

汉江丹江口水库下游河床演变*

龚 国 元

(中国科学院地理研究所)

摘 要

丹江口水库建库20多年来,下游河道由堆积性河道变成了冲刷性的河道,河床物质沿程粗化,比降得以调平。水深增加幅度大于河宽,流速并不随着水深增加而加快。深槽、浅滩分布明显化,宽深比不断在减少。整个库下游变化可分为三段:1)近库段,游荡河道向单一限制性曲流转化;2)大支流影响段,河道仍保持着游荡特性;3)下游段,游荡段游荡特性减弱,弯曲段则深蚀作用加强。

五十年代末六十年代初,有关我国北方多沙河流水库下游的河床演变,不少水利学家已做了大量的研究工作,取得了可喜的成果。但是,对于南方少沙河流,兴建水库后,引起下游河床演变的研究还不多。作者近年来在汉江丹江口水库下游河道(丹江口—钟祥)进行了实地考察,重点分析了建库20多年来中游测验河段有关资料,探讨了河谷区域自然条件和水沙条件对下游河道冲淤变化,河相关系的调整、河流地貌的再造以及河型转化的影响及其发展规律。

一、流域自然条件特征¹⁾

汉江是长江的最大支流,源于陕西凤县,至武汉汇入长江,全长1542公里,流域面积17.4万平方公里,接纳大小支流十余条,其中,库下游最大支流是唐白河。库下游河槽主要发育在松散沉积物之中,钟祥以上,河床上部多为砂层,下部为卵石层;河岸,上层为亚砂土、亚粘土,下层多为砂卵石层及抗冲较强的粘土层;钟祥以下河槽发育在近代河湖相沉积物之中,粘性较高,抗冲性较强。

汉江河势的发展与地貌条件密切相关(图1)。汉江出丹江口进入山前丘陵平原地带后,谷地逐渐展宽,河谷两岸不对称,河床比降平均为0.39‰。钟祥以上,谷身顺直微弯,河床宽阔多变,河中砂滩密布,具有游荡性河段特点;钟祥以下,河身弯曲,弯曲系数为1.58—1.89。河床因受土质和堤防的约束,水流选择下蚀,使河底起伏不平^[1]。

二、建库后水沙特性

(一)建库后上游来水来沙特性

建库以来,水库运用的方式有所不同,1960—1967年为滞洪期;1968年至今为蓄水期,上游来水来沙发生了巨大变化。从流量上看,大大地改变了下游的流量过程,洪峰削减和削平,消除了枯水期,流量稳定,其常流量为1000—1500立方米/秒;改变了年内分配比例。建库前汛期水量占全年的53—54%,建库后只占29—32%,枯水期水量由原来的6—7%增加到15—18%,流量变化同样也带来了水位的变化(表1),库下游各站水位下降了1.2—1.6

