

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2020.06.007

三峡大坝—葛洲坝河段水沙变化及冲淤特性

史常乐, 牛兰花, 赵国龙, 杜林霞

(长江水利委员会水文局长江三峡水文水资源勘测局, 湖北 宜昌 443000)

摘要: 掌握三峡和葛洲坝枢纽间河段水沙及冲淤特性的变化规律, 是河段诸多工程问题研究的前提。对大量水沙地形资料进行分析, 探讨泥沙起动理论在冲刷预测中的应用。长江上游水库建设及两大枢纽相继运行, 河段年径流量微减, 月均流量发生“削峰填谷”重分配, 年输沙量大幅降低, 河段水沙关系显著改变; 河段累积冲淤量受极端水文条件和枢纽调度的短期和长期控制, 时间上具有明显阶段性特征, 空间上则表现为部分子河段的活跃性; 床沙组成随枢纽运行先后发生细化和粗化; 基于沙玉清起动流速公式绘制了起动临界条件曲线图, 通过推算断面最大可动床沙粒径或临界流量, 可为河床冲刷可能性的预判提供参考。

关键词: 水沙关系; 冲淤演变; 起动流速; 冲刷预测; 三峡大坝—葛洲坝河段

中图分类号: TV14 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2020)06-0875-10

三峡和葛洲坝两枢纽之间的河段(简称两坝间河段)是长江上游和中下游的连接通道。大坝枢纽在发挥巨大综合效益的同时, 往往会显著改变上下游的水沙运动特性, 衍生出水库淤积、库区细颗粒泥沙形成絮凝、清水冲刷、生态影响等问题。对此, 国内外学者开展了大量研究, 对两座枢纽联合调度及河流开发管理起到重要支撑。Li 等^[1]和李文杰等^[2]采用输沙率法和断面法分析三峡库区的泥沙淤积特点; Li 等^[3]和李文杰等^[4]研究表明三峡库区细颗粒泥沙絮凝是库区淤积的重要原因; 朱玲玲等^[5]通过原型观测数据分析坝下游荆江河段进入强冲刷状态; Zhang 等^[6]研究了三峡大坝蓄水前后鱼类群落的时间变化。针对水库蓄水运行后坝下游河段河流动力特性, 国内外学者研究表明, 水库清水下泄导致坝下游河床冲淤特性、演变规律等发生明显变化^[7], 其中水沙变化是导致下游河段调整的关键因素, 不同时期的不同河段又具有明显的差异性^[8]。许全喜^[9]对宜昌至大通干流河道冲淤规律分析表明, 三峡工程蓄水运用后, 长江中下游河道由之前的“上冲下淤”和“冲槽淤滩”转变为全程冲刷和“滩槽均冲”, 并且由于三峡入、出库水沙条件与原有设计相差较大等原因, 坝下游冲刷速度和范围大于论证阶段的预计。可见随着长江流域开发保护的持续开展, 水沙动力条件的改变及其对河流调整的影响需要持续的关注和研究。对水沙及河床冲淤特性的分析是进一步研究上述问题的重要基础, 河床冲淤演变特性作为河段重要的边界条件, 是其中一个重要的基础性课题。樊云等^[10]、成金海等^[11]分别针对三峡工程动工以来和施工期两坝间河床演变做了细致研究, 分析了河床演变历史过程及其原因, 总结了“汛期冲枯期淤, 丰水年冲枯水年淤”的主要特征, 三峡工程施工的部分弃渣改变了河段来沙条件, 使床沙发生一定的粗化, 尤以1994、1995年为甚。

三峡和葛洲坝水利枢纽联合调度已近20年, 期间的调度规则也具有阶段特征, 将使两坝间河段的水沙特性和河床演变规律出现新的变化。为此, 在以往研究基础上, 基于长时间序列的水沙及地形实测资料, 对两坝间河段水沙变化及冲淤特性进行分析, 对全面了解两坝间河段的河性、优化联合调度规程、预测长江中下游来水来沙条件及论证相关整治方案都具有积极作用。

收稿日期: 2019-12-31; 网络出版日期: 2020-07-20

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20200720.1159.004.html>

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFC0402305)

作者简介: 史常乐(1989—), 女, 河南新乡人, 工程师, 硕士, 主要从事工程泥沙及河床演变研究。

E-mail: carolhappyshi@163.com

1 河段概况

两坝间河段位于宜昌市境内,全长约 38 km,如图 1 所示。左右岸均有小型支流,但汇入的径流和沙量在该河段占比较小。河床中泓多由淤沙组成,两岸为基岩或乱石,岸线及河势总体稳定。由于两坝间河段的重要性,附近设置了庙河站、黄陵庙站和宜昌站 3 个水文站,分别位于三峡大坝上游约 15.4 km、下游约 13.5 km 和葛洲坝下游约 7.3 km,其中宜昌站控制了长江流域总面积的 56%。三峡水文水资源勘测局以葛洲坝为起点向上游设置了若干控制断面,每年定期测量地形。

两坝间河段处在葛洲坝水库常年回水区内,河段两端的葛洲坝和三峡大坝水利枢纽分别于 1981 年 6 月和 2003 年 6 月蓄水运行。为便于对比分析,在时间上分为天然时期(1980 年之前)、葛洲坝独立运行期(1981—2002 年,简称葛洲坝时期)、两枢纽联合调度运行期(2003 年之后,简称联合调度期)。按照三峡工程运行调度规则,联合调度运行期又分为 3 个子时期:围堰发电期(2003 年 6 月—2006 年 9 月),坝前水位按 139 ~ 135 m 运行;初期蓄水期(2006 年 9 月—2008 年 9 月),坝前水位按 156 ~ 145 m 运行;175 m 试验性蓄水期(2008 年 9 月—2018 年 11 月),坝前水位按 175 ~ 145 m 运行^[14];后文分别简称 C1、C2、C3 时期。

