

文章编号:1001-5485(2009)05-0005-04

水库下游不同约束条件分汊河道冲刷调整规律研究

何娟^{1,2}, 陈立², 关洪林¹

(1. 湖北省水利水电科学研究院, 武汉 430070; 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)

摘要:在研究分析水库下游河道冲刷侵蚀特点的基础上,分强约束型和弱约束型分汊河道,分别研究其冲刷调整的规律。研究表明:①水库下游河道冲刷侵蚀过程往往存在先刷深、后展宽的冲刷侵蚀特点,河岸河床组成对纵横向侵蚀幅度的影响非常显著。②强约束型分汊河道冲刷调整规律为洲滩形态的调整,沙泓、石泓的下切以及分流比的变化。③弱约束型分汊河道的冲刷调整规律为岸线的崩退,心滩、边滩的切割侵蚀,新的洲滩形成,以及主支汊交替频繁,主泓摆动剧烈,河道横向摆动大。在此基础上,总结分析了在冲刷调整过程中影响分汊河道演变的关键因素。

关键词:分汊河道;水库下游;冲刷调整;河岸河床抗冲性
中图分类号:TV147.5 **文献标识码:**A

在我国,分汊河段相当普遍,长江中下游干流、支流河道中普遍发育江心洲分汊河流。

水库的修建将改变影响下游河道演变的基本条件(来流过程、含沙量、泥沙级配),河道发生普遍冲刷、河势调整以及河床再造床过程。具体到分汊河段,现阶段对水库下游分汊河道演变规律的研究主要集中在一些具体河段的河势变化上,而对水库下游分汊河道冲刷调整规律以及主要制约性因素缺乏研究和总结^[1]。

本文以实测资料分析为主,在研究分析水库下游河道冲刷侵蚀特点的基础上,分强约束型和弱约束型分汊河道,分别研究其冲刷调整的规律,总结分析了在冲刷调整过程中影响分汊河道演变的关键因素,而对这些问题的回答对预测水库下游分汊河段河势与河型变化趋势,保持其河势的稳定,航道的畅通,整治工程的有效性等均有着重要的意义。

1 水库下游的冲刷侵蚀特点

河道冲刷侵蚀包括河底侵蚀(又称垂向刷深或者纵向侵蚀)和河岸侵蚀(横向展宽或横向侵蚀)^[2]。河底、河岸侵蚀可以分别从深泓纵剖面变化和河宽变化上得以反映。图1为汉江丹江口水库下游太平店河段深泓纵剖面变化图。可以看出,丹江口水库蓄水初期太平店河段深泓线纵剖面下降明显,而后深泓纵剖面下降减缓,近年来基本达到平衡。表1为水库蓄水以来太平店河段平均中水河宽变化表。可以看出,在丹江口水库蓄水初期太平店

河段河宽变化很小,而后明显增大。

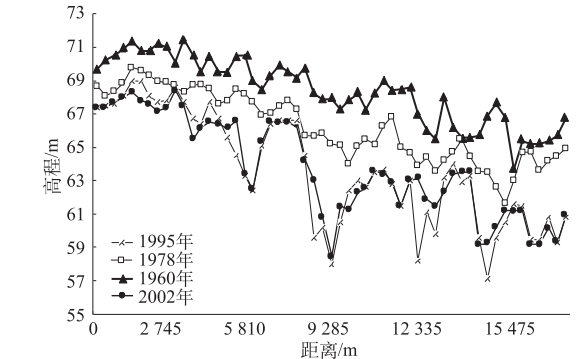


图1 太平店河段深泓纵剖面变化图
Fig. 1 Longitudinal talweg profiles of Taipingdian reach in different years

表1 太平店河段平均河宽变化表
Table 1 Water widths under the median water level in Taipingdian reach