* 长办长科院河流室曹洪济工程师,长办汉江丹总站第二河道观测队黎力明工程师,中国科学院地理研究所卢金发、许炯心同志协同野外查勘,一并表示感谢。

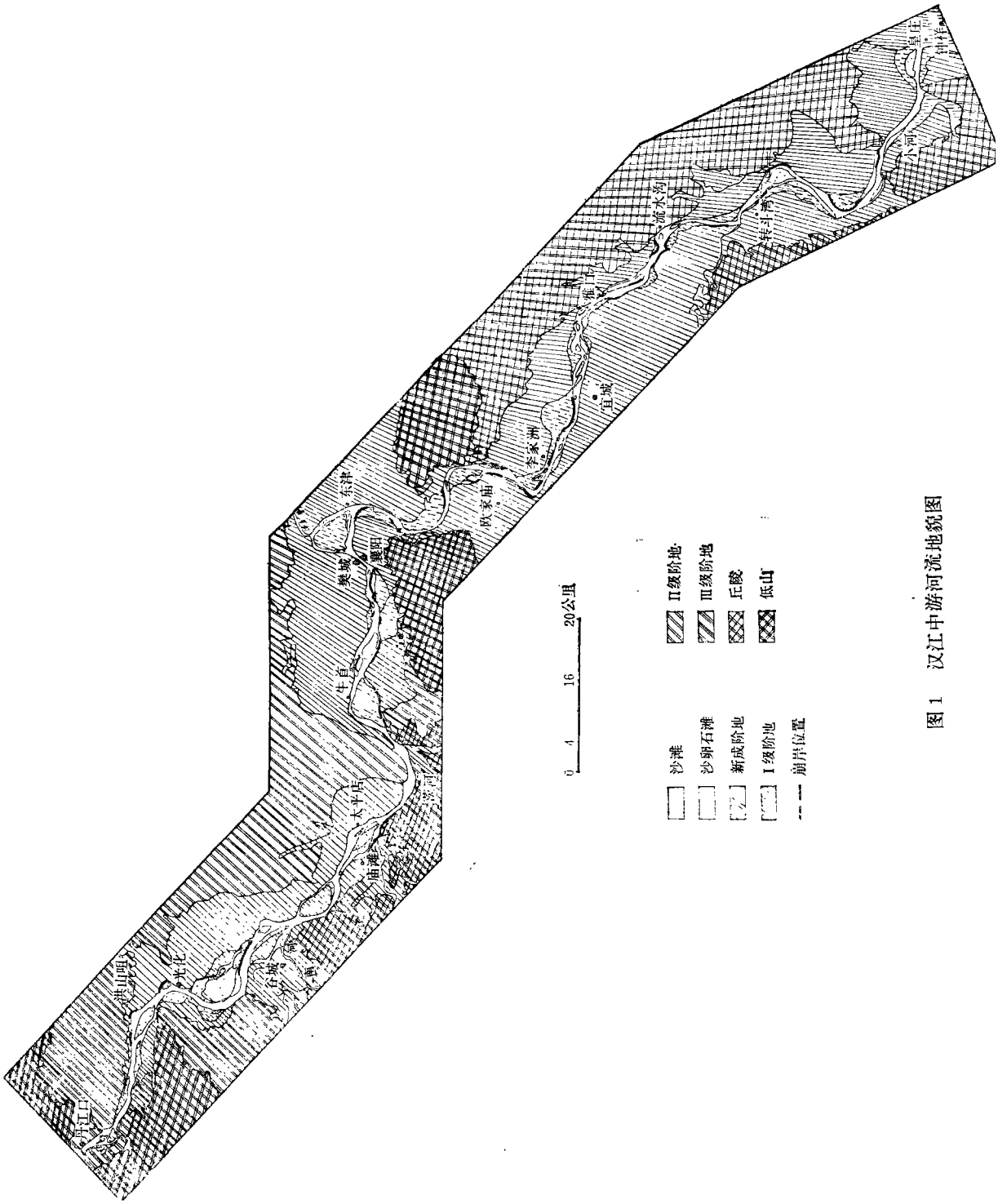


图 1 汉江中游河流地貌图

米。从沙量上看，由于大量的泥沙被拦截于库内，因此，下泄的基本上是清水；即使水流能挟带一点泥沙，一般也属于冲泻质，可以说对河道不起造床作用。如库下黄家港站建库前多年平均输沙率为3979.45公斤/秒，而蓄水后仅只有47.7公斤/秒；建库前含沙量多年平均1.33公斤/立米，蓄水后只有0.025公斤/立米。从图 2 可以看出，建库后随着流量的增加输沙率也不不断的在增加，它们之间有比较好的线性关系。

表 1 不同时期库下游各站水位变幅

平均(米) 时 期 站 名 (年)	建 库 前 (1959年以前)	滞 洪 期 (1960—1967)	蓄 水 期 (1967—1978)
黄 家 港	6.28	6.27	4.54
茨 河	5.55	4.97	3.78
襄 阳	5.72	5.68	4.41
宜 城	5.46	5.29	3.90
碾 盘 山	6.81	6.70	5.26

