

# 长江梯级水库下游重点滩段河势及航道条件变化

左利钦<sup>1</sup>, 孙路<sup>2</sup>, 陆永军<sup>1</sup>, 毛继新<sup>3</sup>

(1. 南京水利科学研究院 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210029;  
2. 交通运输部规划研究院, 北京 100028; 3. 中国水利水电科学研究院, 北京 100044)

**摘要:** 长江上游特大型梯级水库运行后坝下游水沙条件将显著变化, 对下游河势和航道条件产生影响。本文建立了向家坝下游水富至泸州(水泸段)二维水沙数学模型, 在验证的基础上, 计算分析了向家坝、溪洛渡水库运行后向家坝下游河段泥沙冲淤时空变化规律, 研究了重点滩段河势变化及对航道的影 响。研究表明, 上游梯级枢纽运行后, 向家坝下游河道总体呈冲刷态势, 弯曲河段水流趋直但仍保持弯曲河型, 分汊河段支叉水浩萎缩, 主槽冲深, 这对增加过渡段浅滩航深有利, 但局部产生淤积, 造成新的浅段; 边滩淤积, 滩槽高差加大, 加剧局部不良流态, 急流浅滩的航行条件有恶化趋势。

**关键词:** 河流泥沙工程学; 河势与航道演变; 数学模型; 梯级水库; 向家坝  
**中图分类号:** TV147 **文献标识码:** A

## Changes in river regime and navigation channels downstream of Xiangjiaba reservoir after impoundment of cascade reservoirs on the upper Yangtze River

ZUO Liqin<sup>1</sup>, SUN Lu<sup>2</sup>, LU Yongjun<sup>1</sup>, MAO Jixin<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Hydrology, Water Resources and Hydraulic Engineering Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029; 2. Transport Planning and Research Institute, Ministry of Transport, Beijing 100028; 3. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044)

**Abstract:** Cascade reservoirs on the upper Yangtze, after operation, will significantly change their downstream conditions, e.g. water and sediment conditions, river regime, and navigation conditions. This paper develops a 2D water-sediment mathematical model for the reach from Shuifu to Luzhou (or Shuilu reach in short) downstream of the Xiangjiaba dam. On the basis of verification, this model has been applied to calculation and analysis of riverbed scour and silting in this reach after impoundment of the Xiangjiaba and Xiluodu reservoirs, focusing on the changes in river regime and navigation conditions in some typical shoals. The results show that after the impoundment the downstream channel takes an overall scour trend, which can be demonstrated with three general changes. First, in curved reaches the flows tend to take a straightforward path though the river pattern remains curved; second, in braided reaches the branches tend to decay while the main channel to be scoured deeper, favorable to navigation, but local deposition will happen in some reaches, creating new shoals; last, the difference in elevations of floodplain and channel will be increased as a result of silting on point bars and scour in main channel, which aggravates local adverse flow patterns and deteriorates the navigation conditions in torrential shoals.

**Key words:** river sediment engineering; evolution in river regime and navigation channels; mathematical model; cascade reservoirs; Xiangjiaba reservoir

## 0 引言

金沙江径流丰沛而稳定, 坡陡流急, 落差大且集中, 是我国水能资源最富集的河段。按照有关规划, 金沙

收稿日期: 2013-10-15

基金项目: 国家 973 计划资助项目 (2012CB417002); “十二五” 国家科技支撑计划 (2012BAB04B03)

作者简介: 左利钦 (1980—), 男, 博士研究生, 高级工程师, lqzuo@nhri.cn

通信作者: 陆永军 (1964—), 男, 教授级高工, yjlu@nhri.cn

江中游河段按“一库八级”进行开发(图1)。河流上兴建具有调节能力的大型梯级水库后,改变了下游河段的来水来沙过程,引起下游河流的再造床作用,对航运、防洪、灌溉、滩地利用等方面带来一系列的影响。建库后,水流含沙量一般处于强烈次饱和状态,需要从河床和河岸中不断补充沙源,为适应新的水沙条件变化,下游河床形态重新调整,有些河型发生转化。有关学者对长江三峡工程、葛洲坝枢纽、丹江口水利枢纽等下游河道演变进行了分析研究<sup>[1-7]</sup>,概括来讲,枢纽下游河床的重塑一般以展宽、下切、床沙粗化甚至河型转化来反映,它依赖于现状河型条件、岸滩的物质组成、地形及地质条件,是一个复杂的响应过程。枢纽运用后,下游河道随着来水来沙条件的变化,原有的相对冲淤平衡状态被改变,产生新的冲刷和淤积,其中大部分河道将以冲刷为主,这是对航道有利的方面;但同时枯水位也会相应降低,冲淤的不均匀可能引起河势变化,甚至滩槽易位,冲淤严重的河段将会影响通航,引起河道通航条件恶化。

目前,金沙江中下游部分梯级开发建设已进入实施阶段,向家坝和溪洛渡电站已分别于2012年10月和2013年5月开始蓄水。如果规划水库全部实施,仅金沙江干流水库总库容就可达到800亿m<sup>3</sup>,将大大减少金沙江的输沙量,显著改变长江上游的水沙特性。向家坝下游水富至泸州是长江重要的航运通道,其河势和航道条件不可避免的会受到梯级水库群的影响,尤其是向家坝和溪洛渡水库。文献[8、9]研究了向家坝水库下游非恒定水沙特征,文献[10]研究了长江上游建库对宜昌来水来沙的影响。但截止目前,对向家坝下游河势和航道条件长期演变的研究仍很少。因此研究长江特大型梯级水库水沙调节后坝下游浅滩演变及对航道的影响具有重要的意义。本文建立了向家坝下游河段二维水沙数学模型,预测了梯级水库(向家坝、溪洛渡)水沙调节后长河段泥沙冲淤变化规律及对航道的影。响。本项研究将有助于进一步了解梯级水库对下游重点浅滩的影响,为河道治理提供基础数据;通过研究梯级枢纽对航运的影响,有利于从防洪、发电、航运等综合效益影响的基础上优化调度方式,提高梯级枢纽的综合效益。

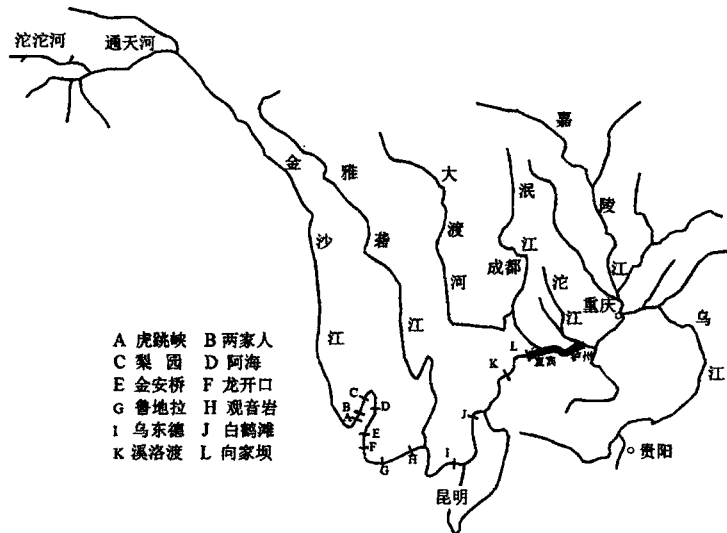


图1 长江上游梯级水库示意图  
Fig. 1 Sketch of the cascade reservoirs in the upper Yangtze River

