Fig. 8 Effects of riverbed adjustment of Yichang-Yidu and Yichang-Zhicheng on water levels ( $5\,600\text{ m}^3/\text{s}$ )

以河段整体为对象,计算地形变化对沿程水位的影响(如图9)。由图9可见:2008年,2012年和2014年宜昌水位分别下降约0.47,0.58和0.60 m。从历年地形上水面线对比来看,宜都以上在2008年后变幅甚小(图8(a)),宜都以下在2012年后变化也已趋缓(图8(b)),由此导致整个河段内在2012年后沿程水面线变化甚小(图9)。对比图8(a)和图9可见,后者中宜昌水位降幅比前者增大了0.34 m,这显示了宜都以下地形调整对宜昌枯水位的显著影响。

#### 4.2 不同时期河段出口对进口水位变化的响应关系

采用2003年,2008年和2014年地形及各年份糙率,针对宜都上下两区间以及河段整体,分别假定下游产生单位水位降幅,计算河道进口水位降幅,采用二者比例关系反映下游水位下降的溯源传递规律。各年计算条件下,对于宜昌—宜都区间,进出口枯水位降幅之间比例关系变幅较小,这说明该区间河道对枯水位控制作用基本得到保持;对于宜都—枝城区间,上下游水位降幅比例由2003年1:0.68增大至2014年1:0.94,宜都、枝城的枯水位已接近等幅下降。这说明经过水库蓄水后十多年河床冲刷调整,该区间河道对水位控制作用大大削弱;对于宜昌—枝城河段整体而言,上下游水位降幅比例由2003年的1:0.39变为2014年的1:0.47。简而言之,宜昌至枝城河道对枯水位控制作用减弱,且主要由宜都以下区间所造成。

#### 4.3 不同时期阻力调整对宜昌水位的影响

采用2014年地形及出口水位条件,分别采用2003年,2008年,2014年各年糙率,针对宜昌—宜都、宜都—枝城两区间计算了糙率变化引起的河段进口水位变幅。

由图10(a)可见,相同地形下,采用2003年糙率值计算水位最低,与此相比较,2008年糙率条件下宜昌枯水位壅高0.44 m,2014年糙率条件下该值为0.22 m。由图10(b)可见,相同地形条件下,采用各年糙率值,宜都计算水位相差甚小。之所以呈现以上规律,是由于式(1(a))中阻力项还受到过水断面面积、水深等的影响,由于宜都以下区间水深大,而该区间糙率增幅较小,因而糙率变化对沿程水位几乎无影响。

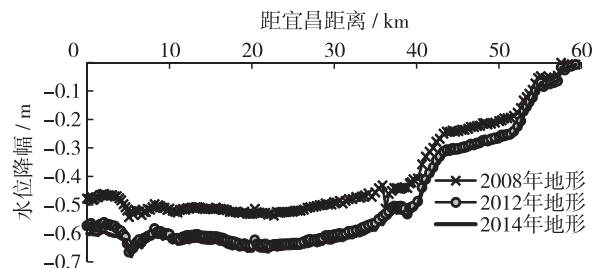
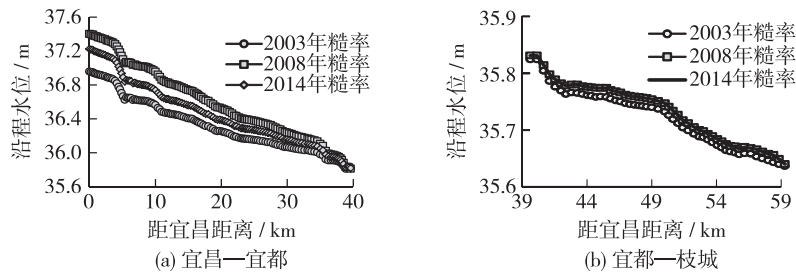