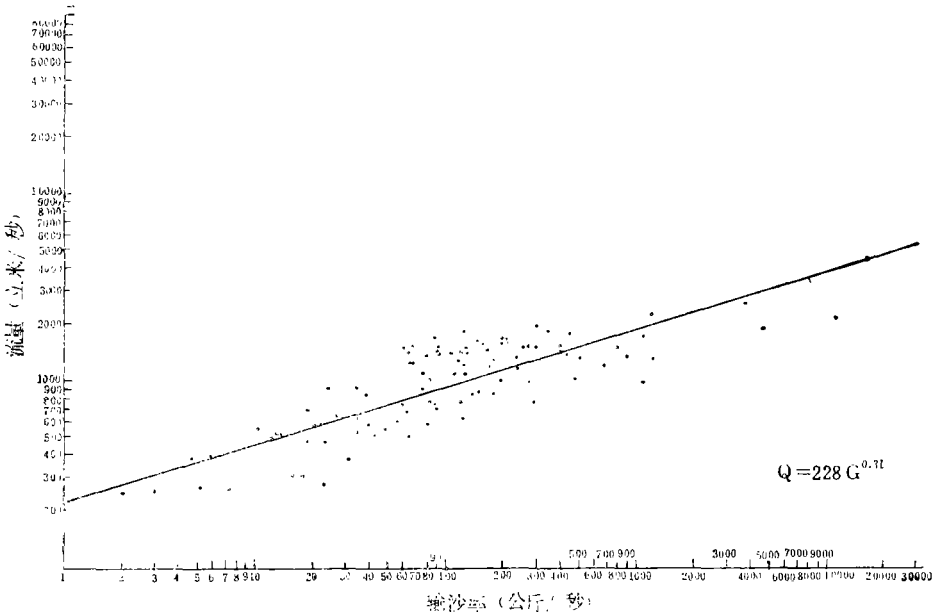


图2 襄阳站流量与输沙率关系

(二)唐白河来水来沙特性

唐白河的汇入使库下游河床的调整复杂化，它汇入的迳流量多年平均值为60亿立方米左右，占碾盘山站迳流量的11.85%，并且主要集中在汛期。唐白河汇入的沙量不仅多而且粗，多年平均总沙量为 19.59×10^8 吨，占碾盘山站总沙量的 11.6%¹⁾。建库后上游来水来沙经过了调整，而唐白河来水来沙条件则未变，因此，它对干流的作用也就变得明显了。

(三)库下游河床演变中的水沙特性

水流是造床的动力，泥沙是水流和河床之间的纽带，河床为了适应新的水沙关系，重建

平衡进行了新的调整。建库后,由于清水对下游河床的冲刷,冲起来的部分泥沙被水流带走,促使下泄时的清水变成了含沙水流,而另一部分泥沙经过水流的筛选后形成了粗化层。清水变成含沙水流在水库不同运用时期其含沙量不相同(表2),沿程分布递增,其递增率直到下游的仙桃站(距坝467公里)还在增加²⁾;含沙量与流量(图3)也有较好的线性关系。建库后由于下泄的流量比较稳定,因而含沙量也比较稳定。按照韩其为等同志的分析,认为库下游河床粗化的形成是通过三种方式在进行,即是:①推移质冲刷的粗化;②悬移质冲刷粗化;③交换粗化。他们并计算出,库下游太平店以上只要水流冲深河床1.2米左右就会形成卵石粗化层³⁾,我们根据建库后河床沉积物(图4)的分析,在其物质组分中,滚动部分明显增加,大于 $\phi 1$ (0.5毫米)的由2.4%(1959年),增加到34.0%(1978年),而且泥沙颗粒分选很好。

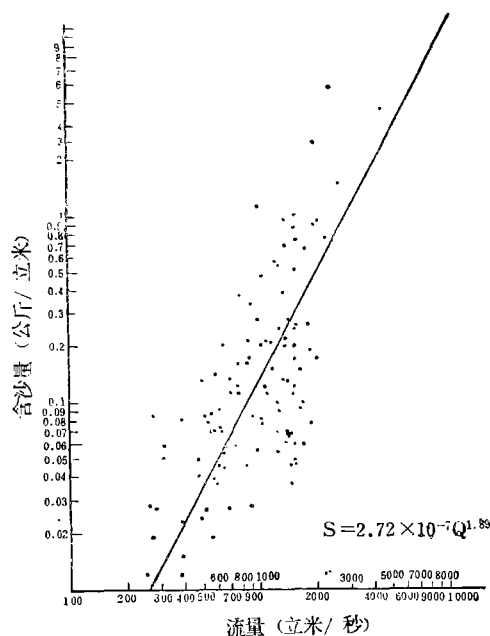


图3 襄阳站流量—沙含量关系(立方米/秒)

