

不同自然条件下水库下游的河床演变*

龚 国 元

(中国科学院地理研究所)

水库一般有三种不同的运用方式,即滞洪式、非汛期泄空式和蓄水式。同一水库在不同时期其运用方式还可能有所不同。前两种方式主要是为了防洪,而河道仍然保持着天然河流的特点,不会发生河型上的转化;后一种运用方式,一方面改变了上游来水来沙的自然过程,另一方面又受下游区域自然条件的影响,促使下游河道发生巨大的变化,河型上产生转化。近年来为了探索不同自然条件对库下游河床演变的影响,我们对汉江、老哈河水库下游河道进行了实地考察,分析了其它库下游河道的有关资料。

一、水库下游区域自然条件

河流是自然环境各要素(地质、地貌、气候、土壤、植被等)长期相互作用的产物。一旦河流受到人类活动的影响,这些自然条件将起什么作用,这是在研究河道演变中必须弄清的问题。下面就一些水库下游区域自然条件列表(表1),并加以概述。

1. 地质基础与河势的发展

国内外大凡兴修水库都要充分考虑坝址的选择。选坝时,一方面要考虑到发挥水库的最大库容量;另一方面又要想到建坝时的经济支付。因此,大坝的最佳选择方案往往都位于河流的上游与中游之间峡谷出口段上。这样的地理布局,必然导致坝下游河段在调整后比较稳定的水沙条件下,河床的演变受原始地面、岩性以及结构的影响更为突出。例如丹江口水库上游河谷位于大巴山隆起地带,库下游位于丹江断凹、江汉拗陷下沉区;老哈河红山水库上下游河谷受大兴安岭新华夏构造带与东西向构造带的截接带及西辽河沉降构造带的控制。由于受地质构造的影响,库下游河道往往不完全具有冲积平原河流的形态特征。

库下游河谷一般多由沉积岩和松散沉积物组成。河岸土质多有二元结构。上层多为细粒物质,下层则多由砂砾石或沉积岩组成;河底表层多为砂层复盖,底部则为砂卵石层。砂层愈向下

表1 水库下游河道区域自然条件简表

Table 1 The natural environments within the areas surrounding rivers downstream from reservoirs

河名	库名	地貌单元	河床物质	植被	气候区	大支流
汉江	丹江口水库	山前丘陵平原冲积平原	卵石夹砂中细砂	较好	亚热带湿润区	唐白河
老哈河	红山水库	沙漠丘陵平原	中细砂	差	温带半干旱区	无
永定河	官厅水库	山前冲积扇平原	卵石夹砂中细砂	较差	暖温带半湿润区	无
黄河	三门峡水库	山前冲积扇平原	卵石夹砂中细砂	一般	暖温带半湿润区	伊洛河

* 参加野外工作的还有许炳心同志。

游分布愈厚,砂卵石层则埋藏得愈深。这样的物质组成及由它们形成的原始河床比降往往对下泄清水后的河床抗冲层的形成、比降的调整以及河床的形态变化等产生直接的影响。

2. 河谷的地貌条件

初始的河谷地貌条件会直接影响建库后下游河床地貌的再造过程。建库前水流一出峡谷便进入山前丘陵平原或山前冲积扇,谷地骤然拓宽,河谷比降变缓,泥沙大量堆积,现代河道在这样的谷槽中迁徙,多形成游荡性河道,河中洲滩密布或基岩出露,河道两岸多不对称,两岸发育了二级或三级阶地,红山水库下游河道在风沙地貌的影响下,堆积大量细粉砂,常造成河道堵塞,迫使河流改道,造成建库后河型发生转化的困难。

3. 大支流的汇入

库下游河道演变受大支流汇入的影响是不一样的。在没有大支流汇入的条件下,库下游河道演变主要是上游来水来沙特性的影响,河道演变的规律较清楚。但是,一旦有大支流的汇入,这种演变将变得复杂化。特别是当支流携带来的泥沙不能完全被水流带走时,库下游河道的重建平衡难于实现,这时河道往往不是被冲刷,而是淤积。例如,丹江口水库下游有唐白河汇入,携带来大量的粗颗粒泥沙,堆积在唐白河汇入处的上下游河段,尽管清水冲刷了20年,但河床不是冲而是淤,河道仍保持游荡河流的特点。相反,如果支流带来的泥沙少而细,支流随着干流的冲刷,侵蚀基准面降低,而出现回春现象(如黄河伊洛、沁河的汇合)。

