

# 水库与河道采砂共同作用下的河道演变分析

胡朝阳<sup>1,2</sup>, 王二朋<sup>3</sup>, 王新强<sup>1,2</sup>

(1. 福建省水利水电勘测设计研究院, 福建 福州 350001; 2. 福建省水工程水动力研究中心, 福建 福州 350001; 3. 中国长江三峡集团公司三峡梯调成都调控中心, 四川 成都 610042)

**摘 要:** 水库与河道采砂共同作用下的河道有其独特的演变进程。以闽江下游河道为例, 对水库及河道采砂作用下的河道演变情况进行初步分析, 探讨了两者联动作用下的河道演变特征。结果表明: 在水库清水下泄及河道采砂共同作用下, 闽江下游河床的演变主要表现为河床纵横向的大幅度下切, 河道断面面积显著扩大, 河床泥沙损失量极大。在采砂得到禁止的北港, 河床则较为稳定, 冲淤幅度小。水库与河道采砂引发的河床演变均是使河床形态朝着与水沙条件相适应的平衡状态发展, 两者作用下的河道演变呈现出3个特征: 河道冲刷加剧, 河床下切幅度明显; 河床演变规律复杂, 演变趋势难以准确预测; 演变带来的不利影响非常严重。

**关键词:** 水沙特征; 水库; 采砂; 河道演变; 闽江

中图分类号: TV121

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2015)03-0178-06

## Analysis of channel evolution under combined action of reservoir and channel sand excavation

HU Zhaoyang<sup>1,2</sup>, WANG Erpeng<sup>3</sup>, WANG Xinqiang<sup>1,2</sup>

(1. Fujian Provincial Investigation, Design & Research Institute of Water Conservancy & Hydropower, Fuzhou 350001, China; 2. Fujian Hydraulics Research Center, Fuzhou 350001, China;

3. Chengdu Three Gorges Cascade Regulation Center, China Three Gorges Corporation, Chengdu 610042, China)

**Abstract:** The channel evolution under combined action of reservoir and river course sand excavation has its uniqueness. Taking the Lower Reaches of Minjiang river for example, the paper analyzed the channel evolution under combined action of reservoir and channel sand excavation. The results showed that under the combined action of reservoir water discharge and channel sand excavation, the evolution of lower reaches of Minjiang mainly presents longitudinal and lateral large scour, the area of channel cross section increases significantly, and the sediment loss is great. The river bed shows more stable and the changes of scouring and silting is slight in North port while the sand excavation is forbidden. The channel evolution caused by reservoir and river course sand excavation aims to reach balance between scouring and silting. Under combined action of reservoir and channel sand excavation, the evolution presents three characteristics: the channel scour is aggravated and the river bed erosion is in large scale; the fluvial rule is more complicated and the evolution trend is difficult to predict accurately; the adverse effects of channel evolution is very severe.

**Key words:** water and sediment features; reservoir; sand excavation; channel evolution; Minjiang River;

河道演变是水沙运动与河道边界相互作用的过程, 其主要影响因素包括来水量及其变化过程、来沙量、来沙组成及其变化过程、出口侵蚀基点、河床周界条件等<sup>[1]</sup>。水库建设改变下游河道的进口水沙条件, 河道采砂则影响到河床周界条件, 两者任一

发生均会引起河床的相应调整<sup>[2-3]</sup>。在水库下游河床采砂, 一方面由于水库的拦沙作用使得下游河道来沙骤减, 另一方面由于种种原因河道采砂往往难以得到有效控制, 超采、滥采河砂现象时有发生, 两方面联动使得下游河床“入不敷出”, 演变剧烈, 进

而引发一系列不良后果,如河床的大幅度下切威胁到涉河工程基础的安全、河道水位的下降影响到城市正常取水等。分析水库与河道采砂共同作用下的河道演变情况对防治现有涉河工程的安全隐患、优化未来涉河工程建设方案等均有重要意义。