两枢纽运行前后积累了大量原型观测资料,庙河、黄陵庙和宜昌水文站水文资料统计年限分别为 2004—2018 年、1996—2018 年、1950—2018 年,地形资料为 1979—2018 年所测 1:2 000 固定断面,本文以此为基础对两坝间河段水沙及冲淤特性进行分析,高程采用吴淞高程基准。

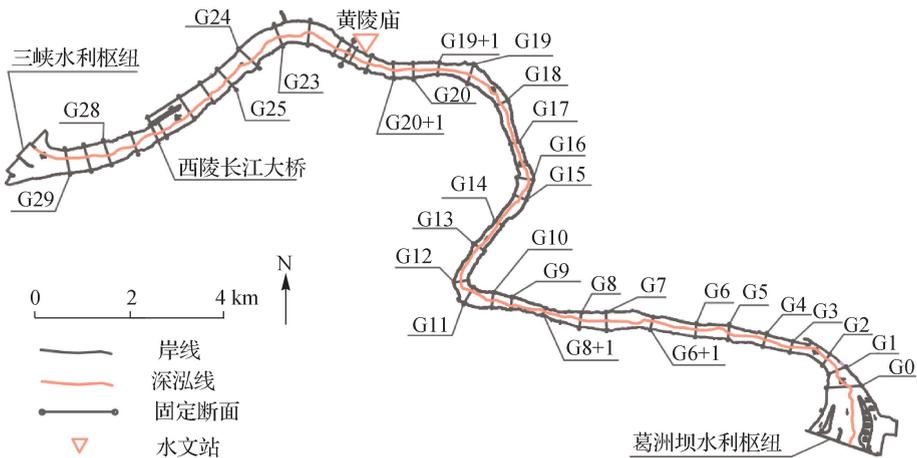


图 1 两坝间河段河势及固定断面布置

Fig. 1 River regime in the reach between the two dams and diagram of the fixed cross-sections

2 水沙特性分析

水沙特性是河流系统演变最根本的动力要素,水沙关系变化会直接促使河道发生调整,首先利用 3 个水文站的资料进行水沙特性分析。宜昌站资料始于 1950 年,可全面分析 3 个时期的水沙变迁,黄陵庙和庙河站分别设立于葛洲坝和三峡枢纽建成后,三站结合可对联合调度期河段水沙特性进行空间差异性分析。

2.1 径流量和输沙量年际变化趋势

三站各年径流量、输沙量及各个时期的平均值如图 2(图中实线表示平均值)和表 1 所示,宜昌站年径流量逐年波动并呈微弱减小趋势。就多年平均径流量而言,相比天然时期,葛洲坝时期和联合调度期分别减少 0.62% 和 6.58%,考虑到上游梯级运用对来水的影响及库区工农业用水等的增加,可认为年径流量总体变

化不大。联合调度期三站多年平均径流量由上至下略微增加,主要是区间降雨汇流作用。

天然时期年输沙量大体与径流量正相关,总体趋势平稳。葛洲坝时期年输沙量总体有明显减小趋势,见图2(b)中虚线,多年平均输沙量较天然时期减少10.80%。葛洲坝库区水流挟沙力降低导致一定的水库淤积,1994—1997年三峡大坝建设使坝上游水位增高也有一定的影响,但更主要的原因是长江上游水库群建设引起的拦沙作用。截至1985年,仅嘉陵江就修建了4 542座水库,使得嘉陵江北碛站减沙1 200万 $t^{[12]}$;而1991—2005年三峡上游水库群年均拦沙1.8亿 t ,由此导致三峡入库沙量年均减少1.1亿 $t^{[13]}$ 。1998年大洪水使得当年输沙量达到葛洲坝时期极大值,此后急剧下降是上游水库群持续拦沙、葛洲坝库区1998年大洪水后回淤及三峡工程第二阶段施工综合影响的结果。

2003年三峡枢纽蓄水运用后进入联合调度期,宜昌站输沙量逐渐平缓,多年平均值相较天然时期锐减93.04%,主要原因是上游水库群拦沙和三峡水库淤积。2003—2015年三峡水库年均入库泥沙为1.77亿 t/a ,其中C1时期约为2.3亿 t/a ,2013—2015年降至0.714亿 $t/a^{[12]}$,分别比天然时期宜昌站多年平均输沙量少65.6%、55.3%和86.1%。三段时期对应宜昌站多年平均输沙量分别为0.404 t/a 、0.702 t/a 和0.144亿 t/a ,两枢纽联合拦沙率分别为77.2%、69.5%和79.8%。空间上,黄陵庙的多年平均输沙量比庙河有所减少,而与宜昌站水平相当,可见庙河—三峡大坝河段发生了一定的淤积。

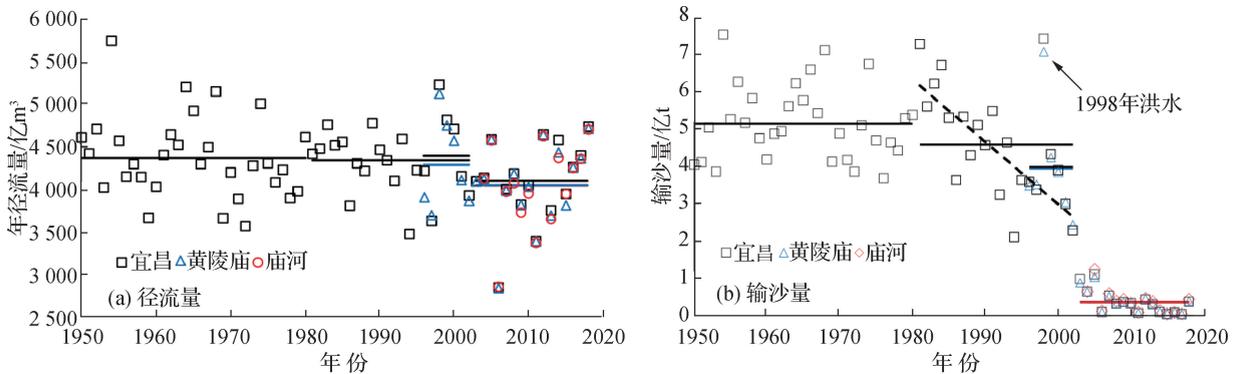


图2 3个水文站径流量和输沙量年际变化过程

Fig.2 Interannual variation in runoff and sediment discharge at the three hydrological stations