年份	1960	1968	1978	1987	1995
河宽/m	676.0	619.0	890.0	906.7	909.7

由图1和表1可以看出,水库下游河道冲刷侵蚀过程中同时存在河底侵蚀和河岸侵蚀,但两者发展进程有所不同。水库下游河道冲刷侵蚀过程往往存在先刷深、后展宽的冲刷侵蚀特点,这与水流结构与泥沙输移特性紧密联系。水库下游下泄的水流整体处于不饱和状态,而由于水流流速横向分布的特征,即河道主槽内流速最大,水流含沙量与挟沙力之间的差异在主槽内最大,因此河道主槽的冲刷远远大于滩地,在水库蓄水初期河道以刷深为主。当河床冲刷到一定程度时,主槽内的河床表面形成了明显的抗冲保护层,河底抗冲性远大于岸滩抗冲性,河底侵蚀受到制约,水流转而冲刷侵蚀没有形成抗冲

保护层的岸滩。

河岸河床组成对纵横向侵蚀幅度的影响非常显著,即河岸河床相对抗冲性决定水库下游河道冲刷侵蚀的发展程度。河岸河床相对抗冲性较强的河段,冲刷侵蚀的主要特征是下切及深泓高程的下降,而由于河岸约束较强,横向展宽很小。如宜昌至虎牙滩河段断面形态窄深,河岸约束很强。葛洲坝蓄水以后河段总体上以冲为主,河床整体呈下切之势。三峡水库蓄水以后,河段发生冲刷,从 2003 年 3 月到 2005 年 3 月,深泓共冲刷下降了 1.158 m。河岸河床相对抗冲性较弱的河段,冲刷侵蚀除纵向下切外,横向展宽也相当剧烈。如太平店河段河岸约束很弱,1960—1987 年之间,河岸崩塌严重,崩岸长度达 2.0 km,最大崩岸宽度 800 m,年均 44 m。

2 水库下游分汊河段冲刷调整规律

水库下游分汊河道总的调整趋势同样是在冲刷过程中进行再调整。河岸河床的相对抗冲性成为河床形态冲刷调整的一个重要指标。如果河岸约束较强,则河床变形以下切为主,河槽宽深比有所减小,河道横断面趋于窄深,河道趋于稳定。如果河岸约束较弱,则河床变形以展宽为主,河槽宽深比有所增加,河道横断面趋于宽浅,河道趋于调整。

2.1 强约束型分汊河段特点及冲刷调整规律

2.1.1 平面形态特点

这类河段的平面形态一般表现为两端窄中间宽的“大肚子”型,窄端多有节点控制,放宽段有江心洲。河段河岸以及洲滩抗冲能力较好,河势稳定。三峡水库下游的宜都河段就属于此类分汊河段。

2.1.2 强约束型分汊河段冲刷调整规律

由于这类河段的河床岸坡抗冲能力较强,加之有节点控制,水库蓄水后河段的平面形态和河势比较稳定。水库蓄水后河道的冲刷主要体现为洲滩形态的冲刷调整,深泓线趋弯和沙泓、石泓的冲刷下切,以及分流比的变化。

(1) 洲滩形态的冲刷调整。蓄水以后由于河段冲刷加剧,边滩必然表现为受冲,岸线后退,江心洲表现为面积缩小。例如在三峡水库蓄水后,宜都河段沙坝湾边滩受冲后退,南阳碛一直缩小。

蓄水后,下泄水流含沙量急剧减小,水流挟沙能力增大。而强约束型分汊河段,随着流量大小的不同,年内水流动力轴线在汉道内特别是分流段有个横向扫略的过程,蓄水后河段内洲滩的冲刷程度和部位除了与各洲滩河岸的抗冲性有关外,与不同流

量下主流所处的位置密切相关。如宜都河段三峡水库蓄水以后的 2 个中水年,由于水流动力轴线在中水流量下位于江心洲右侧的石泓一边,南阳碛洲体左缘淤积,右缘冲刷。

(2) 深泓线的调整和沙泓、石泓的变化蓄水后河岸约束强的分汊河段的河势调整还表现为河槽的冲刷调整,即深泓线趋弯和沙泓、石泓的冲刷下切。

表 2 则统计了宜都水道的弯道中心角、河弯曲度半径、主流线中心角和主流线曲度半径 4 个深泓平面变化数据。从表中可以看出,三峡蓄水后深泓线走向变得更加弯曲。

表 2 宜都水道深泓线平面变化统计表

Table 2 Talweg variation in Yidu reach

观测时间	弯道中心角/(°)	河弯曲度半径/m	主流线中心角/(°)	主流线曲度半径/m
2003—03	95.3	2 200	73	910
2003—10	95.3	2 200	70	870
2004—02	95.3	2 200	66	830
2004—10	95.3	2 200	65	810