### 1 研究河段概况及天然状态下的河床演变特征

向家坝下游水富至泸州河段(图2,简称水泸段),全长约130km,为典型的山区河流。沿程有横江、岷江、长宁河、沱江等支流汇入,自古就是连接四川、云南、重庆等地区的水上运输大动脉。该段河道狭窄弯曲,两岸山势较平缓,多为低山丘陵,河岸稳定,江心洲、边滩发育,平面上主要以宽谷河段为主,间或有少量窄深河段。水泸段河床由基岩、卵石或卵石挟沙组成。根据2005年、2008年水富至宜宾河段河床质钻孔取样资料<sup>[11]</sup>,边滩泥沙分布范围宽广(1mm~500mm),一般为10~110mm的卵石,中值粒径26~105mm。

在天然条件下,该河段表现为山区河流的一般演变特性,河床演变呈现出年内冲淤变化大、年际相对平衡的特征。在宽谷河段,江心洲及边滩较发育,汛期泥沙大量淤积,在河床形成较厚的砂卵石覆盖层,但退水冲刷期基本能将汛期淤积泥沙全部冲走,呈“洪淤枯冲”的演变特征。对于窄深河段,两岸及河床一般为基岩形态,由于枯水期流速较小,宽谷河段冲刷的泥沙一般淤积在这类河段,但由于这类河段洪水期流速很大,将会把枯水期淤的泥沙冲走,呈“洪冲枯淤”的演变特征。

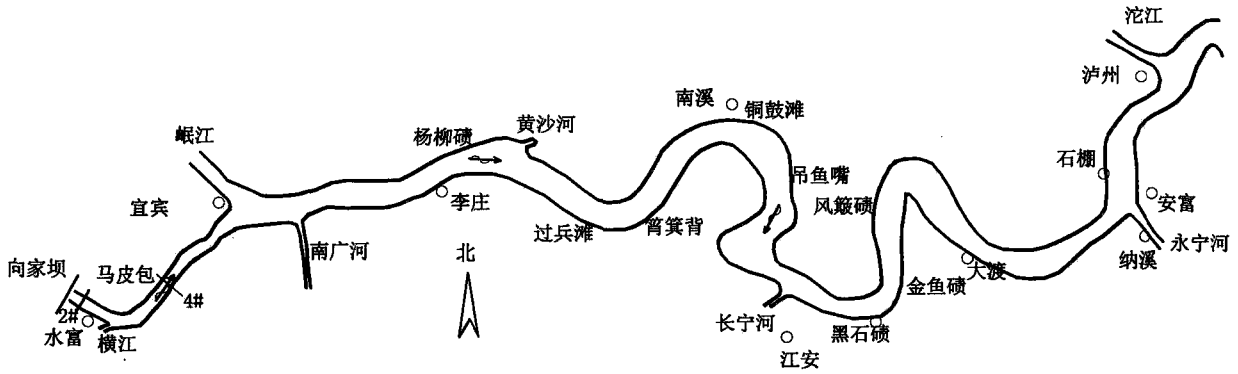


图2 长江水富至泸州河段示意图  
Fig.2 Regime of Shuifu-Luzhou reach

## 2 二维水沙数学模型的建立与验证

本文建立的二维水沙数学模型采用贴体正交曲线坐标系统。基本方程包括水流连续方程、动量方程、悬移质不平衡输沙方程、推移质不平衡输移方程及河床变形方程<sup>[12-14]</sup>。模型范围为长江上游向家坝(水富)至泸州, 计算域网格进口位于水富, 考虑了横江、岷江入汇的影响, 下游出口位于泸州。计算域内共布置了 880×31 个网格点, 经正交曲线计算得到贴体正交曲线网格, 其中沿河长方向布置 880 个断面, 网格间距大部分在 120~250m, 沿河宽方向布置 31 个断面, 网格间距 20~30m 左右。

### 2.1 水流验证

图 3 示出了水富至泸州河段枯、中、洪三级流量水面线验证, 计算水位和实测水位接近, 除局部时刻外, 偏差小于 0.10m。图 4 给出了中洪水流量时水富至宜宾河段 2#、4#断面流速分布计算值与实测值的比较, 计算的流速大小及分布与测量值总体上吻合较好。

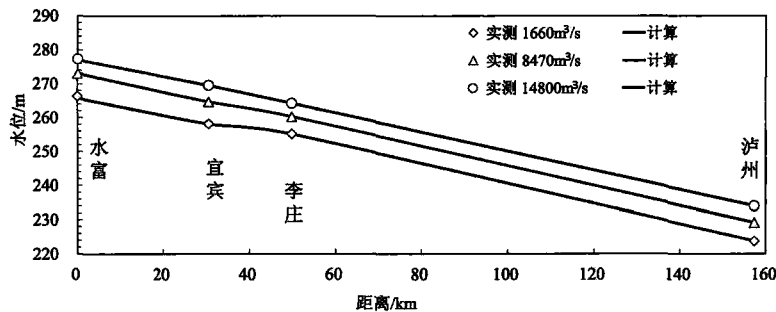


图3 水面线验证图  
Fig.3 Verification of water surface lines

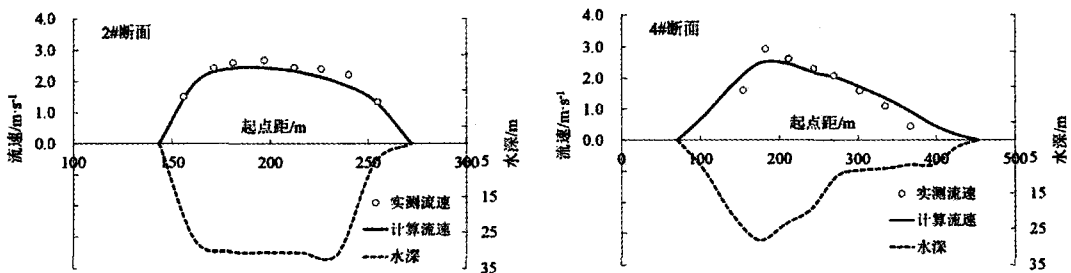


图4 流速分布验证图 ( $Q_{断面}=7200\sim 10600\text{m}^3/\text{s}$ )  
Fig.4 Verification of velocity distributions ( $Q=7200\sim 10600\text{m}^3/\text{s}$ )

### 2.2 河床变形验证

以筒箕背和关刀碛滩为例进行了河床变形验证。

筒箕背滩位于向家坝下游 69~71km, 宜宾至泸州之间, 是长江上游著名的具有枯水浅、急、险特征的复杂滩险, 其上段右岸为高大的甑柄碛卵石碛坝, 下段左岸是宽坦的鹭鹭碛江心洲。甑柄碛与鹭鹭碛之间的过渡段有一连串乱石堆, 形如一个个筒箕扣伏江中, 称筒箕背。采用 2005 年 2 月至 2007 年 3 月河床冲淤变形资料进