其它的自然条件,如植被的复盖程度、土壤的疏松程度、区域性产沙等,都会给河流的再造过程带来一定程度的影响。

二、建库后上游来水来沙特性的变化

水库的兴建大大改变了天然河流的来水来沙过程,促使进入库下游河道的水沙条件发生变化,其变化主要反映在:

1. 流量

① 大大改变了进入下游河道的流量过程及年内径流量的分配,降低了下游断面过水能力。建库前这些河流在季风气候的影响之下,年径流量分配不均,汛期水量可占全年的二分之一或三分之二,枯期则不到十分之一,甚至于有些河流断流。建库后汛期的水量一般只占全年的三分之一,而枯期的流量成倍增加,使年内径流量的分配趋于均匀化;②洪峰削减削平,频率得以调整。原来尖而陡、持续时间短的洪峰,变成持续时间长的中水量。例如,汉江建库后全年大多数时间流量稳定在1000~1500立米/秒;老哈河流量也多稳定在33~35立米/秒;③由于水库的调节,改变了水文年度分配,使丰水、枯水和平水年给河道带来的差异性影响大大减少。

2. 沙量

① 由于大量的泥沙被拦截在库区,进入下游的水流基本上已是清水。如汉江建库前黄家港站多年平均含沙量为1.33公斤/立米,建库后只有0.025公斤/立米;老哈河建库前是一条著称的多沙河流,多年平均含沙量为54公斤/立米¹⁾,比永定河、黄河含沙

1) 辽宁红山水库管理局实验站,红山水库下游河床演变分析报告,辽宁水利科技,1973。

量都大（永定河官厅站 $\rho = 49.2$ 公斤/立米；黄河陕县站 $\rho = 36.6$ 公斤/立米），建库后 95% 的泥沙都被拦在库内；永定河建库六年，下游的沙量只占建库前的 5.3%^[1]；②水库排出的一小部分泥沙也多为冲泻质。例如从丹江口水库出来的泥沙， $d_{50} = 0.006$ 毫米，对下游河道不起造床作用。

三、水库下游河床演变的特点

河床是水流、泥沙和边界条件相互作用的产物。上游来水来沙因水库兴建而发生变化，河床为了适应新的水沙条件，必然要重新调整，力图达到新的平衡。一般情况下，库下游河床的演变遵循着冲刷侵蚀、河床质发生粗化、形成抗冲层，河床向着稳定单一化方向发展。但是，由于所处的区域自然环境不同，使各库下游河床发生着不同的变化。下面就演变中的几个主要问题加以阐述。

1. 库下游河床冲刷的长度与强度

钱宁先生认为，冲刷所及的范围往往可以达到很大的距离，而且随着上段泥沙补给的减少，冲刷河段还将不断向下游延伸^[2]。我们在研究中发现，河床冲刷影响的范围，一方面取决于清水流量的大小和冲刷历时的长短；另一方面则取决于侵蚀基面距坝的远近，而这个侵蚀基面可能是局部的岩坎、水盆，也可能是最终的基准面。在这一点上是与天然河流一致的，所不同的只是这种侵蚀方式是由上向下延伸。如丹江口建库以来，河床冲刷的范围从上向下游逐渐延伸，初期冲刷影响的距离因受唐白河汇入所造成临时性基面的作用，冲刷的范围在襄樊河段以上。随着冲刷历时的增加，干流主汊分流比的增加，水流侵蚀能力加大，唐白河形成的局部基面不足以控制冲刷的发展，下游冲刷影响范围向下延伸，直至汇入长江干流。三门峡水库在蓄水运用时期，当下泄流量超过 2500 秒立米时，冲刷的范围可达最终侵蚀基面。红山水库下游冲刷的范围，受控于河床基岩出露形成的地方侵蚀基面和苏家堡水利枢纽站受水盆。

冲刷的强度，水利界做了大量研究工作，获得不少计算公式，但是，有些公式建立在假定河床是均质的、没有抗冲层的边界条件和矩形断面的基础上。可是，库下游河床物质并非完全如此，它们在物质组成上，均质的少，而非均质的多。在清水冲刷下易形成抗冲层。在断面的形态上，库下游河床往往因受地理布局的影响，分汊性和游荡性河流多，因而复式断面形态也就多。另外，基岩的出露、支流带来的泥沙、河岸的崩塌堆积等都会影响到冲刷的强度。如果对这些因素不能全面考虑，最终计算结果必然与实际不符。如美国密苏里河上兴建了兰得耳堡坝，原计算坝下游河床因冲刷可下降 5 米，但经 10 年的观测，河床仅仅下降 3 米。这是因为计算时未考虑到河床 3 米深处大于 0.5 毫米的泥沙组成的抗冲层，阻止了河床下切^[3]。丹江口库下游 20 多公里的河段，在建库后的前八年河床下降了 1 米多，随抗冲层的形成，下切冲刷基本停止。红山水库下游 50 公里内，建库八年河床普遍下降 2 米。由于 50 公里附近出现了基岩露头，大大削弱了河流冲刷强度，在同样的八年里，下游河段仅下降 0.31 米。