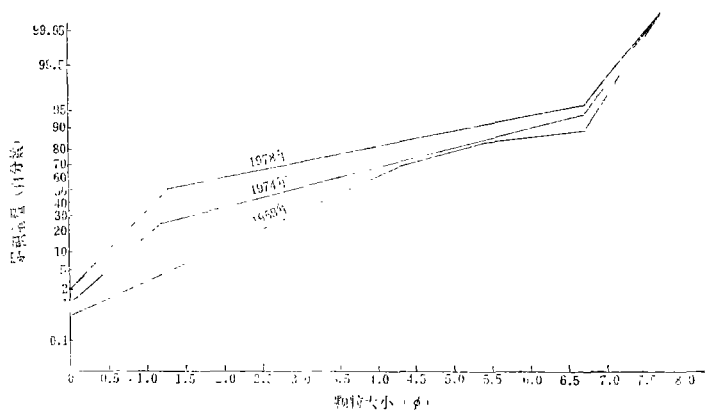


图4 河床沉积物的搬动力与组分和截点关系

三、库下游河床冲淤及其形态的变化

水利枢纽工程的兴建将会破坏河流的平衡引起河床的再造。下泄清水的冲刷能力与河床抗冲能力不断进行调整,试图重建新的平衡。河床的调整主要是受上游来水来沙的控制,但

1)长办长科院河流室:唐河、白河及汉江下游河型查勘报告,1963年。

2)韩其为、王玉成、向熙琰:清水下泄下游河道含沙量恢复及河床变形特点,1978年。

表 2 不同时期含沙量的变化

站 名	时 期	统计年分 (年)	年 数	年平均含沙量总数 (公斤/立米)	各时期平均含沙量 (公斤/立米)	蓄水期占建库前含沙量 (%)
黄家港站	建 库 前	1955—1959	5	14.51	2.92	
	滞 洪 期	1960—1967	8	13.84	1.93	66.00
	蓄 水 期	1968—1978	11	0.38	0.04	1.36
襄 阳 站	建 库 前	1950—1959	9	22.69	2.50	
	蓄 水 期	1974—1978	5	0.95	0.19	7.60
碾盘山站	建 库 前	1937—1959	10	24.8	2.48	
	滞 洪 期	1960—1967	8	15.99	2.00	80.64
	蓄 水 期	1969—1978	10	6.33	0.63	25.40

注：1.因资料不全，有的年代和时期缺失。
2.碾盘山站1974年以来的资料是运用皇庄站的资料。

是，库下游区域自然环境的影响（地形、植被、大支流等），将会使下游河床的变化复杂化。

(一)纵向冲淤特性与纵剖面的调整

建库前水库下游年输沙量沿程减少，河床物质组成沿程细化。河床纵向上的稳定系数，襄阳以上等于1.0，而以下大于1.0。建库后清水下泄，河床下切，库下游河道冲淤特性发生了实质的变化。自建库到1978年，下游河道冲刷量超过3827万吨，年输沙量沿程增加，沿程的物质分布趋于粗化。建库后，除个别年份河道微淤和冲淤平衡外，绝大多数年份都是冲刷的，冲刷的范围逐渐向下游延伸¹⁾。目前冲刷最剧烈的一段在襄樊至皇庄之间。但是，由于唐白河汇入的影响，襄樊河段仍有所淤积。除以上影响外，河道的冲淤变化速率和冲淤形式直接与河床的粗化过程，抗冲层的形成有关，在抗冲层形成之前，冲刷速率快，冲刷量也大，河床比降调整得也快。从丹江口至宜城段比降与泥沙粒径关系可知，比降（*J*）的调整直接与粒径（*d*）的大小有关。