行了模型验证。上游流量、含沙量过程采用屏山、横江、岷江高场站实测资料，出口边界采用泸州水位过程。图5给出了筲箕背河段2005-2007年计算冲淤分布与实测的比较， $Dz$ 表示冲淤厚度。该河段总体微冲微淤，两年时间内冲淤幅度大部分小于0.5m，计算的冲淤分布与实测较为接近。2005年2月~2007年3月该滩段累积冲刷24.8万 $m^3$ ，计算值为31.0万 $m^3$ ，平均冲深0.3m左右。

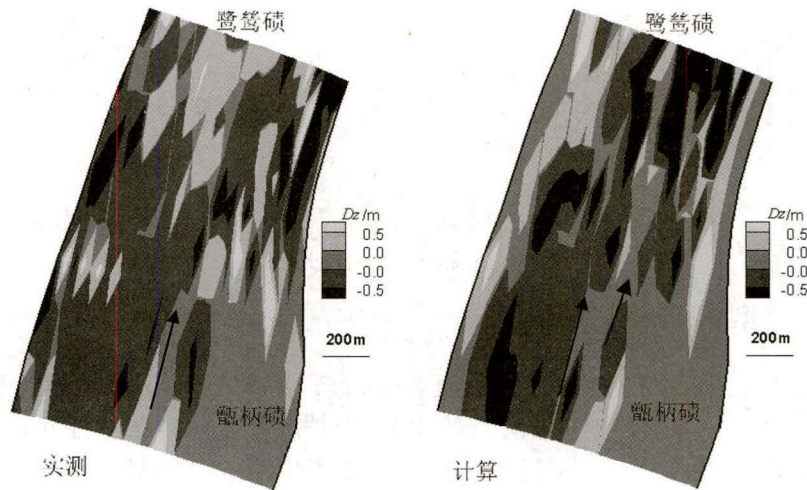


图5 筲箕背河段2005年2月至2007年3月冲淤分布计算与实测的比较

Fig. 5 Verification of riverbed erosion and deposition in Shaoshibei reach from Feb., 2005 to Mar., 2007

限于资料，补充了泸州下游水沙条件、河床组成类似的关刀碛河段进行河床变形验证。关刀碛位于向家坝下游301.5~305km，为枯水浅险滩，该滩段为较大的弯曲河段。2005年在关刀碛实施了航道整治工程，为分析工程效果，于2007年12月进行了地形测量<sup>[11]</sup>，本文采用该资料进行了河床冲淤变形验证。关刀碛碛翅淤积发展，束窄航槽，同时枯水期主流受碛翅壅水的影响，在关刀碛脑部产生冲向右岸的横流，不利于船舶航行。为此，该滩的整治措施包括丁坝与疏浚两部分：一是在滩上段左岸修建丁坝和丁顺坝，将主流挑向江心，加强对关刀碛碛翅的冲刷，同时减弱冲向右岸的横流，维持疏浚区枯水期流速；二是疏浚关刀碛碛翅。对比工程前后测图可知，丁坝坝头前沿主槽河床冲刷，坝田主要为淤积态势，在汛后落水期水流对航槽的冲刷作用较明显，关刀碛碛头不再淤积发展，整治工程发挥了良好的作用。2005年9月-2007年12月该滩段累积冲刷9.6万 $m^3$ ，计算值为12.0万 $m^3$ ，计算的冲淤分布与实测也较为接近（图6）。

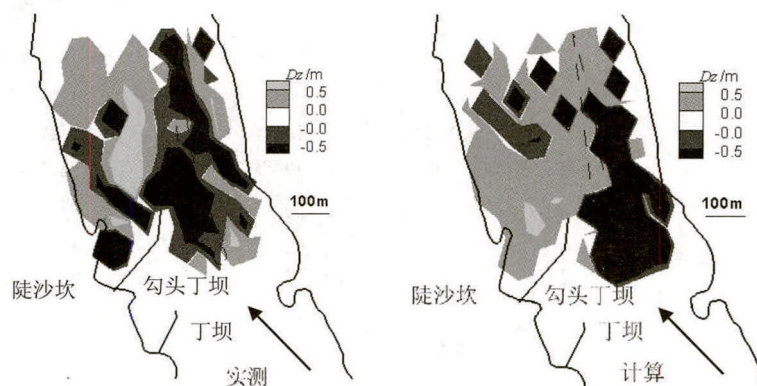


图6 关刀碛河段2005年9月至2007年12月冲淤分布计算与实测的比较

Fig. 6 Verification of riverbed erosion and deposition in Guandaoqi reach from Sept., 2005 to Dec., 2007

### 3 梯级水库下游河道冲淤

#### 3.1 梯级水库运行后向家坝下游水沙特征

梯级水库运行后将改变水沙段水沙特征，这里以90水沙系列为例来进行说明，水沙边界条件由中国水科院一维水沙数学模型提供<sup>[15]</sup>。90水沙系列表示1991—2000年10个水文年来水来沙系列，是目前长江水沙研究中的代表系列。表1给出了90水沙系列建库前后长江上游水富站、宜宾站、泸州站的流量 $Q$ 、含沙量 $s$ 及其中心粒径 $D_{50}$ 的变化。可见：①向家坝、溪洛渡水库运行后水富、宜宾、泸州站年均来流量不变，平均流量分

别为 4697 m<sup>3</sup>/s、4943 m<sup>3</sup>/s、7553 m<sup>3</sup>/s。②梯级枢纽拦沙后, 下游含沙量大幅减小。建库前水富至泸州十年平均含沙量约 1.10~0.74kg/m<sup>3</sup>, 建库后的 1~10 年平均含沙量大幅减小至 0.19~0.23 kg/m<sup>3</sup>, 仅占建库前的 17%~27%, 水富减幅大于宜宾、泸州减幅, 之后含沙量逐渐恢复, 至 80~100 年后, 水富至泸州平均含沙量为 0.60~0.83 kg/m<sup>3</sup>, 占建库前的 75%~82% (参见图 7)。③建库前水富至泸州的悬沙中值粒径为 0.009mm, 建库后泥沙被滞留在库区, 1~10 年平均悬沙中值粒径为 0.0063mm, 之后含沙量逐渐恢复, 粒径变粗, 31~40 年中值粒径恢复至建库前的水平, 91~100 年平均中值粒径约 0.037mm (参见图 8)。建库后水富至泸州 1~100 年平均悬沙中值粒径为 0.023~0.020mm。

表 1 长江上游特大型枢纽建库前后 90 水沙系列流量与含沙量十年平均值  
Table 1 Mean flow discharges and mean sediment concentrations over every 10 years before and after impoundment of cascade reservoirs on the upstream Yangtze River

90 水沙系列	Q/(m <sup>3</sup> /s)			S/(kg/m <sup>3</sup> )			D <sub>50</sub> /mm		
	水富	宜宾	泸州	水富	宜宾	泸州	水富	宜宾	泸州
建库前	4697	4943	7553	1.08	1.10	0.74	0.009	0.009	0.009
建库后	4697	4943	7553	0.44	0.47	0.36	0.023	0.021	0.020