表1 不同时期各站年径流量和年输沙量统计平均值

Table 1 Average annual runoff and sediment discharge at each station in different periods

运行期	年径流量/亿 m^3			年输沙量/万 t		
	庙河	黄陵庙	宜昌	庙河	黄陵庙	宜昌
天然时期	-	-	4 380	-	-	51 494
葛洲坝时期	-	-	4 353	-	-	45 932
1996—2002年	-	4 291	4 385	-	39 483	39 843
联合调度期	4 039	4 062	4 092	3 569	3 542	3 583

2.2 水沙年内分配变化

3个水文站多年平均径流量随枢纽运行变化不大,但年内过程出现了重分配。由图3(a)可知,受两枢纽调蓄作用影响,宜昌站月均流量过程有一定坦化,即“削峰填谷”。相比天然时期,葛洲坝时期月均流量最大变化率为10.1%(3月)和-7.1%(10月);联合调度期坦化效果更为显著,最大变化率分别为53%(2月)和-31%(10月)。图3(b)表明,枢纽运行后,年内输沙过程仍主要发生在洪季,月均输沙率基本全年减少。葛洲坝时期以枯季减少为主,最多减少81%(3月);洪季变化不大,7月份平均输沙率增长了10%,是唯一增长的月份,这也反映了葛洲坝作为低水头径流电站调蓄能力有限。三峡枢纽运行后,在上游来沙减

少和三峡水库调蓄作用下，月均输沙率全年骤减，至少降低 89% (2 月)。可见年内输沙过程所受影响远大于流量，而三峡枢纽影响程度则远超葛洲坝。

联合调度期内，宜昌站枯季流量较庙河站有所降低，反映了三峡水库蓄水的影响，洪季流量高于上游两站，主要是区间降雨汇流的结果。月均输沙率表明，两坝间河段的输沙主要集中在洪季 7—9 月份，占全年 92% 以上，其中 9 月份月均输沙率从上游到下游递增，表明沿程可能发生了冲刷。

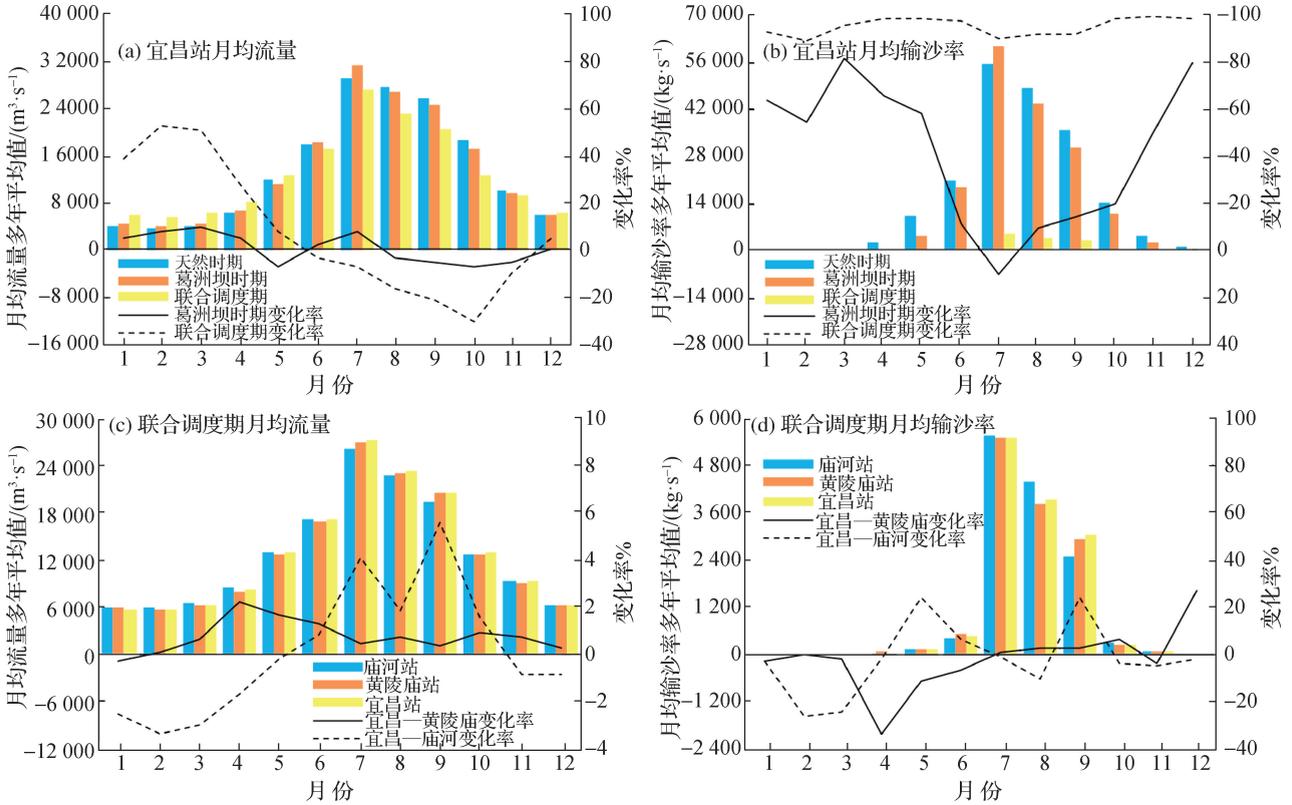


图3 月均流量和月均输沙率的时空分配特征

Fig.3 Temporal and spatial distribution characteristics of monthly average water flow and sediment discharge rate