图9 宜昌至枝城河段地形调整引起的沿程水位降幅( $5\,600\text{ m}^3/\text{s}$ )

Fig. 9 Effects of riverbed adjustment on water level in Yichang-Zhicheng reach ( $5\,600\text{ m}^3/\text{s}$ )

图 10 不同糙率下沿程水面线( $5\,600\text{ m}^3/\text{s}$ )Fig. 10 Flow profiles in different roughness ( $5,600\text{ m}^3/\text{s}$ )

#### 4.4 多种因素综合分析

将前文计算结果归纳如表 1,并与实际枯水位变幅进行比较可见:河段内枯水位是地形调整、下游水位下降以及河床阻力调整的综合作用结果,三者之间近似于线性迭加;阻力调整在宜都以上区间较为明显,而地形调整的作用在宜都以下占绝对优势。

表 1 各区间内不同阶段水位下降成因概化定量分析

Tab. 1 Quantitative analysis of causes of water-level decline at different time intervals

	宜昌—宜都			宜都—枝城		
	实测	各因素引起宜昌水位变幅计算值		实测	各因素引起宜都水位变幅计算值	
2003—2008	宜昌水位	地形变化	-0.19 m	宜都水位	地形变化	-0.42 m
	下降 0.11 m	阻力调整	+0.39 m	下降 0.51 m	阻力调整	0
		宜都水位下降	-0.30 m		枝城水位下降	-0.12 m
2003—2014	宜昌水位	地形变化	-0.26 m	宜都水位	地形变化	-0.52 m
	下降 0.48 m	阻力调整	+0.22 m	下降 0.72 m	阻力调整	0
		宜都水位下降	-0.44 m		枝城水位下降	-0.21 m
综合认识	2004 年后河床稳定,2008 年后粗化已完成,未来宜昌水位主要取决于宜都水位			地形调整使宜都水位大幅下降,2012 年后河床冲刷趋缓,未来宜都水位取决于枝城水位		

综合表 1 中数据可见,2008 年前宜昌—宜都区间内阻力增大显著抵消了其他因素的影响,因而宜昌水位降幅小、下降速度慢,而 2008 年后该区间粗化基本完成甚至出现细化,宜昌枯水位降幅及下降速率明显增大。总体而言,对于 2003—2014 年的宜昌水位下降,宜都以下河床调整是最主要的影响因素,宜都以上的河床调整是第二位因素,枝城水位下降是第三位的因素。由于枝城以上地形调整、床面阻力调整均已趋缓,对于未来的宜昌水位稳定,将主要取决于枝城水位变化。

## 5 结 语

根据水流、地形、河床组成等方面实测资料,综合分析了三峡水库蓄水后宜昌站枯水位非均匀时变特征的形成机理,结论如下:

(1) 2004 年后宜昌—宜都河段即进入冲淤平衡阶段,此后该区间的冲淤调整已不是影响宜昌枯水位的关键因素;2008 年以前,阻力增大有效地补偿了地形调整以及下游水位下降对宜昌枯水位的影响;2008 年以后,阻力增大效应减弱,但宜都水位仍持续大幅下降,使得宜昌枯水位下降速率加快。

(2) 三峡水库蓄水后,宜都—枝城区间河床变形是引起宜昌水位下降的最主要因素,宜都以上河床变形、枝城水位下降是引起宜昌水位下降的较次要因素。

(3) 枝城以上地形调整已趋于缓慢,阻力变化对水位的影响余地也已不大,将来宜昌枯水位的稳定主要

取决于枝城枯水位变化。

研究表明,沙卵石床面粗化引起阻力增大可减缓枯水位下降,在宜都上游实施护底加糙将是纾缓宜昌枯水位下降的有效措施,但若将来床面回淤细沙,则应注意糙率减小对枯水位的影响。对于枝城以下河段,应注意对关洲、芦家河以及枝江、江口等节点的保护,避免因枝城枯水位大幅下降而影响宜昌枯水位稳定。