2. 纵向变化特点

河道的纵向冲淤变化主要是使挟沙能力与大量减少的泥沙量相适应，以降低能量的

消耗。因此,它们往往力图通过比降的调平来重建平衡。但水、沙能否相适应,比降能否调平,这直接与原始河床物质组成、粗化过程、冲淤变化速率以及冲淤形式等有关。在所研究的几条库下游河流中,建库前均为堆积性河流,河床纵向变化极不稳定,一般稳定系数($f=d/I$)都小于或接近1.0,属游荡性河流。建库后,河床在纵向上发生了实质性的变化,冲刷代替了堆积。丹江口水库下游黄家港—皇庄段,在1960~1978年间,除个别年份回淤和冲淤平衡外,其它年份河床纵向都是冲刷,河床稳定系数一般能达到1.8~2.0左右。根据库下游河道纵向调整前后的形态及河床物质组成,库下游河道纵向变化可分为两类。

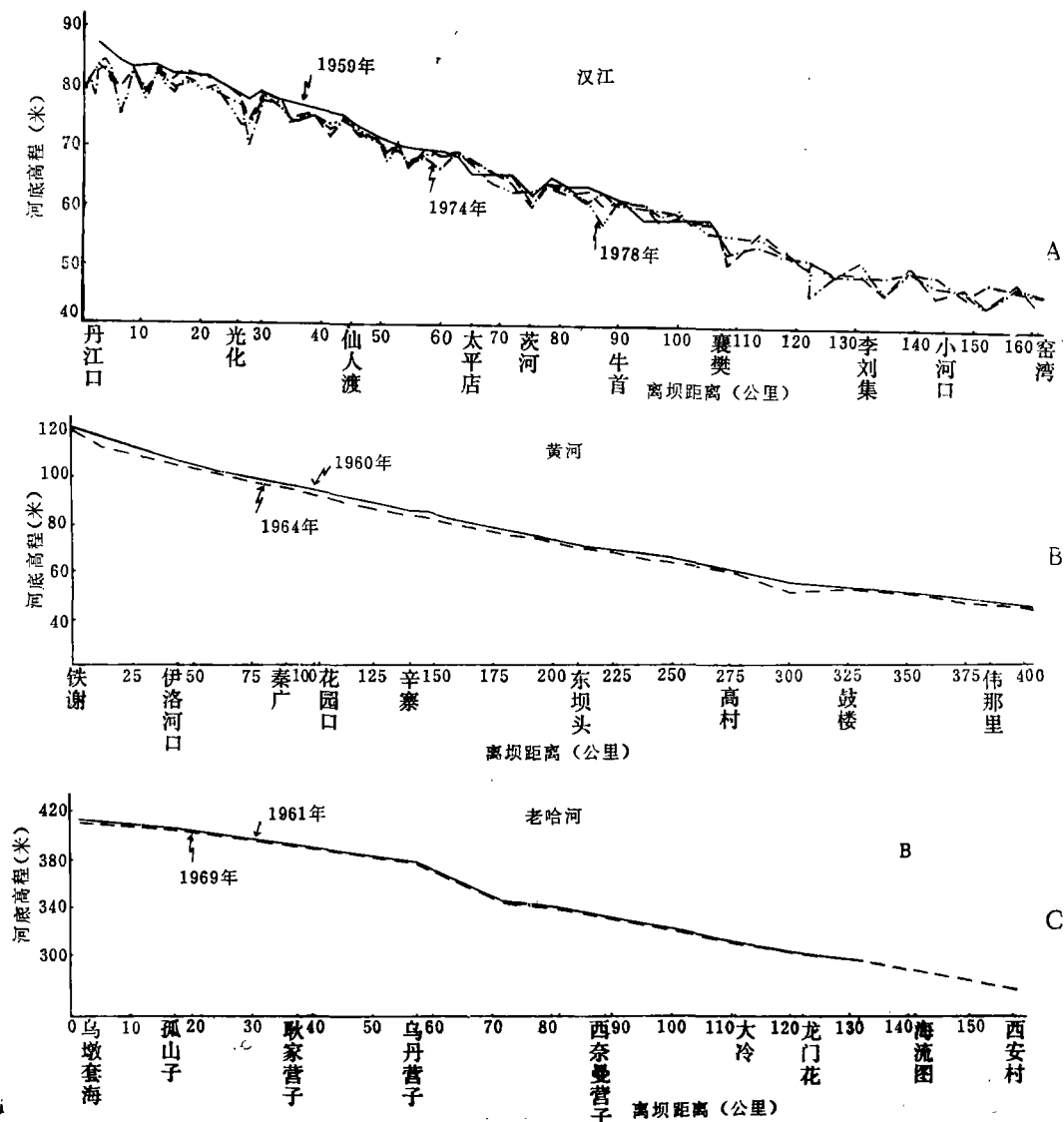


图1 汉江、老哈河、黄河水库下游河床纵剖面(A、B、C)

Fig. 1 The longitudinal profiles of channels downstream from Han Jiang, Lao Ha He and the Yellow River

(1) 河床物质组成沿程变幅大, 即由卵石夹砂到以细砂为主的河流, 如汉江、永定河。这类河床纵比降的调整主要是通过河床质的粗化、抗冲层的形成来进行。在粗化抗冲层未形成以前, 纵向冲刷速率快, 水流挟带的泥沙多, 比降调整得快。一旦抗冲层形成, 水流冲刷受阻, 河床比降调整减缓, 这时, 比降还有加陡的趋势。在形态上, 深槽、浅滩起伏加大, 其位置比较固定(图 1 A)。在河岸可动性小的河段上, 河床的冲刷主要通过深槽的扩大来反映。在整个纵剖面形态上, 则多为直线形或上凹形。在其它因素的影响下, 如岩坎、多沙支流的汇入等, 都会使原始的纵剖面形态发生变化。