2.3 水沙关系变化

水沙关系变化是河道发生调整的直接原因，图 4 给出了宏观的径流量—输沙量及微观的流量—输沙率关系。由于输沙量明显减少，各时期内的水沙关系呈现不同的正相关关系，与天然时期相比，联合调度期水沙关系变化显著，相同径流量对应的输沙量大幅减少，该现象与图 4(b)中输沙率—流量关系相吻合，这将对

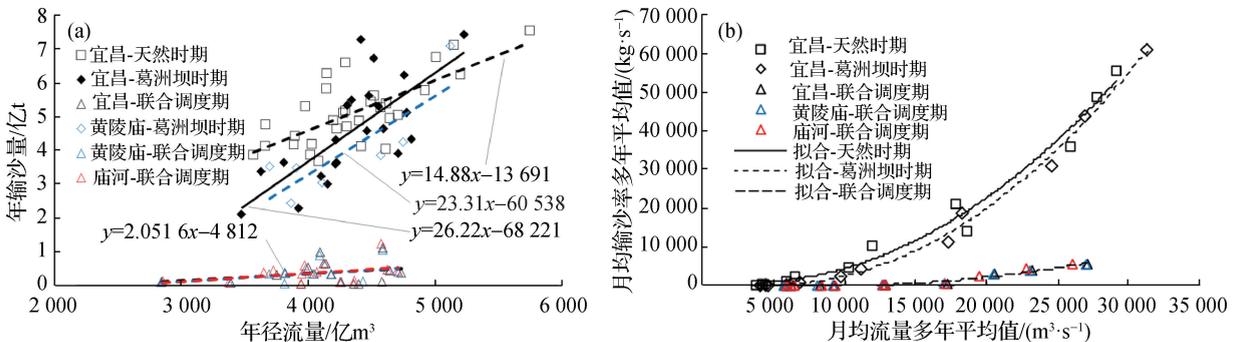


图4 不同时期宜昌站水沙关系

Fig.4 Water-sediment relationships in Yichang hydrological station in different periods

中下游河道调整产生重要影响。葛洲坝时期的变化规律有所不同,当年径流量小时,年输沙量比天然时期减小,反之增大。可见葛洲坝水库在径流量较小年份调蓄能力明显,库区流速降低导致细沙落淤,从而使输沙量减小;在径流量较大年份,水库调蓄能力有限,遇大流量时几乎敞泄,此时库容水量随来水一起下泄,导致流量反而有增大趋势,同时流速加大使得前期落淤在库区的细沙起运发生冲刷,从而使下游宜昌站输沙量增大。空间上三站的水沙关系在联合调度期的宏观和微观差别均较小。

综合上述分析可知,两座枢纽的运行对年径流量影响不大,但使年内出现“削峰填谷”的重分配,其中三峡枢纽作用尤为显著,这使得枢纽对下游防洪抗旱的积极作用得以实现。由于长江上游水库群建设和运用起到明显的拦沙作用,使三峡水库入库泥沙多年平均值(2003—2015年)比宜昌站天然时期减少约65.6%,同时三峡和葛洲坝水库拦截了各时期三峡入库泥沙的70%左右,使得进入两坝间河段的水沙数量及水沙关系显著改变。为适应水动力因子的剧烈变化,两坝间河段河床必然发生相应调整从而呈现出全新的规律。

3 河床冲淤演变特性

因天然时期地形较少,而G23—G29断面(图1)在个别年份未测。为便于统一对比,选取葛洲坝—G23断面间长约30km河段,对葛洲坝运行后的冲淤演变进行分析,可基本代表该河段规律。

3.1 河段累积冲淤量及冲淤时空分布

图5以1979年为基准,采用截锥法计算了河段各年累积冲淤量,累积冲淤量随枢纽调度具有明显的阶段性。葛洲坝建成后2年淤积迅速,之后分为2个阶段:1982—1997年有冲有淤,整体呈累积性淤积态势,1996年累积淤积量达最大值6548万 m^3 ;1998—2002年逐年淤积,且淤积速率较前一阶段更快,这是因为1998年特大洪水期间河段发生剧烈冲刷,部分腾空了前期淤积的库容后快速复淤。此外,三峡工程连续施工期间(1994年12月—1997年11月)未对河段冲淤产生明显影响。

联合调度期受三峡水库清水下泄影响,整体表现为累积性冲刷。而调度规则不同的3个子时期,也表现出不同的冲淤特性。C1—C3时期分别冲刷2681.7万 m^3 、405.4万 m^3 和578.4万 m^3 ,其中C1时期整体逐年大量冲刷,年均冲刷强度为22.9万 $\text{m}^3/(\text{km}\cdot\text{a})$,从葛洲坝运行开始产生的淤积基本归零;C2和C3时期年均冲刷强度为2.8万 $\text{m}^3/(\text{km}\cdot\text{a})$,比C1时期显著降低。从图5也可以看出,C1时期内河段整体冲刷至葛洲坝建设之前的水平,之后C2和C3时期继续发生微冲,并且在C3时期开始表现出有冲有淤的趋势。

综合而言,两坝间河段冲淤受枢纽调度和极端水文条件影响显著。葛洲坝时期和联合调度期分别呈累积淤积和冲刷态势,极端水文条件会导致剧烈冲刷,但长期冲淤趋势受枢纽调度控制。

基于图5中的阶段性特征,针对主要冲淤时段,图6给出了相邻断面间72m高程以下的平滩河槽冲淤量,各时段冲淤均主要集中在2个活跃子河段:G6—G9和G20—G22。图5中累积冲淤量相当的时段,如