表 3 给出了三峡蓄水前后宜都河段沙泓、石泓平均高程统计值和变化情况。从表中可以看出,水库蓄水初期,河段沙泓、石泓均发生了冲刷,但是冲刷进程不一致,石泓冲刷下切幅度较沙泓大些。沙泓、石泓冲刷进程不一致,导致沙泓、石泓两汉高程差的减小,进一步改变了两汉的分流比。

表 3 三峡蓄水前后宜都河段沙泓、石泓平均高程统计表

Table 3 Elevations of talwegs of sand channel and gravel channel in Yidu reach before and after the impoundment of TGP

观测时间	沙泓			石泓		
	平均高程/m	变化值	累计变化值	平均高程/m	变化值	累计变化值
2003—03	27.44			29.94		
2004—02	26.59	−0.85	−0.85	29.69	−0.25	−0.25
2004—10	26.47	−0.12	−0.97	29.65	−0.04	−0.29
2005—04	26.29	−0.18	−1.15	29.23	−0.42	−0.71

(3) 分流比的变化。分流分沙比直接影响各汉道的兴衰。发展中的汉道其分流比有逐年单向增加的特点,衰退中的汉道其分流比则逐年减小。如果分流比变化不大,则汉道本身和各支汊之间关系保持相对稳定。水库蓄水后,汉道洲滩以及沙泓、石泓的调整与变化必然引起两汉分流比的变化,表 4 给出了水库蓄水后宜都河段分流比的变化。

表 4 三峡蓄水前后宜都河段沙泓、石泓分流比变化

Table 4 Diversion ratios in Yidu reach

before and after the storage of TGP

观测时间	断面总流量/(m ³ ·s ^{−1})	沙泓分流比/%	石泓分流比/%
2003—03	3 814	76.4	23.6
2004—02	4 292	75.9	24.1
2005—04	9 689	74.6	25.4

可以看出,三峡水库蓄水后宜都河段沙泓分流

比有减小的趋势,而石泓分流比有增加的趋势。

2.2 弱约束型分汊河段特点及冲刷调整规律

2.2.1 河段平面形态特点

这类河段河宽较大,节点少,约束弱;分布其中的心滩、边滩等相对零散,高程相对较低,滩槽高差相对较小,水流分散;河岸以及洲滩抗冲能力较差。汉江丹江口水库下游的仙人渡及太平店河段就属于这类河段。

2.2.2 弱约束型分汊河段冲刷调整规律

由于这类河段的河床岸坡抗冲能力弱,节点少,加之滩槽高差相对较小。水库蓄水后,当河道冲刷下切,河床粗化到一定程度时,河道的冲刷主要体现为岸线的崩退、横断面的展宽以及局部的撇弯切滩。随着河道的展宽,水流分散,水流动力降低,水流所挟带的沿程恢复的悬移质推移质泥沙有可能在河段的某些部位落淤,进而形成新的洲滩。因此,水库蓄水后这类河段平面形态的调整非常剧烈,分流格局也很不稳定。

(1) 岸线的崩退。仙人渡河段在 1960 - 1978 年间,平均展宽 340 m;1978 - 1995 年,平均展宽 118 m;1995 - 2002 年平均展宽 23.3 m。可见,丹江口水库蓄水运用 40 年间,该河段岸线不断崩退,到近年才基本稳定。