#### 参 考 文 献:

- [1] 长江科学院. 三峡水库下游宜昌至大通河段冲淤—维数模计算分析[C]//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: 211-310. (Changjiang River Scientific Research Institute. 1-D numerical simulation estimation of the erosion and deposition of Yichang-Datong reach downstream from the Three Gorges Project[C]//Sediment Research of the Three Gorges Project (Vol7). Beijing: Press of Intellectual Property, 2002: 211-310. (in Chinese))
- [2] 中国水利水电科学研究院. 三峡水库下游河道(宜昌-大通)冲刷计算研究[C]//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, 7: 115-148. (China Water Conservancy & Hydroelectricity Science Academe. Research and computation of riverbed erosion (Yichang-Datong) downstream from the Three Gorges Project[C]//Sediment Research of the Three Gorges Project (Vol7). Beijing: Press of Intellectual Property, 2002, 7: 115-148. (in Chinese))
- [3] 姜加虎, 黄群. 三峡工程对其下游长江水位影响研究[J]. 水利学报, 1997(8): 39-43, 38. (JIANG Jiahu, HUANG Qun. A study on impacts of the Three Gorges Project on its downstream water level[J]. Journal of Hydraulic Research, 1997(8): 39-43, 38. (in Chinese))
- [4] 李云忠. 长江宜昌河段低水位变化研究[J]. 中国三峡建设, 2002, 9(5): 12-14. (LI Yunzhong. Change in Yangtze water level along Yichang stretch in dry season[J]. China Three Gorges Construction, 2002, 9(5): 12-14. (in Chinese))
- [5] 陈立, 许文盛, 何小花, 等. 三峡蓄水后宜昌断面枯水位下降趋势及应对策略分析[J]. 水运工程, 2006(5): 59-64, 73. (CHEN Li, XU Wensheng, HE Xiaohua, et al. Low water level descending trend of Yichang section after water storing of Three Gorges and it's solution[J]. Port & Waterway Engineering, 2006(5): 59-64, 73. (in Chinese))
- [6] 李义天, 葛华, 孙昭华. 葛洲坝下游局部卡口对宜昌枯水水位影响的初步分析[J]. 应用基础与工程科学学报, 2007, 15(4): 435-444. (LI Yitian, GE Hua, SUN Zhaohua. Primary analysis of the bottle-neck reach impact on Yichang water level in dry season downstream from Gezhouba[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2007, 15(4): 435-444. (in Chinese))
- [7] 周银军, 陈立, 闫涛, 等. 宜昌至杨家脑河段河床形态冲刷调整特点分析[J]. 水力发电学报, 2012, 31(3): 77-82. (ZHOU Yinjun, CHEN Li, YAN Tao, et al. Features of riverbed erosion adjustment process in Yichang-Yangjianao reach[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012, 31(3): 77-82. (in Chinese))
- [8] 孙昭华, 李义天, 葛华, 等. 三峡下游沙卵石河段纵剖面形态对枯水位影响[J]. 泥沙研究, 2007(3): 9-16. (SUN Zhaohua, LI Yitian, GE Hua, et al. Characteristics of channel profile and its impact on low flow water level in the gravel/sand bed reach downstream the Three Georges Project[J]. Journal of Sediment Research, 2007(3): 9-16. (in Chinese))
- [9] JAMES L A. Channel incision on the lower American River, California, from streamflow gage records[J]. Water Resources Research, 1997, 33(3): 485-490.
- [10] 龙慧, 刘庚临, 单剑武. 三峡工程建成后枝城至枝江河段浅滩演变分析[J]. 人民长江, 2001, 32(4): 29-31. (LONG Hui, LIU Genglin, SHAN Jianwu. Analysis of river shoal evolution of Zhicheng-Zhijiang after the Three Georges Project completion[J]. Yangtze River, 2001, 32(4): 29-31. (in Chinese))
- [11] 代水平, 闫金波, 邹涛, 等. 葛洲坝下游沿程节点演变对宜昌枯水位影响研究[J]. 水利水电快报, 2012, 33(7): 40-44. (DAI Shuiping, YAN Jinbo, ZOU Tao, et al. A study of the impact of bottle-neck reach evolution downstream from Gezhouba on Yichang' low water level[J]. Express Water Resources & Hydropower Information, 2012, 33(7): 40-44. (in Chinese))
- [12] 中国水利水电科学研究院. 江口镇上下浅滩演变与整治研究总报告[C]//长江三峡工程泥沙问题研究(第六卷). 北京: 知识产权出版社, 2002: 378-421. (China Institute of Water Conservancy & Hydropower Research. General report of river shoal evolution and regulation of upstream-downstream of Jiangkou[C]//Sediment Research of the Three Gorges Project (Vol6). Beijing: Press of Intellectual Property, 2002: 378-421. (in Chinese))
- [13] 刘东生. 2012年坝下游河道演变及宜昌枯水位变化分析[R]. 武汉: 长江水利委员会水文局, 2013. (LIU Dongsheng. Riverbed evolution and low water level change of Yichang downstream from the Three Georges Project[R]. Wuhan: Hydrology Bureau of the Yangtze River, 2013. (in Chinese))
- [14] 成金海, 向荣, 邱晓峰, 等. 三峡水库运行初期坝下近坝段河道冲刷对河床糙率影响分析[J]. 水利水电快报, 2012, 33