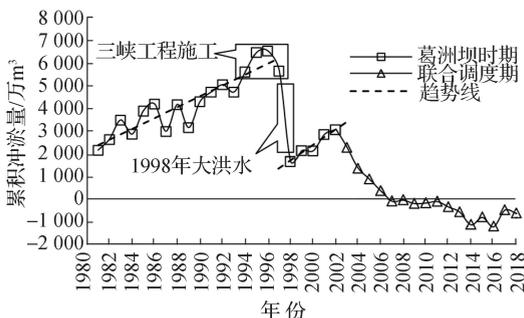


图5 葛洲坝运行后两坝间河段累积冲淤量逐年变化过程

Fig. 5 Year-by-year variation in cumulative erosion and deposition quantity in the reach between the two dams after the operation of Gezhou Dam

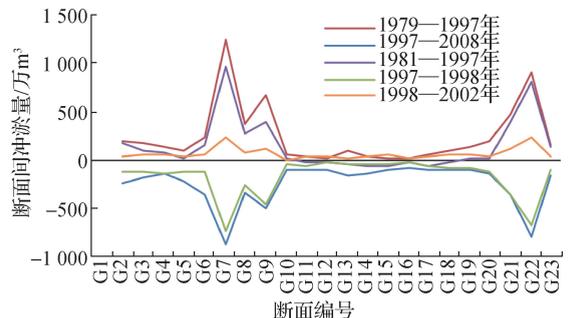


图6 各典型时段的断面间平滩河槽冲淤量沿程分布

Fig. 6 Distribution of erosion and deposition quantity in flat channels along the cross-section in each typical period

1981—1997年与1997—1998年，1979—1997年与1997—2008年，在图6中2个数据系列形态也较对称，但数量上有所差异。除前述2个子河段外，其他位置的冲淤量均较小。由此可见，这2个子河段是两坝间河性最活跃的河段，应该在后续测验和监测时重点关注，关于其相对活跃的原因，需对枢纽不同运行状态下河段内的水动力特性做专门研究，本文限于篇幅暂不讨论。

为进一步掌握河段冲淤规律，将主要节点年的深泓线及其变化分别绘于图7和图8。从图中可以看出，两坝间河段深泓线演变没有表现出稳定趋势，也未形成明显的淤积三角洲。2个活跃河段的深泓线变幅明显超过其他河段，其中G6和G21断面最大变幅分别达到34.8 m(-29.6 m)和35 m(-27.5 m)，不过也有部分断面深泓变幅与河段冲淤量不太相符，以下结合断面形态变化进一步分析。

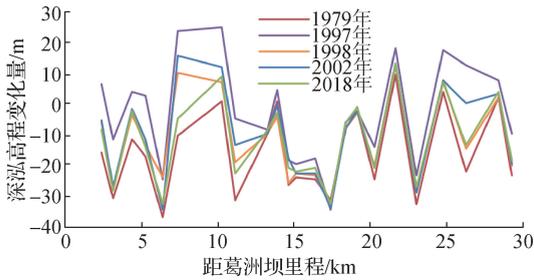


图7 典型年份葛洲坝库区深泓线套绘

Fig.7 Talwegs in Gezhou Dam Reservoir area in typical years

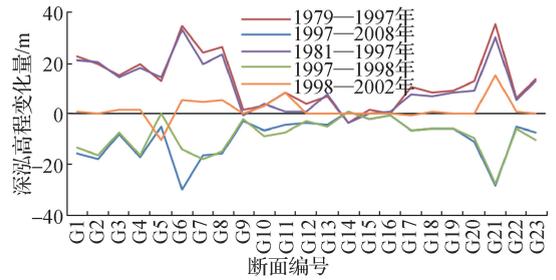


图8 不同典型时段前后两坝间河段深泓高程变化

Fig.8 Variation in talweg elevation in the reach between the two dams in different typical periods

3.2 典型横断面形态变化

前已述及，部分断面深泓线变化与冲淤量有差异，如G1—G4、G6、G11、G21、G23断面深泓变化明显但冲淤量小；G9和G22断面深泓稳定但冲淤量大；G5断面深泓与冲淤量则在1998—2002年期间呈相反趋势。选取G1、G5、G6、G22为代表断面，分析横向冲淤特征，从图9中线簇形态可判断冲淤演变的复杂度，以下按从简单到复杂的顺序进行分类分析。

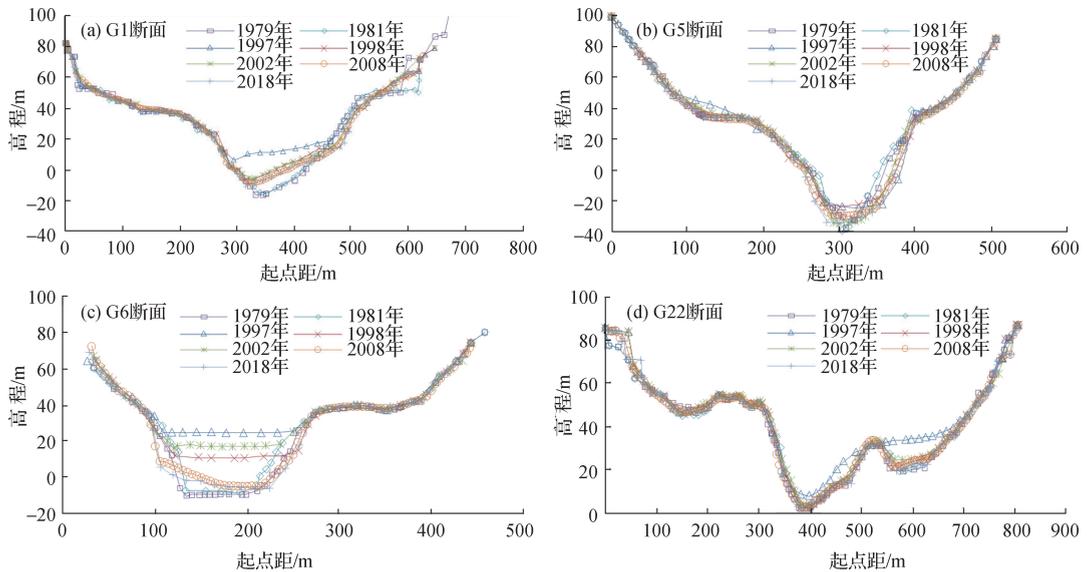


图9 典型横断面地形变化套绘

Fig.9 Changes in terrain in typical cross-sections

G22断面为复式断面，但冲淤演变最简单。1979—1997年两深槽发生淤积，1998年冲刷至葛洲坝运行前状态附近，此后仅在局部有小规模调整。可见工程运行对该类断面的属性影响不大，工程前的断面形式具