(2) 河床物质组成是由较均质的中、细砂组成, 如老哈河、黄河。河床比降的调整主要是通过床面形态的改变, 使其河床糙率加大来进行的。但是, 在经过水库调节流量频率相等的条件下, 沿程河床糙率很少变化, 深槽、浅滩起伏不明显, 反映在纵剖面上, 基本上是等量平行下切(图 1 B、C)。

根据三门峡水库下游伊洛河口——高村河段, 长 230 多公里; 红山水库下游乌墩套海—乌丹营子河段, 长约 60 公里, 不同时期河底高与离坝距离的计算:

黄河: 伊洛河口—高村河段 1960 年 $H = 370.3L^{-0.308}$ ($r = -0.97$)

1964 年 $H = 365.4L^{-0.307}$ ($r = -0.97$)

老哈河: 乌墩套海—乌丹营子河段 1960 年 $H = 422.6L^{-0.0198}$ ($r = -0.79$)

1969 年 $H = 421.3L^{-0.0191}$ ($r = -0.79$)

式中, H —河底高程(米); L —离坝距离(公里)(黄河式中 L 系指距铁谢的里程); r —相关系数。

根据以上资料分析, ①清水下泄河底高程有明显的下降, 一般下切 1.0~1.5 米。在算式中系数的变化也说明这一点; ②初始河床比降与清水下泄冲刷以后的比降比变幅不大, 反映在算式中是指数变化不大。根据齐璞对三门峡水库下游四年的冲刷计算, 铁谢—辛寨河段的比降仅减少了 0.12%, 冲刷前后比降相对值 (J/J_0) 的年平均变化只达 1.15%, 1964 年因流量大, 上下河段均发生强烈冲刷, 比降变化很少¹⁾。

反映在纵向冲淤变幅和冲淤形式上的主要特点是: ①“泥沙淤积, 冲刷基本上是等量变化的。泥沙沿程补给差别不大; ②深泓线沿程起伏小, 床面比较平坦。

从这类河床纵向变化分析可知, 在两条不同流量、不同比降的库下游河道中, 由于河床组成物质相似(表 2), 在纵向变化上反映出一个共同特点, 呈纵向平行下切的形式。