闽江是福建省最大河流,发源于武夷、仙霞、杉岭等山脉,全长约 541 km,由水口坝下开始称之为闽江下游,流经闽清、闽侯、福州市区、长乐和连江,全长约 117 km。闽江下游干流在淮安头处被南台岛分为南北两港,南港曲折而宽浅,是主要的泄洪排沙水道,河床中沙浅滩比北港发育;北港比较平直狭深,为航运通道,南港与北港于马尾汇合后折向东北进入通海河段,见图 1。闽江流域水力资源丰富,开发利用程度较高,上游 3 大支流流域已建有大中型水库 46 座,干流流域则建有大中型水库 18 座。其中,对闽江下游河道起控制性作用的是 1993 年建成的水口水库,其蓄水运行后对闽江下游水沙特性影响显著。闽江下游河砂资源丰富,且质量极好,是很好的建筑材料,曾大量出口到日本、韩国和我国台湾等地,丰富的河砂资源及可观的经济效益诱使了大肆采挖河道泥沙的现象,给闽江下游河道带来深刻影响。本文结合原型观测资料,对水库及河道采砂共同作用下的河道演变情况进行了分析,探讨了水库与河道采砂联动作用下的河道演变特征。

1 建库后下游水沙特性变化

水库建设改变下游河道天然的水沙输运过程,破坏河流原有平衡,引起下游河道的再造床作用<sup>[3]</sup>。图 2 给出了位于水口水库下游约 46 km 处竹岐水文站

1950 – 2011 年径流量和年输沙量变化,表 1 给出了水库建设前后竹岐站实测水沙特征值。由图、表可知,水库建设后,下游河道来水条件变化相对较小,来沙条件却变化显著,多年平均悬移质含沙量由建站前(1950 – 1992)的 0.128 kg/m<sup>3</sup> 减少为建站后(1993 – 2011)的 0.043 kg/m<sup>3</sup>,减少了 66.4%;多年平均悬移质输移量由建站前的 703 万 t 减少为建站后的 271 万 t,仅为建站前的 38.5%。另外,水库的调节作用使得河道年内来水来沙分配有一定程度均化,汛期(4 – 9 月)来水来沙年内分配权重略有减小,非汛期的来水来沙年内分配权重略有加大。

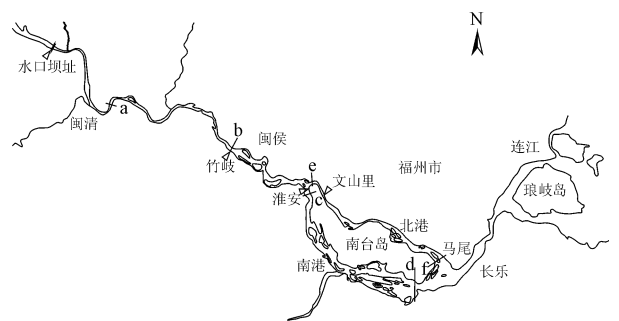


图 1 闽江下游河道示意图

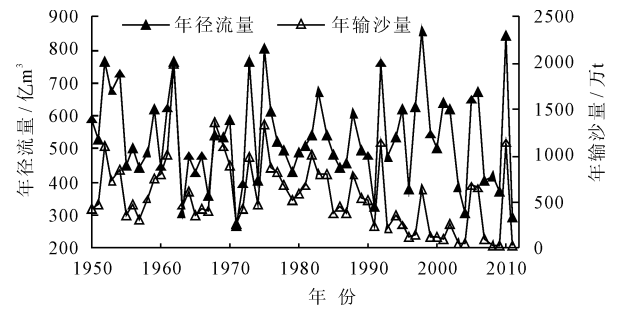


图 2 1950 – 2011 年竹岐水文站年径流量和年输沙量变化

表 1 水口水电站建设前后竹岐水文站水沙特征值

| 时间                   | 年均径流量/<br>亿 m <sup>3</sup> | 最大年径<br>流量/亿 m <sup>3</sup> | 最小年径<br>流量/亿 m <sup>3</sup> | 年平均流量/<br>(m <sup>3</sup> · s <sup>-1</sup> ) | 悬移质年<br>输移量/万 t | 最大悬移质年<br>输移量/万 t | 最小悬移质年<br>输移量/万 t | 年平均含沙量/<br>(kg · m <sup>-3</sup> ) |
|----------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------------------------|-----------------|-------------------|-------------------|------------------------------------|
| 建设前<br>(1950 – 1992) | 532                        | 805                         | 268                         | 1685                                          | 703             | 2002              | 271               | 0.128                              |
| 建设后<br>(1993 – 2011) | 535                        | 859                         | 294                         | 1694                                          | 271             | 1140              | 22                | 0.043                              |