即：1962年 $J = 20.0d^{1.37}$
1974年 $J = 24.9d^{2.28}$

根据稳定系数（ $f = \frac{d}{J}$ ）的计算，丹江口至太平店其系数增加一倍半。

河道的冲淤特性直接反映在纵剖面形态的调整上，从图 5 可以看出：建库前河床纵向起伏小，剖面平缓，河床比降大。建库后，在剖面上深槽浅滩有了明显地反映，其分布位置固定，高差加大，河床比降得到了调整（表 3），近库段比较调平得快。但由于唐白河汇入以及襄樊河段主流河道交替的影响，使河床比降的调整复杂化，整个河床纵剖面形态呈上凸形。

(二)横向冲淤特性与横断面的调整

建库前来沙量大，河床横向冲淤变化也大，侧蚀作用强，河床宽度从上游向下游减少。

1)长办丹总站第二河道观测队：丹江口水库下游河床变形初步分析，1979年。

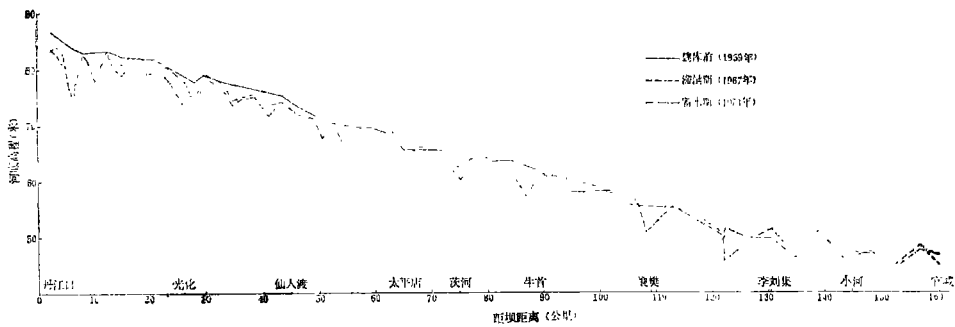


图5 丹江口下游丹江口—宜城河床纵剖面。

表 3 河 床 纵 比 降 (‰)

河 段	距坝距离 (公里)	年 份		
		1959	1967—1968	1974
丹江口—光 化	25.59	2.81	1.64	1.76
光 化—太平店	37.63	3.29	2.84	2.76
太平店—牛 首	24.00	2.21	2.17	2.21
牛 首—襄 阳	19.13	2.77	2.72	2.14

横向稳定系数 ($A = \frac{BJ^{0.2}}{Q^{0.5}}$, 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), 中游段 $A \geq 1.7$; 下淤段 $A < 1.2$ 。

根据建库后丹江口至宜城1967—1974年断面冲淤面积变化图 6 分析, 丹江口至牛首段90多公里38个断面中, 37个断面受到冲刷, 只有一个断面是淤积的, 其冲刷面积最大的可达1000平方米; 牛首以下断面冲淤变幅大, 有的不仅未冲还淤了。从1967年和1974年河宽沿程变化 (图 7) 可知, 丹江口至太平店河段因河岸抗冲性大, 河道不易展宽, 河床以加深为主。不过一旦抗冲层形成之后, 水流侧蚀与下切作用都受到限制, 水流能量的消耗就转向扩大深槽。太平店以下, 由于河岸抗冲性较差, 河床在深蚀的过程中侧蚀作用也很强烈。