表 2 河床比降 (J) 与床沙中径 (d_{50}) 统计表

Table 2 The gradient of the channel and medium size of bed material

黄河 (伊洛河口—高村段)				老哈河 (乌墩套海—乌丹营子段)			
河 段	1964 年			河 段	1969 年		
	J	$d_{50}(\text{mm})$			J	$d_{50}(\text{mm})$	
伊洛河口—秦 厂	0.00021	0.26		乌墩套海—玉 田 泉	0.000343	0.16	
秦 厂—辛 寨	0.000205	0.17		玉 田 泉—孤 山 子	0.00039	0.17	
辛 寨—东坝头	0.000205	0.19		孤 山 子—三 岔 美	0.000347	0.26	
东 坝 头—高 村	0.000185	0.19		三 岔 美—耿家营子	0.000694	0.26	
				耿家营子—乌丹营子	0.000732	0.21	

1) 齐璞, 三门峡水库下泄清水时黄河下游花园口河段河床调整, 1978 年。

3. 横向变化特点

水库兴建后,下游河道是以深蚀为主,还是侧蚀为主,这是一个长期争论的问题。从所分析的资料来看,在清水下泄变幅不大的情况下,河床横向上的变化主要还是取决于河底与河岸之间的相对可动性。它们之间有三种关系:①河底与河岸相对可动性均较小;②河底可动性大于河岸可动性;③河底与河岸可动性相差不大,它们均由抗冲性相似的松散沉积物所组成。

第一种情况多见于近库段。由于地质地貌条件的限制,河床不易展宽,以深蚀为主,深泓加深,深槽扩大,河床断面形态多为窄深型;第二种情况多见于卵石夹砂的非均质河段上。建库初期以深蚀为主,一旦粗化抗冲层形成,河底抗冲性增大,河岸抗冲性相对变小,深蚀削弱,侧蚀加强,河床拓宽,其断面形态宽浅;第三种情况多见于均质的河段上。由于河底、河岸物质组成上差异性小,它们所需的起动水流条件变化不大,建库后深蚀与侧蚀作用将同时进行,河床断面形态宽深比变化不大。

丹江口、红山、三门峡水库下游,建库前按横向稳定系数 $A = BJ^{0.2}/Q^{0.5}$ (B —造床流量下的河宽; Q —造床流量; J —相应于上述条件的比降) 的计算,其 A 值都大于 1.7,属宽浅不稳的游荡性河道。建库后丹江口库下游丹江口—光化河段横向上的变化,基本上属第一种情况,河床两岸主要由基岩和卵石边滩组成,河底为卵石夹砂,清水下泄深蚀为主,宽深比有减小的趋势(1967年 $\sqrt{B}/H=12.13$; 1978年 $\sqrt{B}/H=11.52$)

(图2)。黄河三门峡水库下游铁桥以上近库河段,1964年河宽比1960年减少45.5%,河底高程下降1.5~2.0米。属于第二类的是光化—襄樊河段, $\sqrt{B}/H$ 比在有些断面上有增加的趋势(如牛首—襄樊段1967年 $\sqrt{B}/H=16.63$; 1974年 $\sqrt{B}/H=17.54$)(图3)。属第三类的有红山和三门峡水库下游的一些河段。红山水库下游在水流和风沙的作用