2 河道采砂概况

闽江下游河道上采砂使用的采砂船分为抓斗式直采和吸砂泵船两种。抓斗式采砂主要分布在淮安口以上,日采量一般为 800 ~ 1 500 t;吸砂泵船主要集中在马尾段,每小时吸砂可达 1 000 t。据闽江下游(福州段)河道整治研究实地调查数据,从水口坝

下至马尾河段,1993 年采砂 839 万 t、1994 年 570 万 t、1995 年 516 万 t、1996 年 676 万 t,而同期竹岐站实测来沙分别为 215 万 t、358 万 t、255 万 t、129 万 t。另据福建省港航部门相关数据显示,1998 – 2006 年 9 a 间福州港出港砂量达 118 501 万 t,水口水电站船闸上行运砂量达 303 万 t,而同期竹岐站实测来砂量仅为 2 705 万 t,采砂量为来沙量的近 44 倍。

2007 年以来,随着国家禁止天然砂出口及福建省采砂相关法律、法规及规划的出台,闽江下游河道上的采砂才基本得到控制,现通过编制采砂规划来确定采砂区域及采砂量,目前采砂主要分布在干流及南港河道上,年采砂总量超过 200 万  $\text{m}^3$ 。

### 3 河道演变分析

#### 3.1 河床的纵向变化

图 3~5 给出了水口大坝-淮安河段、北港及南港河段历年深泓纵剖面高程变化。从图中可以看出,水口大坝-淮安河段和南港河段深泓纵剖面高程下降明显,北港河段深泓纵剖面高程则总体相对稳定,仅在其下段出现大幅度下降现象。2003-2008 年水口大坝-淮安河段全程深泓线平均下切 2.74 m;北港河段全程平均下切 0.78 m;南港河段全程下切 4.20 m。2008-2009 年水口大坝-淮安河段全程深泓线平均下切 1.43 m;北港河段全程下切 0.44 m。2008-2011 年南港全程深泓线平均下切 0.29 m。北港自 1997 年起全面禁止采砂后,造床动力排除了河道采砂这一重要影响因素,因而河床变化幅度相对较小。水口大坝-淮安和南港河段现仍规划有多个采砂区域,大量采砂的后果凸显在河床的大幅度下切上。