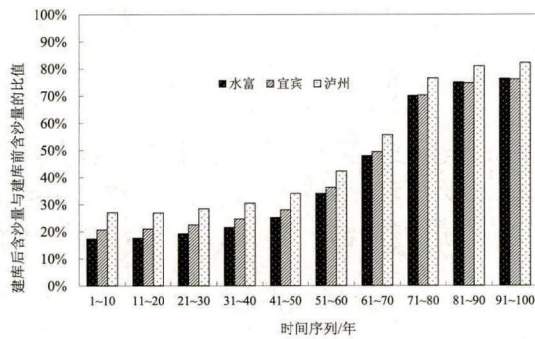


图 7 水富、宜宾、泸州站十年平均含沙量建库前后百分比  
Fig. 7 Percentage sediment concentration averages over every 10 years at Shuifu, Yibin and Luzhou before and after impoundment of cascade reservoirs

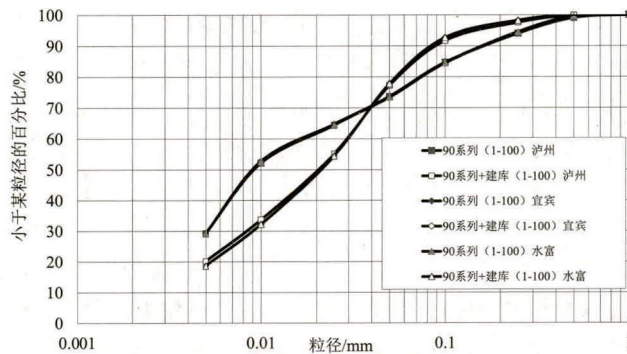


图 8 建库前后水富、宜宾、泸州站悬沙百年平均级配  
Fig. 8 Average suspended sediment gradations at Shuifu, Yibin and Luzhou before and after impoundment of cascade reservoirs

### 3.2 向家坝下游河道冲刷、水位降落

上游梯级枢纽运行后, 清水下泄, 河床普遍发生冲刷下切, 初始阶段冲刷速率相对较大, 然后逐渐趋于平衡。水库运行方式及计算的水沙边界条件由中国水科院一维水沙数学模型提供<sup>[15]</sup>。计算表明 (图 9), 水富-宜宾河段 20 年左右趋于冲刷平衡, 冲刷量约为 21930 万 m<sup>3</sup>, 平均冲刷深度为 1.4m; 宜宾-李庄河段 35~45 年左右趋于冲刷平衡, 冲刷量约为 2020 万 m<sup>3</sup>, 平均冲刷深度为 1.9m; 李庄-牛皮滩河段 50 年左右趋于冲刷平衡, 冲刷量约为 1300 万 m<sup>3</sup>, 平均冲刷深度为 0.8m; 牛皮滩-金鱼碛河段 60 年左右趋于冲刷平衡, 冲刷量为 3050 万 m<sup>3</sup>, 平均冲刷深度为 1.2m; 金鱼碛-纳溪河段 60~70 年左右趋于冲刷平衡, 冲刷量为 2950 万 m<sup>3</sup>, 平均冲刷深度为 1.3m; 纳溪-泸州河段 60~70 年左右趋于冲刷平衡, 冲刷量为 2090 万 m<sup>3</sup>, 平均冲刷深度为 1.3m。

随着坝下河床冲刷发展, 同流量下枯水位也会随着降落。枢纽运行前 10~20 年宜宾水位降落较快, 之后水位降落速率变缓, 1400m<sup>3</sup>/s 流量时 10 年末降落了 0.28m, 20 年末降落了 0.43m, 30 年末降落了 0.46m, 之后

基本不再降落；流量越大，水位降落幅度越小，中洪水流量时降落幅度很小。往上游接近枢纽坝轴线，枯水位降落幅度大于宜宾，水富 10~20 年后降落幅度达到极限，约 0.59~0.77m；愈往下游枯水位降落幅度愈小，李庄站 10 年后约降低 0.13m，30 年后降低 0.30m；至泸州枯水位基本没有降落。

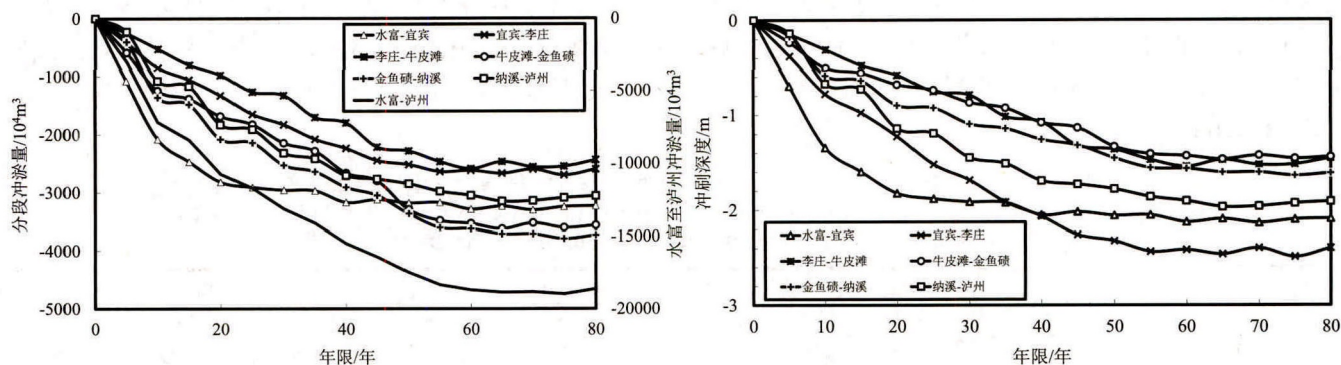


图 9 水富至泸州分河段冲刷量及冲刷深度  
Fig. 9 Erosion volumes and scour depth in the Shuifu-Luzhou reach

### 4 重点浅滩河势变化及对航道条件的影响

水富至泸州河段总体上顺直优良河段较多，但有的河段迂回曲折，礁石密布，宽窄相间，构成各类不同滩险而有碍航行。水富至泸州碍航滩段以浅、险、急滩为主，现以马皮包-和尚岩和铜鼓滩为例，说明上游梯级运行后弯曲河段浅险滩的演变特征；以杨柳磛为例，说明顺直河段过渡段浅滩的演变特征；以筲箕背为例，说明复杂浅险滩的演变特征。