(2) 心滩、边滩的切割侵蚀。心滩、边滩高程较低时,容易受到洪水期水流的侵蚀作用。建库前,由于洪峰水流挟带大量的泥沙,这种侵蚀作用被制约,建库后,洪峰时的来沙量大大减少,此时,边滩容易被切割。如仙人渡河段,在 1968 年丹江口水库蓄水后就发生了切滩撇弯。

(3) 新的洲滩的形成。由于河床的剧烈冲刷,被冲刷的泥沙向下游输移的过程中,进入宽浅分汊段以后,由于水流分散,水流动力降低,部分推移质泥沙将会停止推移而淤积下来。当淤积的泥沙形成新的洲滩时,将形成新的汉道,改变河段的分汊格局。如 1960 年太平店河段中段仅有 2 个不算很大的洲滩及若干个很小的滩,分汊特征不明显。到 1978 年河段发展为分汊型河段,分为两汉,右汉发展为主汉,与此同时右岸不断崩退,河道迅速发展,除了原有江心洲淤积发育外,并且在右汉中又淤成新的江心洲,形成两洲三汉的新格局,深泓线走中汉。

(4) 主支汉交替。淤积在宽浅分汊河段的泥沙,除了可以在河槽中间形成新的洲滩,形成新的分汊外,当其淤积部位影响到原汉道的进流条件时,还可以改变汉道的分流特性,使主支汉发生相应的调整。推移质通常沿主流带输移,如果分汊段的主汉位于输

移带以内,则非常容易淤积,从而导致主汉的一定程度衰减,甚至发生主支汉交替,从而改变河道的分汊格局。例如仙人渡河段,1960 年以前,主泓在左岸,右岸为一大边滩;1968 年,右岸的大边滩被切割,发生撇弯切滩,形成江心洲,主泓改右岸,左汉逐渐衰亡;到 1978 年时,右汉又分为两支,分别为中汉和右汉,这种变化与主汉淤积有很大关系。

(5) 主泓摆动剧烈,汉道横向摆动大。如图 2 所示,1987 年以前仙人渡滩群深泓线摆动频繁,由于切滩撇弯所至最大摆幅曾达到 1 320 m,1987 - 1995 年由于主泓易汉,最大摆幅达 1 770 m。水库蓄水后,两河段主泓的横向摆动非常大,横向摆动将导致汉道水力几何要素的变化,如汉道长度、汉道过水面积、比降的变化,从而改变汉道的分流分沙特性。

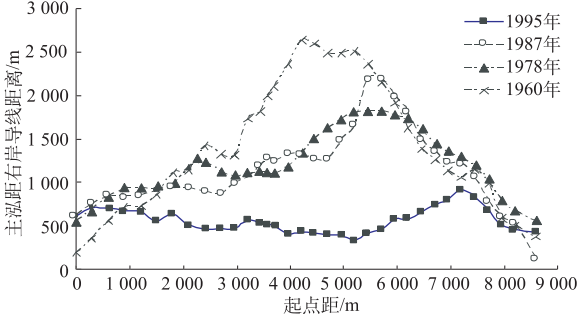


图 2 仙人渡河段深泓线位置摆动
Fig.2 Talweg variation in Xianrendu reach

3 水库下游分汊河道冲刷调整的关键因素

3.1 河岸河床相对抗冲性为水库下游分汊河段河床调整的重要指标

水库蓄水后,水沙条件变化,导致了下游河道河床的剧烈调整,下游河岸河床的相对抗冲性成为下游河床形态调整的一个重要指标。如果河岸约束较强,则河床变形以下切为主,河槽宽深比有所减小,河道横断面趋于窄深,河道趋于稳定;其分流格局变化不大,其演变趋势表现在河道内洲滩深槽的冲刷,深泓的弯曲和分流分沙比的变化。如果河岸约束较弱,则河床变形以展宽为主,河槽宽深比有所增加,河道横断面趋于宽浅,河道趋于调整;其分流格局变化剧烈,其演变趋势表现为岸线的崩退,主泓剧烈的横向摆动,洲滩的切割和新洲滩的生成。