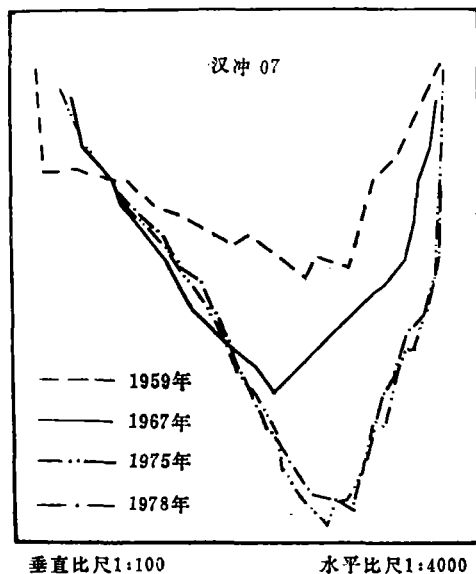


图2 窄深横断面

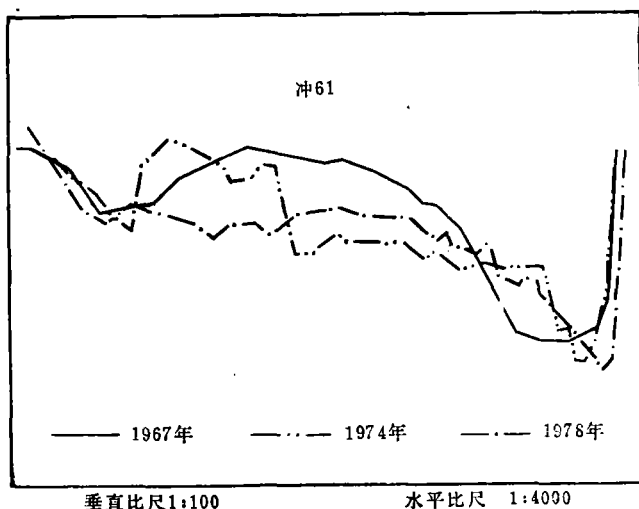


图3 宽浅横断面

Fig. 2 Narrow and deep cross-section Fig. 3 Wide and shallow cross-section

下,河床、河岸均由0.025~0.50毫米的中细砂组成,清水下泄后河床断面形态变化不大,宽深比值变化不大(图4)。三门峡库下游辛寨—夹河滩河段在同流量下,其宽深比值1960年为32.92,1964年为33.01,变幅不大¹⁾。

横向上的变化与河床物质组成中粘粒的含量有密切关系。如以 M 值(即河岸物质中粉砂粘土小于0.0074毫米所占的%含量)为指标,丹江口库下游襄樊以上24个断面上的土样分析,8个以展宽为主的断面中有7个断面 M 值均小于13,而在16个以下切为主的断面中,其中有15个断面 M 值大于13。除此之外,横向变化还与物质的结构、岸槽的高差、水流的状态等因素有关。

4. 平面变化特点

河床的平面变形主要取决于水沙条件与河床边界条件。前者是塑造河床的作用力,后者是影响水流的阻力。建库后,上游来水来沙比较稳定,流向、流路变幅减小。这样,促使原来河身宽浅,心滩繁多、水流散乱、流路不定、外形多变的游荡性河流发生比较大的变化。稳定而清沏的水流促使水流归槽、河槽刷深、动力轴线弯曲;支汉淤塞、多汉变单汉、复式河槽变为单一性河槽;小滩并成大滩、大滩变成边滩、边滩变高滩;岸槽高差加大,整个河床平面形态向稳定单一性方向发展。如丹江口水库下游丹江口—牛首90多公里长的河段上,除个别河段分汉外,整个河段基本上变成单一弯曲性河道,弯曲系数原为1.27,到1978年则达1.44。红山水库下游,虽然整个河道仍然保持着游荡河流的特性,但下游河道主泓带变得稳定而弯曲(图5),弯曲系数1961年为1.53,到1969年则达2.8左右。

四、河型转化问题

库下游河型转化是一个非常重要的问题,国内外水利界做了大量的工作,获得一定的结果。但建库后下游河道是否发生转化和向什么方向转化,是一个非常复杂的问题,因为它是自然界各因素以及人类活动综合影响的结果。笔者根据Б.Φ.施里申柯提出的判别河型划分与转化的标志^[4],即河谷比降(I_0)与河床比降(I)之比(I_0/I)、滩宽(B_n)与河宽(B)之比(B_n/B),以及弯曲半径(r)与弯曲系数(R)之比(r/R),分析了汉江建库后上述比值的变化(表3,图6、7)。 I_0/I 和 B_n/B 建库后均有增加的趋势; r/R 则有减少的趋势。但是牛首—襄樊段因支流带来的泥沙大量堆积,使 r/R 有所增加,说明本河段顺直游荡特性仍很强,其它河段河型均有向单一弯曲方向发展的趋势。