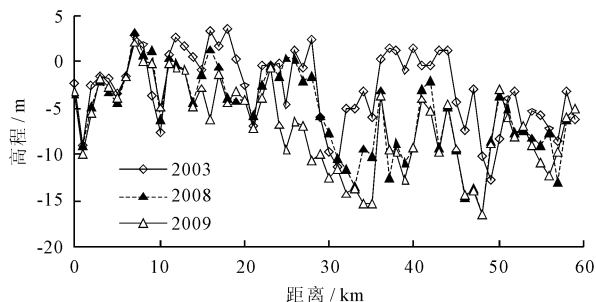


图 3 水口大坝-淮安河段深泓纵剖面高程变化

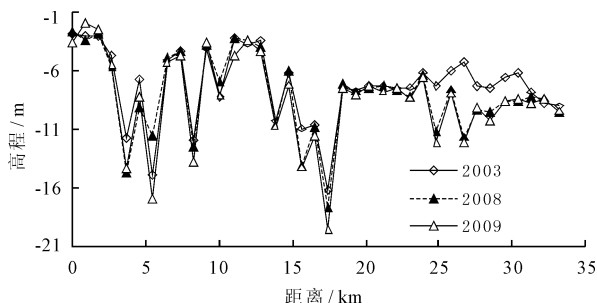


图 4 北港河段深泓纵剖面高程变化

#### 3.2 河道断面形态变化

河道断面形态发展过程受河岸及河床抗冲性能、水库运用方式、河段位置及河道采砂等多个因素的影响<sup>[1]</sup>。选取若干典型断面分析闽江下游河道

断面形态变化,断面位置见图 1,套汇历年地形如图 6 所示(图中起点距由左岸到右岸)。

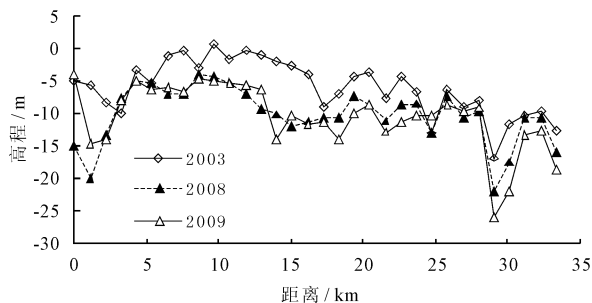


图 5 南港河段深泓纵剖面高程变化

图 6(a)所示断面位于闽清建兴村,属弯道段断面,断面右侧为受冲凹岸。2003-2008 年断面深泓点向右偏移 40 m,深泓点高程较 2003 年下切 7.27 m,断面左河床无明显冲淤,右侧河床处于冲刷状态;2008-2009 年断面右侧河床稳定,但断面左侧河床下降明显,最大下降达 7.97 m,采砂是主要影响因素;2009-2011 年该断面处于全线刷深状态,断面面积明显增大,河床中部最大刷深达 6.3 m,断面深泓点高程较 2009 年下降 2.46 m。图 6(b)为竹岐水文站测量断面,1980-2000,闽侯竹岐断面冲淤变化不大,断面形态较稳定。2000-2005,该断面发生严重冲刷下切,河床主槽下切最大近 20 m,大幅度采砂是主要的影响因素。2005 年以来,闽江下游河道先后经历了 2005、2006 及 2010 年 3 场洪水,且采砂逐步得到控制,2010 年地形与 2005 年地形相比主要表现为主河槽左侧淤积、右侧刷深,总体表现为冲刷。2011 年,该断面除深泓位置右移之外,断面处于淤积状态。

图 6(c)所示断面位于南港科贡,该断面滩槽分界明显,断面左侧为主河槽,右侧为河道滩地。2003-2008 年该断面主河槽全线冲刷,平均刷深 7.5 m,最大刷深 14.59 m,主河槽过流面积显著扩大,右侧边滩较稳定;2008-2009 年该断面主河槽呈淤积态势,平均淤高 1.92 m,边滩无明显冲淤变化。图 6(d)所示断面位于南港乌龙江大桥上游,该断面宽浅散乱,分布有多个边心滩,历年的地形变化主要发生在汉道。2003-2008 年该断面左侧主汉最大下切 6.59 m,断面中部及右侧枝汉河床较稳定;2008-2009 年该断面主汉及各支汉均呈冲淤交替状态,冲淤幅度较小。图 6(e)所示断面位于北港进口,从历年的地形变化来看,该断面冲淤幅度较小,河槽较稳定。图 6(f)所示断面是北港出口断面,该断面河床也较为稳定,仅在部分位置出现河床的异常下切现象,应是偷采河砂导致。