3.2 水流弯曲和展宽均为水库下游河床自调整的方式

水库蓄水后,宜都深泓走向变得更加弯曲,而在仙人渡和太平店河段,河床调整主要表现在横向展宽。水沙条件变化下,河床调整表现为不同的形式,

但按照最小能耗率理论的观点,其实质均为将其内部单位时间的势能损失减到最小。

最小能耗率理论^[3]通常可表述为:当一个系统的能耗率处于最小值时,它处于平衡状态,这个最小值的取得由系统所受的约束决定;当一个系统不处于平衡状态时,它的能耗率不为最小值,但是,系统会通过自动调整使其能耗率达到最小状态而获得平衡。水沙条件变化下,下游河流处于不平衡状态,其能耗率不为最小值。采取水流弯曲的方式减小比降是降低其能耗率(VJ)的最有效途径。如果河岸约束较弱的条件下,河道的横向展宽降低流速也是降低其能耗率的一种方式。

3.3 水流动力轴线摆动在分汊河道河床调整中起关键作用

水流动力轴线的摆动对河床演变的影响可以分成 2 种情况。一是分汊河段本身的水流特性决定其周期性的摆动,如宜都河段;这类河段,水沙条件变化下,水流动力轴线的摆动将引起分汊河段分流的变化,从而可能导致主支汊的交替。二是水沙条件变化下,分汊河段河床自动调整导致水流动力轴线的摆动,如仙人渡和太平店河段;这种情况往往伴随着边滩心滩的切割和新汊道的产生,这同样也会引起汊道的交替。

4 结 论

(1) 水库下游河道冲刷侵蚀过程中同时存在河

底侵蚀和河岸侵蚀,但两者发展进程有所不同。侵蚀过程往往存在先刷深、后展宽的冲刷侵蚀特点。河岸河床组成对纵横向侵蚀幅度的影响非常显著,即河岸河床相对抗冲性决定水库下游河道冲刷侵蚀的发展程度。

(2) 水库下游强约束型分汊河道的冲刷调整规律为洲滩形态的冲刷调整,深泓线趋弯,沙泓、石泓的冲刷下切且下切进程不一致;分流格局变化不大,主要表现在分流比的变化上。

(3) 水库下游弱约束型分汊河道的冲刷调整规律为岸线的崩退,心滩、边滩的切割侵蚀,新的洲滩的形成;分流格局变化大,主要表现在主支汊交替频繁,主泓摆动剧烈,汊道横向摆动大。

(4) 河岸河床相对抗冲性为水库下游分汊河段河床调整的重要指标。水流弯曲和展宽均为水库下游河床自调整的方式。水流动力轴线摆动在分汊河道河床调整中起关键作用。

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] 钱 宁,万兆惠. 泥沙运动力学[M]. 北京:科学出版社,1987.
[3] 倪晋仁,马葛乃. 河流动力地貌学[M]. 北京:北京大学出版社,1998.

(编辑:赵卫兵)

Research on Erosion Adjustment Law of Braided Reach in Downstream Reservoir in Different Constraint Conditions

HE Juan^{1,2}, CHEN Li², GUAN Hong-lin¹

(1. Hubei Water Resource Research Institute, Wuhan 430070, China; 2. State key laboratory of Water Resource and Hydropower Engineering Science, Wuhan University 430072, China)

Abstract: On the basis of the erosion characteristic, the erosion adjustment law of braided reach in the downstream reservoir under strong and week constraint conditions is analyzed. The study results indicate as follows: ①The feature of channel scouring course is to degrade first and then widen, the influence of river-bed composition on the magnitude of erosion in longitudinal and transverse directions is very distinct. ②The erosion adjustment process of the strong constraint braided channel shows the river-bed morphology variation, the cut-down of sand channel and gravel channel and change of division ratio. ③The erosion adjustment process of weak constraint braided channel presents as the collapse of shoreline, erosion and cutting of beach, alternating of the main and secondary branches and largely horizontal oscillation of the main channel. And the key factors which influence the erosion adjustment of braided reach are also concluded.

Key words: braided reach; reservoir downstream; erosion adjustment; river-bank and riverbed anti-scour ability