#### 4.1 弯曲河段浅险滩

##### 1) 马皮包-和尚岩滩

马皮包-和尚岩河段长约 2km，位于向家坝下游约 7~9km，为“S”型反向弯曲河段（图 10）。该河段存在急、浅、弯、险四种碍航特征，属于复杂碍航滩险。

图 10 及图 11 给出了马皮包-和尚岩河段的现状水深图及梯级枢纽运行 20 年后水深图和冲淤分布（水深图已考虑了枯水位降落），图中  $D_p$  表示航深。可见，马皮包河段上段主槽呈冲刷态势，对该段航槽保持有利；而下游冲刷部位主要位于麻柳沱上侧浅滩，弯道深槽处落淤，水流趋直，河势发生了一定变化，沙湾沱浅区得以冲刷。目前，拟考虑对该河段进行航道整治工程，清除马皮包礁区，在麻柳沱左侧进行疏浚开槽，设计航线（虚线）示于图 10 右图。该河段的演变趋势与目前设计的航槽走向总体上比较一致，对设计航槽维持有利。图 12 给出了马皮包-和尚岩河段现状及 20 年后枯水、中洪水流量时的流场图。由流场图可见，枯水期主流沿弯道上游顺直微弯河段右岸深槽下泄，受打鱼磛约束逐渐偏向左岸烧瓦沱深槽，在打鱼沱处 90°右转下行，在麻柳沱处又 90°左转后沿右岸深槽进入下游顺直河段，两处急转弯河段弯曲半径均不足 250m。中洪水流量时，水流趋直，弯道段进口段主流微向右弯后从陡坎子磛坝中部顺势直泄而下。随着梯级枢纽运行，麻柳沱深槽北侧浅滩冲刷，过水断面增加，枯水流量时，主流偏向左侧浅区，麻柳沱弯道右岸水流顶冲减少，使得弯道进口段亦即马皮包暗礁区的流速会加大，加剧不良流态，而弯道出口段河势和流态变化不大，仍较稳定。

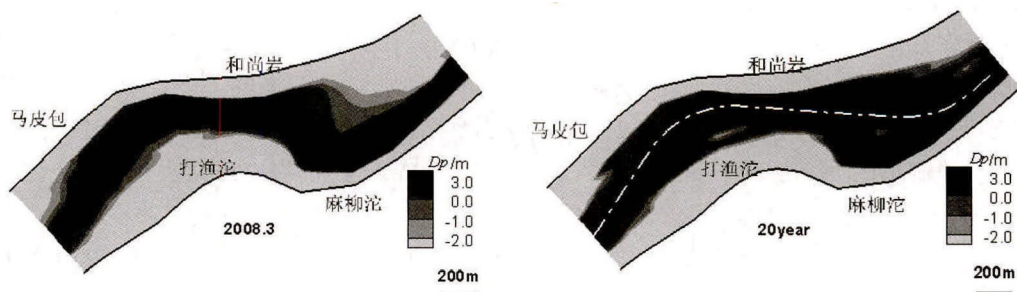


图 10 马皮包-和尚岩河段现状及 20 年后水深图  
Fig. 10 Navigation depth in the Mapibao-Heshangyan reach in present situation and 20 years after impoundment of cascade reservoirs

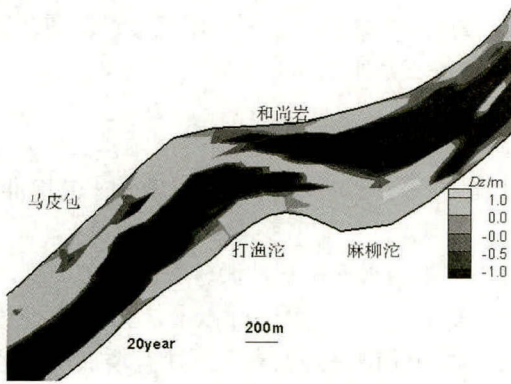


图 11 马皮包-和尚岩河床 20 年后冲淤变化  
Fig. 11 Riverbed erosion and deposition in Mapibao-Heshangyan reach 20 years after impoundment

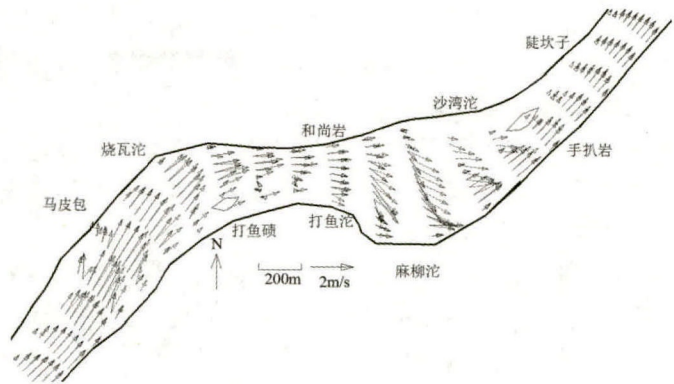


图 12 马皮包-和尚岩河段枯水流场图  
( $Q=1430\text{m}^3/\text{s}$ , 实线为现状, 虚线为 20 年后)  
Fig. 12 Velocity vectors of Mapibao-Heshangyan reach ( $Q=1430\text{m}^3/\text{s}$ , solid lines – current situation, dash lines – after 20 years)

2) 铜鼓滩

铜鼓滩位于向家坝下游约 75~81km, 处于两反向河湾的过渡段, 为浅、险滩, “弯、浅、险”是本滩的主要碍航特征。天然条件下, 铜鼓滩的主要演变特点为, 洪水期水流从九龙滩过玉带浩后水面放宽, 水流分散, 流速减缓, 泥沙落淤; 目前枯水期水流过九龙滩后右摆, 迎宾阁浅碛冲刷明显, 到达鹞子岩后左弯, 流速增大; 年内冲淤明显, 年际间相对稳定。

图 13 及图 14 给出了铜鼓滩河段的现状水深图及梯级枢纽运行 30 年后水深图和冲淤分布。可见, 铜鼓滩河段呈冲刷态势, 冲刷区域位于深槽, 滩面淤积, 支汉水浩淤积萎缩, 滩槽高差加大, 对稳定河势和航槽有利。过渡段浅滩水深有所增加, 主流贴向迎宾阁右缘, 但仍达不到 3m 水深。上游梯级枢纽运行后, 流场基本没有大的格局变化, 但滩槽高差加大, 流速为增加趋势, 下段不利流态会呈恶化趋势 (图 15)。

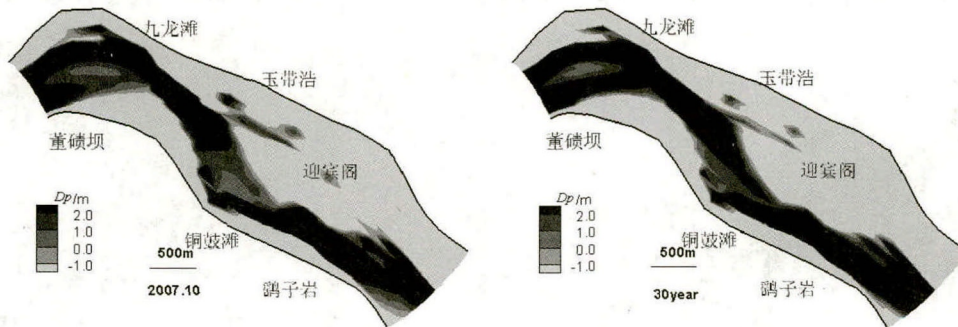


图 13 铜鼓滩河段水深变化  
Fig. 13 Navigation depths in Tonggutan reach in present situation and 30 years after impoundment of cascade reservoirs