从6个典型断面形态的演变过程来看,北港河道由于禁止采砂,河道断面形态较为稳定,而水口-淮

安及南港河道断面在水库清水下泄及采砂共同作用呈下切趋势,且下切幅度明显,断面面积不断扩大。

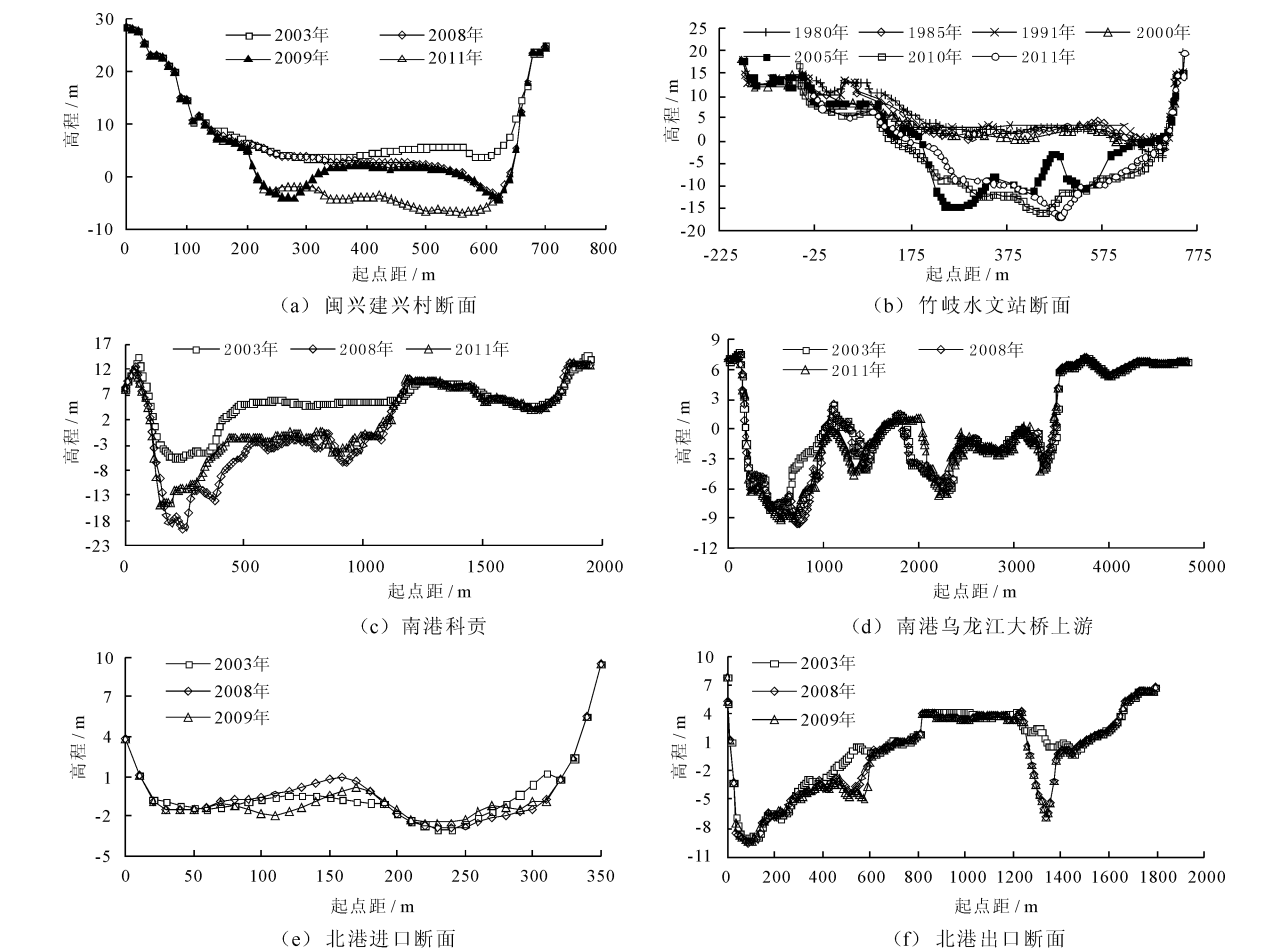


图6 河道横断面冲淤变化

3.3 河道泥沙损失变化

受水库清水下泄冲刷及河道采砂共同影响,闽江下游河道泥沙损失量极大。根据实测地形资料<sup>[4]</sup>,统计1989、2003及2009年闽江下游泥沙损失量及相应河道地形变化,见表2。1989-2003,水口大坝-淮安河段泥沙损失量达9 081.59万m<sup>3</sup>,相应河床高程平均下降1.95 m;南港河道损失10 857.49万m<sup>3</sup>,河床高程平均下降1.73 m;北港河道损失6 626.76万m<sup>3</sup>,河床高程平均下降3.76 m。2003-2009年,3个河段泥沙损失量分

别为12 677.26万m<sup>3</sup>、11 450.58万m<sup>3</sup>、1 501.99万m<sup>3</sup>,相应河床高程平均下降幅度为2.72、1.82、0.85 m。即1989-2009年的20 a间水口大坝-马尾河段泥沙损失总量达5.22亿m<sup>3</sup>,河床高程平均下降了4.11 m。从1989-2003和2003-2009两个时段泥沙损失及河床地形的变化可知,采砂影响较大,北港河床在1989-2003下降幅度明显,要大于水口大坝-淮安河段和南港,而在北港自1997年起全面禁止采砂后,其河床下降幅度则较其它两个河段小。

表2 闽江下游河道泥沙损失量统计表<sup>[4]</sup>

| 河段      | 1989-2003                  |              | 2003-2009                  |              | 1989-2009                  |              |
|---------|----------------------------|--------------|----------------------------|--------------|----------------------------|--------------|
|         | 泥沙损失量/<br>万 m <sup>3</sup> | 平均地形<br>下降/m | 泥沙损失量/<br>万 m <sup>3</sup> | 平均地形<br>下降/m | 泥沙损失量/<br>万 m <sup>3</sup> | 平均地形<br>下降/m |
| 水口大坝-淮安 | 9081.59                    | 1.95         | 12677.26                   | 2.72         | 21758.86                   | 4.67         |
| 南港      | 10857.49                   | 1.73         | 11450.58                   | 1.82         | 22308.07                   | 3.551        |
| 北港      | 6626.76                    | 3.76         | 1501.99                    | 0.85         | 8128.74                    | 4.606        |
| 马尾-长门   |                            |              | 7829.40                    | 2.28         |                            |              |