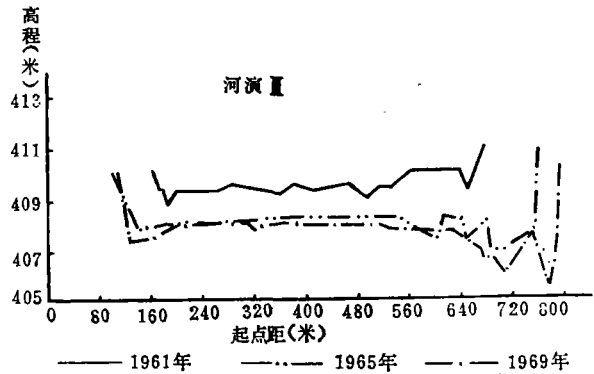


图4 相似横断面

Fig. 4 Cross-section similar to the original

1) 中国科学院地理研究所地貌室, 黄河下游横断面的调整, 1980。

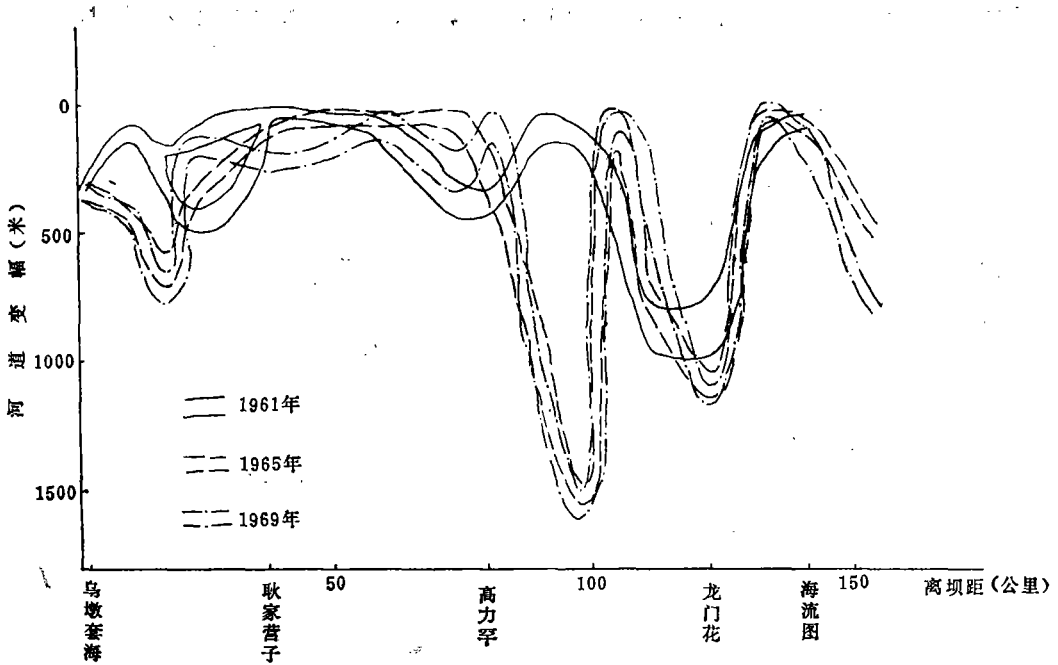


图5 老哈河红山水库下游主泓带分布图

Fig. 6 The pattern of the thread of channel in Lao Ha He downstream from Hong Shan Reservoir

表3 不同时期汉江各河段 r 与 R 之比

Talbe3 Ratio of r to R in individual reaches of Han Jiang during different periods

河 段	年 代	$\frac{r}{R}$	年 代	$\frac{r}{R}$
丹江口—牛首	1959	9.0	1978	7.8
牛 首—襄樊	1959	9.2	1978	9.8
襄樊—宜城	1959	8.4	1978	6.9

库下游河型是否发生转化，取决于清水下泄的过程、历时的长短以及所处的自然环境。一般下泄水流稳定、历时又长，河型易转化；建库前含沙量较小的游荡河流比含沙量大的游荡河转化快；有含沙量小而粒细的支流汇入的河流比有含沙量大、粒粗的支流汇入的河流易转化；暖温带地区的河流比干旱

带地区的河转化快；植被生长良好地区的河流比植被覆盖差的地区河转化快。因此，丹江口水库下游河道河型比红山水库、官厅水库下游河道易转化。此外，在局部地质、地貌条件的影响下，使近库河段保持着一种分叉河道的特点。如丹江口水库与三门峡水库下游的近库河段；在干旱、半干旱地区，由于暴雨、风沙等因素的影响，河流易保持游荡河流的特点，如红山水库和官厅水库下游河道。

五、对库下游地区经济建设和环境的影响

水库的兴建调节了下游河道的流量和泥沙，使下游河道发生变化，从而对下游地区的经济建设和环境带来一定的影响，产生一些新的问题。但总的说来，水库兴建后对综合经济效益是有利的。