有较好的稳定性,称为“原始稳定型”断面。G1断面主槽于1979—1997年间发生淤积,1998年剧烈冲刷后,仍保持了一部分淤积河床,此后在此基础上微弱调整,工程使该类断面发生简单清晰的改变,从工程前的稳定状态调整至新的稳定状态,称为“偏移稳定型”断面。G6和G5断面在2018年则仍在调整中,可归为“持续调整型”断面,在后续工作中应加强监测。其中G6断面表现为较清晰的主槽冲淤,而G5断面的演变则更为凌乱。

综上所述,河段内大断面形式多样,体现了该河段复杂的天然属性,同时也导致了不同的断面冲淤特性。总体而言,各断面的冲淤变化都主要发生在深槽内,边滩及浅滩基本较为稳定。

对于前述深泓变化与累积冲淤量的差异,也可参照图9解释。G1断面冲淤主要发生在“V”形深槽内,故深泓变化比冲淤量显著;1998—2002年全河段累积淤积阶段,G5断面深槽冲刷明显,使深泓线加深,而在1998年特大洪水期间,该断面冲淤强度则明显弱于其他断面,可见即便在极端水文年份,也有断面呈现特殊冲淤特征;G6断面虽然冲淤明显,但由于图6中G6对应的数据是G5—G6断面间的冲淤量,G5断面的复杂性对截锥法计算产生了一定影响;G22断面主要冲淤部位并非主槽,故表现为冲淤量大而深泓变化不明显。

3.3 床沙组成变化

水库运用改变了河段水沙特性,库区淤积使床沙变细,下游则因清水冲刷而发生床沙粗化。基于实测床沙资料,对典型断面枯季床沙中值粒径 D_{50} 进行分析,如图10所示。由于床沙资料有限,部分年份并未收集到资料,同时通过查验原始资料发现,部分断面仅有一点采到沙样,这可能是导致数据存在波动的原因,不过从多年变化趋势来看仍具规律性。

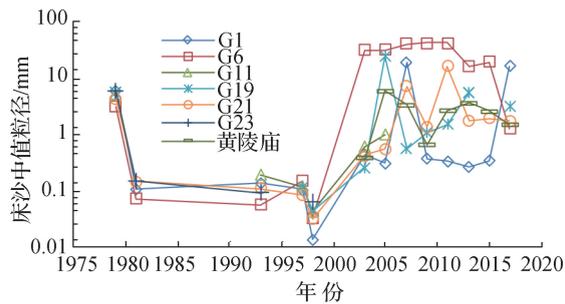


图10 典型断面床沙中值粒径的变化过程

Fig. 10 Variation in median particle size of bed sediment in typical cross-sections

天然时期床沙主要为卵石和粗沙,1979年平均 D_{50} 约为5.63 mm。葛洲坝蓄水后全河段快速淤积,1981年 D_{50} 细化至0.071~0.145 mm,至1997年均较稳定,可见葛洲坝蓄水后2年内床沙细化已基本完成。1998年特大洪水使河床发生剧烈冲刷,大汛过后葛洲坝库区恢复蓄水,为泥沙分选落淤提供了较理想的条件,河床表层均为新落淤的细沙,这可能是当年底所测 D_{50} 为历年最小的原因。三峡水库蓄水后,受水流条件剧变影响,两坝间河床持续冲刷使床沙发生一定粗化。从变化趋势看,这种粗化也在短期内完成,2003年以后,部分断面如G1和G6所采沙样已总体趋于稳定,其他断面则仍有不同程度的调整。

4 泥沙起动理论在河床冲刷预测中的应用

泥沙起动是河床冲刷演变的起点,也是河流动力学最重要的基础理论之一。实际应用中常用起动流速 U_c 表示泥沙起动临界条件,当实际断面平均流速 U 大于 U_c 时,泥沙起动进而河床发生冲刷。前人基于不同考虑得出了不同的 U_c 计算公式,虽然具体公式有所差异,但主要影响因素均为水深 h 和泥沙粒径 D ,即 $U_c = f(h, D)$,对于明渠水流又有 $U = f(Q, A)$, Q 为流量, A 为断面面积,由此可得到泥沙起动临界条件的

简化方程 $F_c(Q, A, h, D) = 0$ ，该式包含了水流、地形和泥沙三方面4个因素。对特定河道， A 和 h 利用一维数模容易获取，则 D 和 Q 为“设一求一”关系，由此可以通过2种思路对断面河床冲刷可能性进行分析：一方面已知 D 可求得起动所需临界流量 Q_c ；另一方面设定 Q 也可反算最大可动粒径 D_c 。

关于泥沙起动流速的研究成果有很多，各自具有不同的形成背景和适用条件。张红武^[14]对各家起动流速公式进行了评述，认为沙玉清公式更重视水深增加对起动流速的影响，因而更接近天然河流实际。为此选取沙玉清公式为例，对上述2种分析思路加以阐释，公式形式如式(1)所示。

$$U_c = \sqrt{gD(\gamma_s - \gamma)/\gamma h^{1/5} [266(\delta/D)^{1/4} + 6.66 \times 10^9 (0.7 - \varepsilon)^4 (\delta/D)^2]^{0.5}} \quad (1)$$