## 4 讨论

水库建设与河道采砂引发河流自发调整和演变,其最终结果均是使河床形态朝着与水沙条件相适应的平衡状态发展,两者是紧密相联的。一方面,一定的水沙条件是河道采砂坑逐步恢复的必要条件,采砂坑的恢复是砂坑周围泥沙及上游来沙在水流作用下逐步回淤的结果。闽江下游河道由于中上游梯级水库建设致使来沙量骤减,下游河道上的采砂坑往往得不到足够的泥沙补给而难以恢复。分析闽江下游实测河床地形,一个很显著的现象就是闽江下游河床上局部深坑非常之多,相当部分就是由采砂导致。另一方面,河道采砂也会在水库下游河道的演变过程中发挥作用,其存在会加剧或促进这一过程中的某些变化和进程。例如河道采砂会加剧河床的冲刷、拓宽及河道比降的调整;采砂作业的“去粗留细”会促进床沙粗化进程;在弯道凸岸切滩采砂会使主流向河中摆动,减少主流对凹岸的冲刷,而在凹岸采砂则会加剧河岸的冲刷,同时伴随着河道曲率的调整等。可见,在水库下游河道逐渐调整趋向平衡的过程中,河道采砂亦扮演着重要的角色。水库与河道采砂联动作用下的河道会呈现出其较为独特的演变特征,结合闽江下游演变情况总结如下:

(1)河道冲刷加剧,河床下切幅度明显。水库清水下泄会造成下游河床的冲刷,其冲刷深度与水库下泄水沙特性、下游河床组成及坡降、侵蚀基准面等密切相关,其终极平衡状态则通过形成抗冲铺盖层或达到平衡比降来实现<sup>[1-2]</sup>。河道采砂除直接造成河床下切以外,还通过砂石分选、采砂坑导致的溯源冲刷和河床全面调整来改变河床的组成和坡降,在河口区的采砂还会导致河道出口侵蚀基点的变化。因而,闽江下游河床大幅度下切是水库与采砂共同作用下的结果。另外,两者联动还会导致桥墩、丁坝、堤防等局部冲刷加剧,使其冲刷深度加大<sup>[5-8]</sup>。

(2)河床演变规律复杂,演变趋势难以准确预测。水库与河道采砂的联动使得河道相关研究工作变得复杂,采砂导致的河床地形突变等因素使得河床冲淤的模拟结果与实测资料有较大的出入<sup>[9-10]</sup>,给全面掌握下游河床演变规律和准确预测河床演变趋势带来极大干扰。河道采砂造成的河床不均匀下切还影响到闽江下游南北港分流分沙比的变化,而分流分沙比的变化又会反过来影响到南北港河道的演变<sup>[11]</sup>。

(3)演变带来的不利影响非常严重。水库及河道采砂导致的河床强烈调整带来的不利影响主要表现在以下几个方面:①涉河工程基础淘刷严重,坍塌事故频发。受河床大幅度下切影响,闽江下游已多次出现堤防、河岸、码头、桥墩等坍塌事故,给沿岸人民生命财产安全造成极大威胁<sup>[4]</sup>,河道采砂是罪魁祸首。②河道水位不断下降,咸潮上溯加剧,影响供水安全。闽江下游是重要的城市水源地取水口,沿江自上而下分布有多个水厂,供水规模达 300 多万 t/d,而河床的大幅度下切及河槽容积的不断扩大使得河道水位不断下降,纳潮量持续增加,近年来闽江口在枯水大潮期已出现多次咸水倒灌的现象,同时潮汐也使得污染物在河道内往复回荡,滞留时间增加,引发水体污染。③河道生态环境恶化,湿地功能下降。水库与河道采砂改变了湿地的水文情势,加之城市扩张、农用地开垦、工矿用地开发占用天然湿地或改变天然湿地用途以及对湿地生物资源的过度利用、湿地污染等,导致闽江河口的天然湿地日益减少,功能和效益下降,湿地生物多样性受到威胁<sup>[12]</sup>。④水口水电站正常的发电与航运功能受到严重影响。坝下水位的持续下降,使得水口水电站为维持最低通航水位的基荷流量由原设计的 308 m<sup>3</sup>/s 逐渐增大至 2006 年的 2 350 m<sup>3</sup>/s,通航压力不断加大,而最低通航水位也是水口发电最低水位,水位的不断下降也使得水轮机的吸出高度达不到设计要求,影响到机组的正常运行<sup>[9]</sup>。