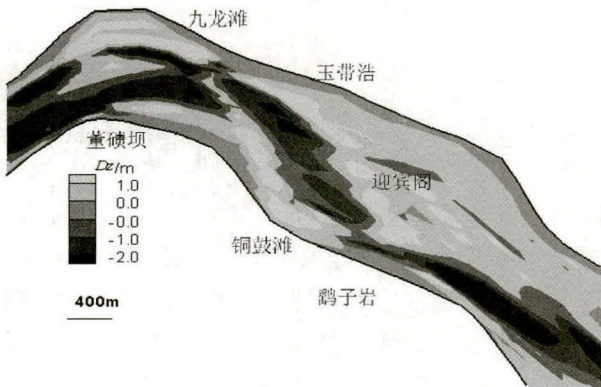


图 14 铜鼓滩 30 年后河床冲淤变化  
Fig. 14 Riverbed erosion and deposition in Tonggutan reach 30 years after impoundment of cascade reservoirs

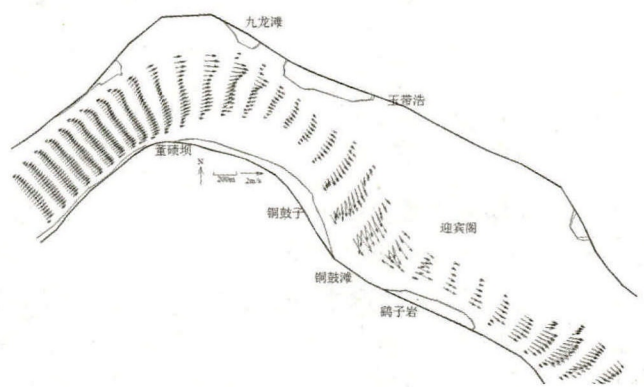


图 15 铜鼓滩河段枯水流场图 ( $Q=2394\text{m}^3/\text{s}$ , 实线为现状, 虚线为 20 年后)  
Fig. 15 Velocity vectors of Tonggutan reach ( $Q=2394\text{m}^3/\text{s}$ , solid lines – current situation, dash lines – after 20 years)

概括分析马皮包-和尚岩河段、铜鼓滩河段的演变趋势可知, 上游梯级水库运行后, 弯曲河段主流趋直,

弯曲程度呈现一定的减小态势，但仍保持弯曲河型，主流向左侧江心摆动，必要时需调整航线；过渡段浅滩水深冲刷，对航深有利；但同时滩槽高差加大，加剧不良流态；铜鼓滩的支汊水浩淤积萎缩。

### 4.2 顺直河段过渡段浅滩（杨柳碛滩）

杨柳碛滩位于向家坝下游约 55~57km，为顺直河段过渡段浅滩，碍航特征表现为航道尺度不足。天然条件下，在杨柳碛下游放宽段，洪水期水流流速减缓，泥沙落淤，形成过渡段浅滩；枯水期水流集中，河道冲刷，淤积物下移，年际间总体稳定。

图 16 及图 17 给出了杨柳碛河段的现状水深图及梯级枢纽运行 30 年后水深图和冲淤分布。由图可见，杨柳碛河段主槽呈冲刷态势，顺直河型保持不变。过渡浅滩段最小水深 10 年后可达到 3m 以上，30 年后可达到 4m 以上，有利于增加航深。该河段流态较平顺，上游梯级枢纽运行后，滩槽高差加大，流速有增加的趋势；因过水面积增加，枯水时九梭子石梁段局部流速有略减的趋势，流速横向分布趋于均匀化（图 18）。

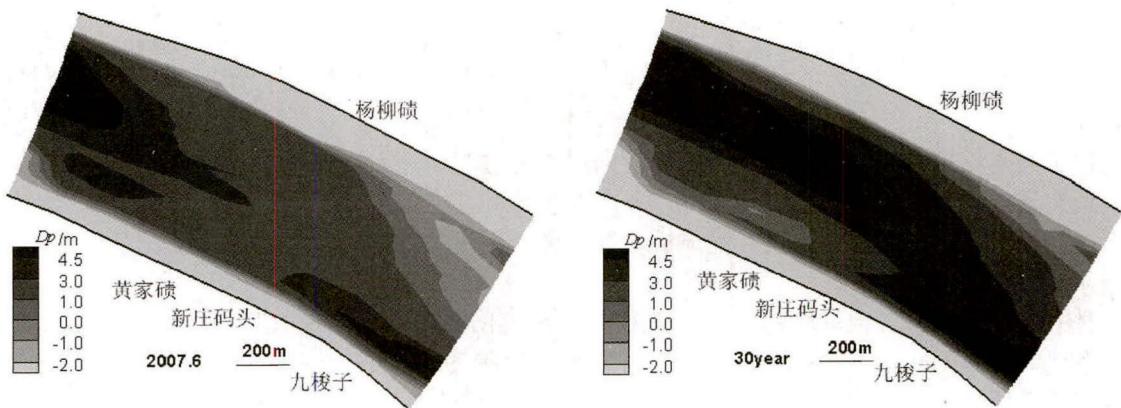


图 16 杨柳碛河段水深变化

Fig. 16 Navigation depths in Yangliuqi reach in present situation and 30 years after impoundment of cascade reservoirs

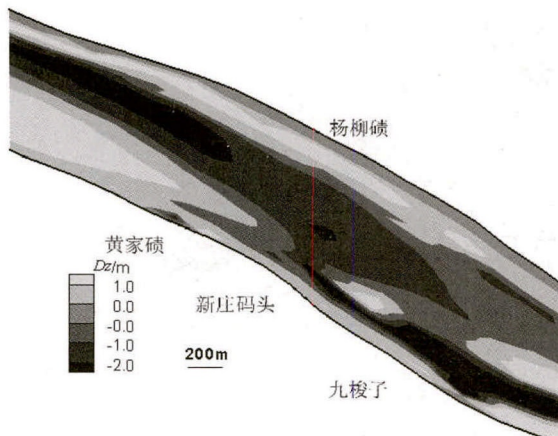


图 17 杨柳碛 30 年后河床冲淤变化

Fig. 17 Riverbed erosion and deposition in Yangliuqi reach 30 years after impoundment of cascade reservoirs

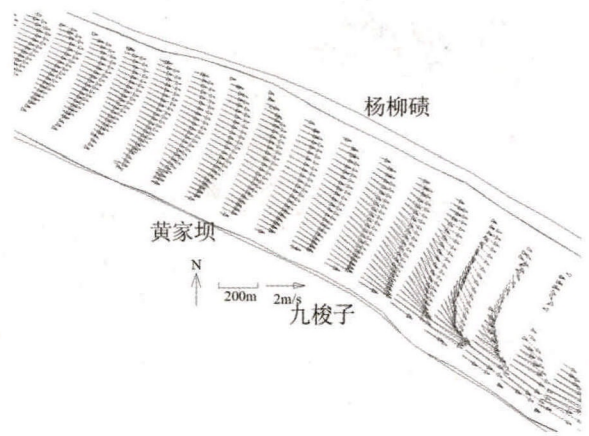


图 18 杨柳碛河段枯水流场图 ( $Q=2394\text{m}^3/\text{s}$ , 实线为现状, 虚线为 20 年后)