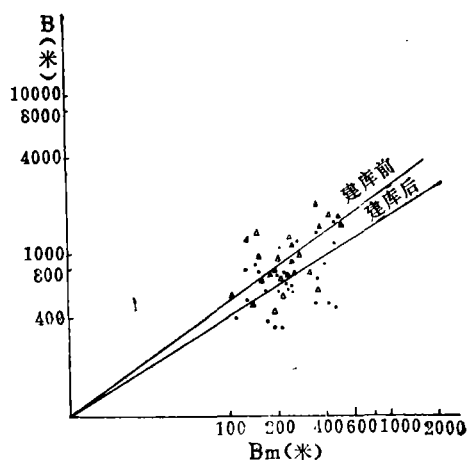
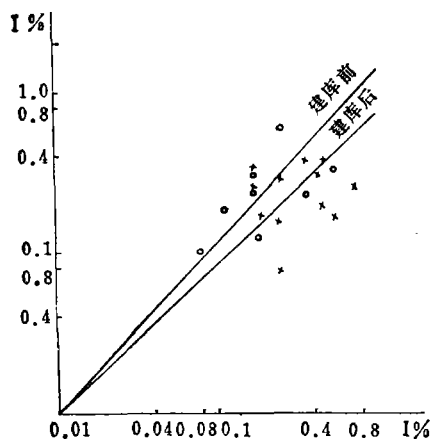


图6 丹江口下游河谷比降与河床比降之比

Fig.6 Ratios of valley slope to channel gradient downstream from Dan jiang-Kon Reservoir

图7 丹江口下游滩宽与河宽之比

Fig.7 Ratio of width of the floodplain to that of the channel downstream from Dan Jiang Kon Reservoir

1. 水库的兴建使洪水削弱、岸蚀减轻、河床稳定, 有利于防洪防涝。但是, 也有因中水历时加长、着流点不变、水流冲刷加剧、原有护岸工程失效, 造成抢险紧张、困难的一面;

2. 河道中洲滩淹没机率减少, 利于开垦, 增加农田面积, 有利新居民点和工矿企业的兴建;

3. 有利于枯季灌溉, 建立永久性提水工程;

4. 改善航道, 增加航深, 减少碍航浅滩, 增加航速。但是, 对原有一些码头、港口也会带来不利的影响;

5. 库下游河流水温水质的变化有利于浮游和底栖生物的生长。但是, 有时也对鱼类的生长繁殖不利;

6. 在干旱、半干旱地区建库后, 不定期的大量泄洪会造成河岸的崩塌, 大量耕地坠毁, 同时, 水库的拦蓄使下游河道长期断流, 造成下游地区的沙漠化。

参 考 文 献

- [1] 水利水电科学院河渠研究所, 官厅水库建库后永定河下游的河床演变, 水利电力出版社, 1960年。
- [2] 钱宁, 修建水库下游河道重新建立平衡的过程, 水利学报, 第4期, 1958。
- [3] R.H.Liresey, Channel armouring below Fort Randall Dam, US Dep.Agric.mise pub. 970, 1965.
- [4] Б.Ф.Снишгенко, Типы руслового процесса и их возникновения, Тр. ГГИ Вып. 263, 1980.

CHANNEL CHANGE OF LOWER REACHES DOWN RESERVIORS UNDER VARIOUS NATURAL CONDITIONS

Gong Guoyuan

(Institute of Geography, Academia Sinica)

ABSTRACT

This paper analyses channel changes of the lower reaches down reserviors and the transformations of river pattern. These rivers flow through different areas with various backgrounds and natural environments.

The characteristics of channel changes under different natural conditions are: (1) The more the released discharge, the longer duration the flow and the further from the dam the erosional base level, then the longer the scour distance is; the more the discharge and the finer the material, the more intensive the scour is. (2) Three situations of channel change exist in longitudinal direction.

(a) A concave or linear profile is associated with the grading of bed material and the inequality of scour over river bed (b) When bed material is composed of uniform medium or fine sand and the bed is equally scoured, the parallel lowering of the bed will occur and the longitudinal profile will inherit its original form. (c) Affected by the bedrock and the tributaries with heavy load, the profile will be convex. (3) Three types of transverse evolution are: (a) When both the bank and the bed are less mobile, the released discharge will primarily cause deep scour and results in a narrowed cross-section and in decrease of width-depth ratio. (b) When the bank is less mobile than the bed, the deep scour will occur prior to the lateral erosion and the width-depth ratio might increase. (c) When both the bank and the bed are composed of uniform loose material, the deep scour and the lateral erosion will parallely operate and less change will occur in the width-depth ratio.

As far as the river pattern trasformation considered, the shorter the duration of the released flow, the more the regional storm runoff, and the worse the vegetation, then the more difficult the transformation from braided river to other river patterns. In constrast, the longer the duration of flow, the less the sediment load from the basin and the better the vegetation, then the easier the evolution of a braided river to a single meandering river is. constrained by the boundary conditions, these rivers may changed into a confined meandering or stable islandtype river.