## 5 结 语

(1)闽江中上游梯级水库建设,特别是水口水库的建成,改变了闽江下游河道进口水沙条件,致使来沙量骤减,加之河道上出现的超采、滥采河沙的现象,使得采砂强度大大超过上游泥沙补给能力,致使河床“入不敷出”,强烈下切。

(2)在水库清水下泄及河道采砂共同作用下,闽江下游河床的演变主要表现为河床纵向大幅度下切及横向展宽,河道断面面积不断扩大,河床泥沙损失量极大。在采砂得到禁止的北港,河床则较为稳定,冲淤幅度小。

(3)水库与河道采砂引发的河床演变均是河流发挥自动调整作用的过程,其最终目的也都是使河床形态朝着与水沙条件相适应的平衡状态发展,两者是密切相关的。两者联动下的河道演变特征为:河道冲刷加剧,河床下切幅度明显;河床演变规律复杂,演变趋势难以准确预测;演变带来的不利影响非

常严重。

参考文献:

[1] 钱宁,张仁,周志德.河床演变学[M].北京:科学出版社,1987.

[2] 傅开道,黄河清,钟荣华,等.水库下游水沙变化与河床演变研究综述[J].地理学报,2011,66(9):1239-1250.

[3] 毛野.初论采沙对河床的影响及控制[J].河海大学学报(自然科学版),2000,28(4):92-96.

[4] 黄永福.闽江下游河床演变及其影响研究[J].水利科技,2010(4):15-17.

[5] 何洋,杨胜发,张帅帅,等.长江重庆大沙坝采砂对航道的影响[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2013,32(1):152-156.

[6] 齐梅兰.采沙河床桥墩冲刷研究[J].水利学报,2005,36

(7):835-839.

[7] 王刚,茜平一,邹勇.河道采砂对堤防安全影响分析[J].人民长江,2004,35(2):27-28.

[8] 徐芳,岳红艳.河道采砂对航道和通航环境安全的影响[J].水运工程,2010(8):106-110.

[9] 杨首龙,林琳,吴时强,等.水动力与人为挖砂共同作用下水口水电站坝下水位变化规律[J].水力发电学报,2013,32(4):137-142.

[10] 杨首龙,吴时强,陈昭宾.闽江下游天然河床的未来演进趋势[J].水利水电技术,2013,44(9):111-114+118.

[11] 姚静,谭亚,陶建峰.人类活动对闽江下游的影响研究——挖沙对分流比的影响[C]//.第十二届中国海岸工程学术讨论会,昆明,2005.

[12] 高元竞.闽江河口湿地生态服务功能价值评价[D].福州:福建农林大学,2009.



(上接第177页)

参考文献:

[1] 楼道明,程开宇,刘光保.受回水顶托影响断面水位流量关系分析探讨[C]//.中国水力发电工程学会水文泥沙专业委员会第七届学术讨论会论文汇编,2007:23-26.

[2] 胡俊波,李晓云,孟令武.变动回水影响下的水位流量过程对应关系分析[J].水文,2011,31(2):50-53.

[3] 葛树东,朱晓斐,李正奎.嫩江大赉水文站9581号洪水受变动回水顶托影响分析[J].东北水利水电,2002,20(3):30-31.

[4] 中华人民共和国水利部.SL247-2012水文资料整编规范[S].北京:中国水利水电出版社,2012.

[5] 冯持,张红艳,孙建儒.不同因素影响条件下的水位流量关系[J].东北水利水电,2012,30(1):48-49.

[6] 中华人民共和国水利部.SL195-97水文勘测规范[S].北京:中国水利水电出版社,1997.

[7] 葛维亚.水文“单值化”史话[J].人民长江,2007,38(8):130-131+180.

[8] 张亭,吴尧.汉口水文站水位流量单值化方案及其应用[J].人民长江,2014,45(9):39-42.

[9] 韦全益.浅议水文巡测流量测验方式的选择[J].广西水利水电,2013(4):61-63.

[10] 胡小庆,许光祥.金沙江大雪滩群水位流量关系研究[J].水运工程,2010(6):115-119.