Fig. 18 Flow field in Yangliuqi reach ( $Q=2394\text{m}^3/\text{s}$ , solid lines - current situation, dash lines - after 20 years)

### 4.3 复杂浅危险滩（筲箕背滩）

筲箕背滩是长江上游著名的枯水浅、急、险复合的复杂滩险，位于向家坝下游约 69~71km。本滩上段较浅，在买米石和槐子滩两丁坝之间的航槽，最浅水深约 3.2m。下段碍航问题主要是水流条件不好，受左侧鹭鸶碛碛翘和右侧卵石包束窄的影响，加之右下侧深槽的吸流作用，导致此处流速达 3.75m/s，比降也较大，并伴有冲向深槽的横流。目前通过丁坝等治理措施，该滩水深不足的问题已经得到了治理，中段水流流急的问题也得到一定程度的缓解，但下段航道弯险的碍航特征还比较突出。自然条件下，筲箕背滩目前整体河势基本稳定，年际没有明显趋势性冲淤变化。

图 19 及图 20 给出了筲箕背河段的现状水深图及梯级水库运行 30 年后水深图和冲淤分布。可见，筲箕背河段呈冲刷态势，冲刷区域位于筲箕背上游和牛皮滩深槽，上段浅滩段水深增加，对该段航槽保持有利。但全



河段并不是均匀冲刷, 存在局部冲淤, 筲箕背洲尾淤积下延, 挤压航槽, 阻止上下深槽贯通, 在筲箕背尾部产生新的过渡段浅滩, 河势趋于复杂。鹭鸶碛头部及右缘有所冲刷, 主流部分被引向鹭鸶碛右缘, 不利于筲箕背出流与牛皮滩深槽的连通, 某种程度上也加剧了过渡段浅滩的形成。图 21 给出了筲箕背河段现状及梯级枢纽运行 30 年后的流场图。可见, 主流从上游下泄, 到筲箕背后, 抱筲箕背卵石包右转, 然后冲向正对的右岸牛皮滩, 再左转流向下游。上游梯级枢纽运行后, 筲箕背附近流速增加, 中段水流流急的问题有所加剧; 鹭鸶碛右缘冲刷, 导向右侧深槽的横向流速减小, 对改善下段流态有利, 但同时筲箕背及其下游流速有增加的趋势, 该段弯险的碍航特征仍比较突出。

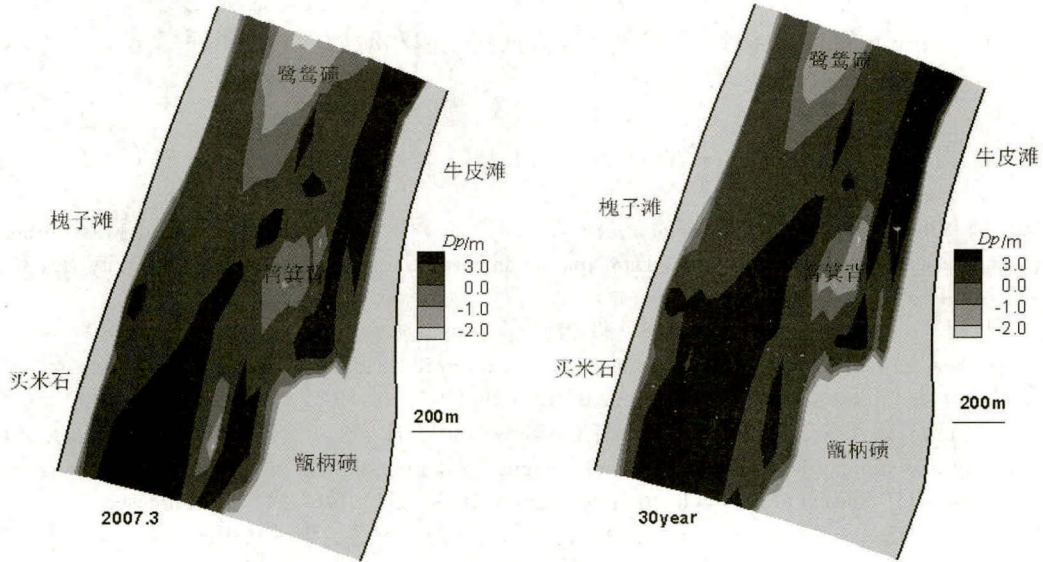


图 19 筲箕背河段水深变化

Fig. 19 Navigation depths in Shaojibei reach in present situation and 30 years after impoundment of cascade reservoirs

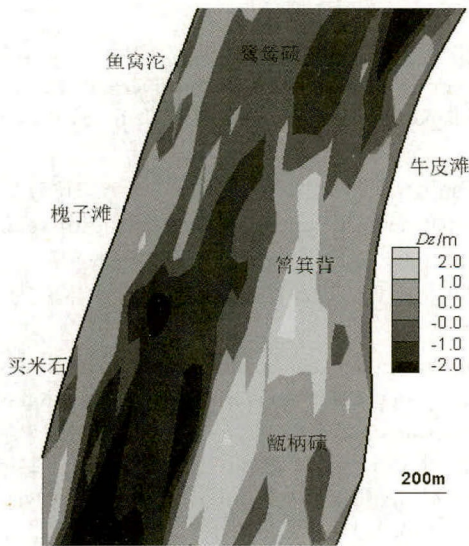


图 20 筲箕背 30 年后河床冲淤变化

Fig. 20 Riverbed erosion and deposition in Shaojibei reach 30 years after after impoundment of cascade reservoirs

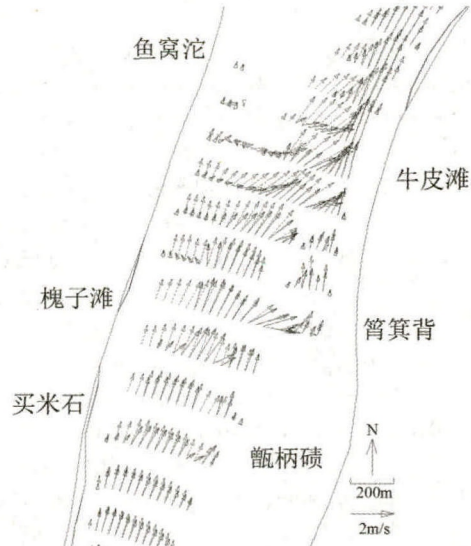


图 21 筲箕背河段枯水流场图 (Q=2394m³/s, 实线为现状, 虚线为 20 年后)

Fig. 21 Velocity vectors in Shaojibei reach (Q=2394m³/s, solid lines – current situation, dash lines – after 20 years)

### 5 结论及建议

① 本文通过二维水沙数学模型计算分析了长江上游向家坝、溪洛渡等梯级水库运行后, 向家坝下游河段泥沙冲淤时空变化规律, 研究了梯级水库对重点滩段河势和航道的影响。

② 水库运行后, 下游河道发生冲刷, 并引起枯水位降落。通过对马皮包和尚岩、杨柳碛、筲箕背、铜鼓滩等 4 个典型重点滩段的初步研究分析表明, 上游梯级枢纽运行后, 下游河势及航道条件会发生变化, 对下游