- (7): 59-63. (CHENG Jinhai, XIANG Rong, QIU Xiaofeng, et al. Analysis of the impact on roughness of riverbed erosion downstream the Three Georges Project[J]. Express Water Resources & Hydropower Information, 2012, 33(7): 59-63. (in Chinese))
- [15] 黄颖, 李义天. 维持通航建筑物口门水深的护底加糙措施研究[J]. 水利学报, 2005, 36(2): 141-146, 154. (HUANG Ying, LI Yitian. Water depth maintenance of navigation pass by means of increasing roughness of channel bed[J]. Journal of Hydraulic Research, 2005, 36(2): 141-146, 154. (in Chinese))

## Time-variation characteristics and causes of Yichang low-water level since impoundment of Three Gorges reservoir

GUO Yi, SUN Zhaohua, LUO Fangbing

(State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** Since the impoundment of the Three Gorges hydroproject, the decline of the low-water level along the Zhicheng river reach near the dam downstream of the Gezhouba hydrocomplex is small, but the falling amplitude of the low-water stage along the Yichang-Yidu river reach has greatly decreased. And the changes of the low-water level show the characteristics of non-uniform decline with time. This paper analyzes the time-variation characteristics of each factor in order to reveal the causes of this phenomenon, on the basis of the prototype observed data, including the water level, topography and composition of river bed of the Yichang river reach and its downstream, and a separation of variables method is applied to analyze the mechanism of the non-uniform drop in low-water level. The analysis results show that the falling process of the low-water level along the Yichang river reach was different before and after 2008. The decline in the low-water level along the Yichang river reach was small and slow down before 2008. After 2008, the falling amplitude of the low-water level increased and its falling speed was quicker. The scour from the Yidu reach to the Zhicheng reach is the main cause of the decline of low-water level in the Yichang river reach, and the deformation of the riverbed above the Yidu reach and the decline of water level in Zhicheng reach are the secondary causes. The adjustment of riverbed resistance caused by riverbed material armoring was a main cause of the decreasing amplitude of the low-water level along the Yichang river reach before 2008. After 2012, there was a little room for river bed deformation and resistance adjustment in the Yichang to Zhicheng river reach. The stability of the low-water level along the Yichang reach depends mainly on the fluctuation of water level along the Zhicheng river reach.

**Key words:** downstream of dam; low-water stage; adjustment of riverbed scour-and-fill; changes in resistance