式中： g 为重力加速度， 9.8 m/s^2 ； γ_s 为泥沙容重， 25.97 kN/m^3 ； γ 为水的容重， 9.8 kN/m^3 ； σ 为薄膜水厚度，取 0.0001 mm ； ε 为孔隙率，取 0.4 。

通过统计2003—2018年黄陵庙站资料，多年平均流量 $12\,900 \text{ m}^3/\text{s}$ ，汛期多年平均流量 $18\,800 \text{ m}^3/\text{s}$ ，汛期多年日均流量的最大值 $29\,900 \text{ m}^3/\text{s}$ ，最大日均流量 $58\,500 \text{ m}^3/\text{s}$ 。葛洲坝前水位运行区间为 $66.5 \sim 63.0 \text{ m}$ ，此处取坝前水位 66.5 m ，建立一维数模计算上述特征流量下各断面水位，结合地形得到断面面积和水深，各断面水深在 $20 \sim 60 \text{ m}$ 变动。将上述资料整理绘制为两坝间河段床沙起动临界曲线，如图11所示，曲线上任意点包含了临界流量、断面面积、平均水深和临界粒径4个参数。选取G9和G20为示例断面，对上述2种思路进行阐述。

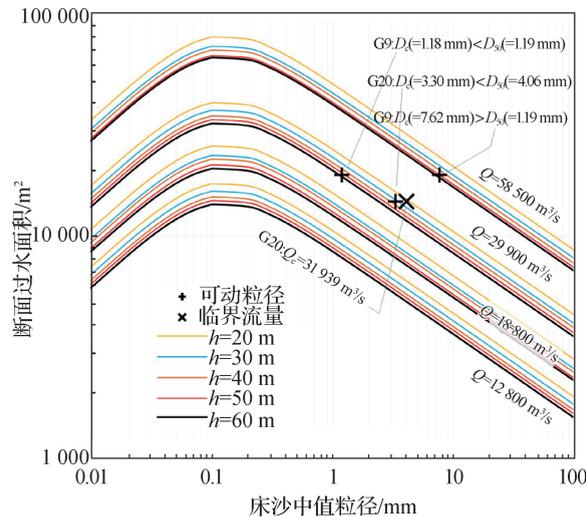


图11 两坝间河段床沙起动临界条件曲线图及应用示例

Fig. 11 Curves and application examples of incipient critical conditions of bed sediment in the reach between the two dams

G9断面特征流量 $58\,500 \text{ m}^3/\text{s}$ 下，一维数模计算断面面积和水深分别约为 $19\,800 \text{ m}^2$ 和 52.44 m 。在图11中通过纵坐标面积画一条横线，与相应流量的 52.44 m 线相交（此处以 50 m 线近似说明原理），交点横坐标 7.62 mm 即为该流量下的最大可动粒径 D_c ，远超2017年实测 $D_{50} = 1.19 \text{ mm}$ ，可见在该流量下，G9断面中值粒径泥沙将起动并发生冲刷。而 $29\,900 \text{ m}^3/\text{s}$ 对应 D_c 为 1.18 mm ，为临界状态。

G20断面2017年实测 $D_{50} = 4.06 \text{ mm}$ ，假定流量 $30\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ ，通过一维数模计算断面面积和水深分别约为 $14\,600 \text{ m}^2$ 和 31.34 m 。在图11中粒径与面积交点对应流量为 $31\,940 \text{ m}^3/\text{s}$ ，与假定值相近，可作为该断面 D_{50} 起动的临界流量 Q_c ，当实际流量超过 Q_c 时，G20断面将发生冲刷。图11中没有流量轴，交点对应流量可通过插值获取，也可对图11进行相应的变换。

需要说明：①不同流量计算的水深不一定为整数，该问题在电子表格中容易解决。②该方法依赖于地形和泥沙等基础资料，其中泥沙参数测验可能会有一定误差，不过仍可用该方法对冲刷可能性进行预测。

③ 根据各断面的基础资料,可计算各断面临界流量及每级流量下各断面的最大可动床沙中值粒径,对于河道管理和监测具有参考价值。④ 泥沙起动理论本身是针对较为理想的条件发展起来的,而上述分析过程中又进行了一定的简化,对于顺直河道具有更好的适用性,当河道走势和局部地形较复杂时,河床泥沙的冲刷可能性将高于上述方法的分析结果。因此,本文对于起动理论的应用可对河床冲刷趋势提供一种定性判断方法,为定量计算以及监测工作提供参考。

5 结 论

(1) 三峡和葛洲坝两枢纽实施使两坝间河段水沙关系明显改变。年径流量略减,年内流量过程发生“削峰填谷”重分配。年输沙量在葛洲坝时期明显减小,联合调度期骤降,宜昌站多年平均输沙量较天然时期减少93.04%,月均输沙率降低89%以上,空间上三站差别微小,主要原因是长江上游水库拦沙及两枢纽库区淤积。就该河段而言,三峡枢纽影响远超葛洲坝,泥沙变化则远超水流。

(2) 两坝间河段河床冲淤受极端水文条件和枢纽调度影响显著,前者会导致剧烈冲淤,但长期冲淤趋势受枢纽控制。葛洲坝时期和联合调度期分别呈累积淤积和累积冲刷,床沙在短时间内完成细化和粗化的调整。各时期内G6—G9、G20—G22都比其他河段更活跃,大断面依演变规律可分为原始稳定型、偏移稳定型和持续调整型,工作中应加强活跃子河段和持续调整型断面的监测。

(3) 基于沙玉清起动流速公式,绘制了两坝间河段床沙起动临界条件曲线图。针对某一断面地形和水位,可推算特定流量对应的最大可动床沙粒径,或特定粒径对应的起动临界流量,从而评估一定条件下的冲刷可能性,为定量计算和明确监测重点提供参考。

致谢: 长江水利委员会水文局许全喜教授级高级工程师对本文写作多有启发,特此感谢。

参考文献:

- [1] LI W J, YANG S F, XIAO Y, et al. Rate and distribution of sedimentation in the Three Gorges Reservoir, Upper Yangtze River [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2018, 144(8): 05018006.
- [2] 李文杰, 杨胜发, 付旭辉, 等. 三峡水库运行初期的泥沙淤积特点[J]. *水科学进展*, 2015, 26(5): 676-685. (LI W J, YANG S F, FU X H, et al. Sedimentation characteristics in the Three Gorges Reservoir during the initial operation stage[J]. *Advances in Water Science*, 2015, 26(5): 676-685. (in Chinese))
- [3] LI W J, WANG J, YANG S F, et al. Determining the existence of the fine sediment flocculation in the Three Gorges Reservoir [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2015, 141(2): 05014008.
- [4] 李文杰, 张凌越, 杨胜发, 等. 三峡库区泥沙絮凝临界条件现场测量[J]. *水科学进展*, 2019, 30(1): 76-83. (LI W J, ZHANG L Y, YANG S F, et al. Field measurements of the critical conditions of sediment flocculation in the Three Gorges Reservoir[J]. *Advances in Water Science*, 2019, 30(1): 76-83. (in Chinese))
- [5] 朱玲玲, 许全喜, 陈子寒. 新水沙条件下荆江河段强冲刷响应研究[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2018, 26(1): 85-97. (ZHU L L, XU Q X, CHEN Z H. Extraordinary scour of Jingjiang Reach Downstream from Three Gorges Project[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2018, 26(1): 85-97. (in Chinese))
- [6] ZHANG C, FUJIWARA M, PAWLUK M, et al. Changes in taxonomic and functional diversity of fish communities after catastrophic habitat alteration caused by construction of Three Gorges Dam[J]. *Ecology and Evolution*, 2020, 10(12): 5829-5839.
- [7] DAI Z J, LIU J T. Impacts of large dams on downstream fluvial sedimentation: an example of the Three Gorges Dam (TGD) on the Changjiang (Yangtze River)[J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 480: 10-18.
- [8] 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[J]. *泥沙研究*, 2011(2): 38-46. (XU Q X, YUAN J, WU W J, et al. Fluvial processes in Middle Yangtze River after impoundment of Three Gorges Project[J]. *Journal of Sediment Research*, 2011(2): 38-46. (in Chinese))
- [9] 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 Q

- X. 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))
- [10] 樊云, 成金海, 王远明, 等. 三峡工程动工以来葛洲坝水库河床演变分析[J]. *水文*, 2001, 21(1): 32-36. (FAN Y, CHENG J H, WANG Y M, et al. Analysis on river bed evolution of Gezhouba Reservoir since the starting of the Three Gorges Project[J]. *Hydrology*, 2001, 21(1): 32-36. (in Chinese))
- [11] 成金海, 牛兰花, 赵灵. 三峡工程施工期两坝间河道演变分析[J]. *长江工程职业技术学院学报*, 2000, 17(4): 11-14. (CHENG J H, NIU L H, ZHAO L. Analysis of riverbed change between the two dams during the construction of the Three Gorges Project[J]. *Journal of Changjiang Engineering Vocational College*, 2000, 17(4): 11-14. (in Chinese))
- [12] 刘洁, 杨胜发, 沈颖. 长江上游水沙变化对三峡水库泥沙淤积的影响[J]. *泥沙研究*, 2019, 44(6): 33-39. (LIU J, YANG S F, SHEN Y. Impact of runoff and sediment from the Upper Yangtze River on deposition in the Three Gorges Reservoir [J]. *Journal of Sediment Research*, 2019, 44(6): 33-39. (in Chinese))
- [13] 李海彬, 张小峰, 胡春宏, 等. 三峡入库沙量变化趋势及上游建库影响[J]. *水力发电学报*, 2011, 30(1): 94-100. (LI H B, ZHANG X F, HU C H, et al. Impact of cascade reservoirs construction in the Upper Yangtze River on sediment inflow to Three Gorges Reservoir[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2011, 30(1): 94-100. (in Chinese))
- [14] 张红武. 泥沙起动流速的统一公式[J]. *水利学报*, 2012, 43(12): 1387-1396. (ZHANG H W. A unified formula for incipient velocity of sediment[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2012, 43(12): 1387-1396. (in Chinese))

Variation in water and sediment conditions and erosion and deposition characteristics in the reach between Three Gorges Dam and Gezhou Dam*

SHI Changle, NIU Lanhua, ZHAO Guolong, DU Linxia

(*Hydrology and Water Resources Survey Branch for Three Gorges Project, Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission, Yichang 443000, China*)

Abstract: A correct understanding of the variation pattern of water and sediment conditions as well as erosion and deposition characteristics in the reach between Three Gorges Dam and Gezhou Dam is essential for studying the many engineering problems in the reach. In this study, abundant water-sediment topographic data were analyzed, and the application of the theory of sediment incipient motion in erosion prediction was discussed. Owing to reservoir construction in the upper reaches of the Yangtze River and the successive operation of the two major hubs, the annual runoff in the reach was slightly reduced, the monthly average runoff was redistributed by “peak load shifting,” the annual sediment discharge declined considerably, and the water-sediment relationship in the reach was significantly changed. The cumulative erosion and deposition quantity in the reach was under short- and long-term control by the extreme hydrological conditions and scheduling of the hubs. In terms of time, there were apparent phased characteristics; in terms of space, some sub-reaches were in an active state. The bed sediment was refined and coarsened successively with the operation of the hub. The incipient critical condition curve was drawn based on Sha’s incipient velocity equation, and the estimation of the maximum particle size of movable bed sediment or critical water flow of the cross-section provided a reference for predicting the possibility of riverbed erosion.

Key words: water-sediment relationship; erosion and deposition evolution; incipient velocity; erosion prediction; the reach between Three Gorges Dam and Gezhou Dam

* The study is financially supported by the National Key R&D Program of China (No. 2016YFC0402305).