航道的有利有弊。弯曲河段(马皮包-和尚岩、铜鼓滩)主流趋直,弯曲程度呈现一定的减小态势,但仍保持弯曲河型,主流向河心摆动,必要时需调整航线;铜鼓滩的支汉水浩淤积萎缩。顺直河段(杨柳碛)基本保持为顺直河型。对航道的有利之处在于,清水下泄河床冲刷对增加过渡段浅滩航深有利。不利之处在于,下游河道并非均匀冲刷,而可能在局部河段产生淤积,造成新的浅段(如筲箕背);主槽冲深,边滩淤积,滩槽高差加大,加剧局部不良流态,急浅滩的航行条件有恶化趋势。

本研究为基于向家坝、溪洛渡梯级水库设计运行方式的初步研究成果,从趋势性方面分析了航道条件变化。枢纽实际运行后,调度运行方式可能会有所改变,需结合实际水沙调度进一步深入研究对下游河势和航道的影响。上游其他梯级水库陆续建设,进一步拦沙后对下游河势和航道条件会产生新的影响,需开展持续研究。梯级水库运行后,建议加强下游地形监测,跟踪分析浅滩演变规律和河势、航道条件变化,以便及时采取对策。

#### 参考文献:

- [1] 张为,李义天,江凌.三峡水库蓄水后长江中下游典型分汉浅滩河段演变趋势预测[J].四川大学学报,2008,40(4): 17-24.  
ZHANG Wei, LI Yitian, JIANG Ling. Fluvial Process Change of the Typical Multi-Branched Meandering Reach in the Mid-Down Yangtze River After Three Gorges Dam Impoundment [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2008, 40(4): 17-24. (in Chinese)
- [2] 陈立,闫霞,周银军,等.三峡水库蓄水初期关洲分汉河段的冲淤调整分析[J].泥沙研究,2012,(1): 53-57.  
CHEN Li, YAN Xia, ZHOU Yinjun, et al. Erosion and deposition of Guanzhou braided reach during initial impoundment period of Three Gorges Project [J]. Journal of Sediment Research, 2012, (1): 53-57. (in Chinese)
- [3] 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[J].水力发电学报,2013,32(2): 146-154.  
XU Quanxi. Study of sediment deposition and erosion patterns in the middle and downstream Changjiang mainstream after impoundment of TGR [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013, 32(2): 146-154. (in Chinese)
- [4] 李明,朱玲玲,李义天,等.长江中下游鹅头型分汉河道演变机理及发展趋势研究[J].水力发电学报,2013,32(1): 174-180,186.  
LI Ming, ZHU Lingling, LI Yitian, et al. Study on evolution mechanism and development trend of the goose-head pattern braided channel in the middle and lower Yangtze River [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013, 32(1): 174-180, 186. (in Chinese)
- [5] 姚仕明,黄莉,卢金友.三峡、丹江口水库运行前后坝下游不同河型稳定性对比分析[J].泥沙研究,2012,(3): 41-45.  
YAO Shiming, HUANG Li, LU Jinyou. Comparative analysis of river bed stability of different river patterns below reservoirs before and after commissioning of Three Gorges Project and Danjiangkou Project [J]. Journal of Sediment Research, 2012, (3): 41-45. (in Chinese)
- [6] 戴会超,何文社,袁杰,等.葛洲坝水利枢纽运行后泥沙冲淤变化分析[J].水科学进展,2005,16(5): 691-695.  
DAI Huichao, HE Wendu, YUAN Jie, et al. Analysis on scour and deposit variation characteristic of sediment after the operation of Gezhouba hydro project [J]. Advances in Water Science, 2005, 16(5): 691-695. (in Chinese)
- [7] 张俊勇,陈立,吴门伍,等.水库下游河流再造床过程的时空演替现象——以丹江口建库后汉江中下游为例[J].水科学进展,2006,17(3): 348-353.  
ZHANG Junyong, CHEN Li, WU Menwu, et al. Phenomena of replacement between spatial and temporal processes during the process of reformation downstream reservoirs: A case study of middle-lower Han River after the construction of Danjiangkou reservoir [J]. Advances in Water Science, 2005, 16(5): 691-695. (in Chinese)
- [8] 王志力,陆永军.向家坝水利枢纽下泄非恒定流的数值模拟[J].水利水电科技进展,2008,28(3): 12-15.  
Wang Zhili, LU Yongjun. Numerical simulation of unsteady flow in Xiangjiaba Hydropower Project [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2008, 28(3): 12-15. (in Chinese)
- [9] 曹民雄,庞雪松,王秀红,等.向家坝水电站下游非恒定水沙特性研究[J].水利水运工程学报,2011,(1): 28-34.  
CAO Minxiong, PANG Xuesong, WANG Xiuhong, et al. Experimental study on unsteady flow and sediment characteristic downstream of Xiangjiaba power station [J]. Hydro-Science and Engineering, 2011, (1): 28-34. (in Chinese)
- [10] 府仁寿,齐梅兰,方红卫,等.长江上游工程对宜昌来水来沙变化的影响[J].水力发电学报,2006,25(6): 103-110.  
FU Renshou, QI Meilan, FANG Hongwei, et al. Incoming runoff and sediment runoff to Yichang hydrometric station affected by the projects on the upstream of Yangtze River [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2006, 25(6): 103-110. (in Chinese)
- [11] 长江重庆航运工程勘察设计院.长江上游泸州纳溪至重庆娄溪沟航道建设工程航道整治工程效果分析报告[R].重庆,2008.  
Changjiang Chongqing Harbour and Waterway Engineering Investigation and Design Institute. The results analysis report of the waterway construction project in the upper reaches of Yangtze river from Luzhou Naxi to Chongqing Louxigou [R]. Chongqing, 2008. (in Chinese)

- [12] 陆永军, 徐成伟, 左利钦, 等. 长江中游卵石挟沙河段二维水沙数学模型 [J]. 水力发电学报, 2008, 27 (4): 36-47.  
LU Yongjun, XU Chengwei, ZUO Liqin, et al. 2D mathematical model for water-sediment with gravel and sand in the middle reaches of the Yangtze River [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2008, 27(4): 36-47. (in Chinese)
- [13] Lu Yongjun. Mathematical modeling of degradation and fluvial process downstream reservoirs [J]. Journal of Hydrodynamics, 2001, 13(4): 107-112.
- [14] Lu Yongjun, Chen Guoxiang. A Non-uniform sediment transport model with the boundary-fitting orthogonal coordinate system [J]. Journal of Hydrodynamics, 2002, 14(1): 64-68.
- [15] 毛继新. 金沙江梯级水电站建设对向家坝水库出库水沙的影响[R]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2013.  
MAO Jixin. Impact of the construction of hydropower stations on the Jinsha River cascade Xiangjiaba reservoir of water and sediment out of the library [R]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2013. (in Chinese)