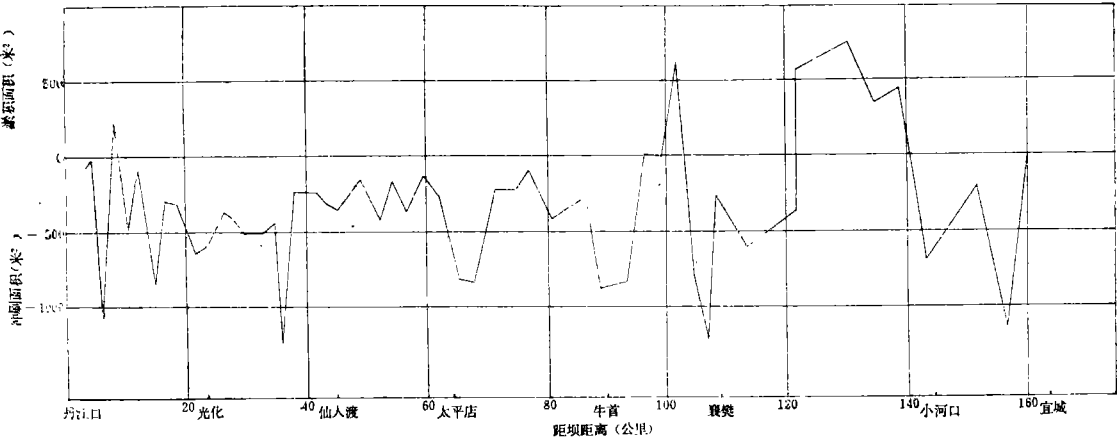


图6 丹江口—宜城1967—1974年冲淤面积变化。

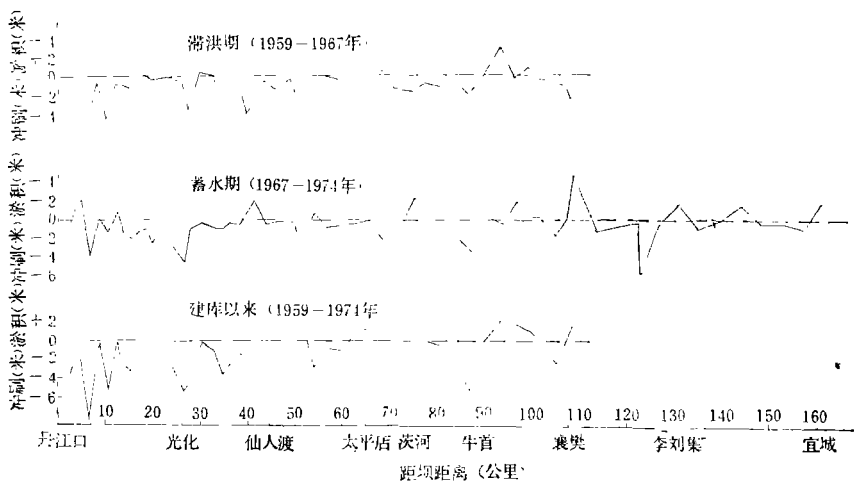


图7 不同时期深泓冲淤变化

根据库下游60个实测断面形态的分析，其中属于宽浅多槽的有23个，属于宽浅单槽的有27个，而属于“U”字形和不对称三角形的只有9个。从分析中可以看出，建库后由于清水下泄流量调平，主槽刷深，主汉扩大，支汉淤塞，河床横向上表现出窄处变宽，宽处变窄，多槽变双槽，双槽变单槽的特点。从河宽（ B ）与水深（ H ）之比（表4）来看，其宽深比值各段都在10左右。

表4 丹江口水库下游各河段宽深比值表

河 段	断 面 个 数	河 段 长 度 (公里)	$\frac{\sqrt{B}}{H}$
丹江口—光 化	15	26.18	11.85
光 化—牛 首	24	29.25	13.40
牛 首—襄 樊	8	21.61	17.54
襄 樊—宜 城	12	52.05	7.84

(三)河相关系

根据库下游四个水文站建库前和建库后（1979年）有关资料的分析（表5），调整后的河相关系除个别站外，一般都较建库前为好，相关系数可达0.8以上。在河宽与流量的关系中，一般建库后比建库前的指数小，其中，黄家港至皇庄河段指数沿程有增加的趋势，而皇庄至仙桃又有所减少，说明了建库后随着清水流量的增加，河床深蚀作用加大，河宽增加不大。近库段河道的游荡特性比下游段游荡特性有所减弱，河道向窄深方向发展得快。但在下游（皇庄—仙桃）由于河型上的差异指数又有所减少。在水深与流量的关系中，建库前虽然流量变幅大，但水深变幅有限。建库后随着流量的增加，水深增加的幅度较大，独有黄家港站1979年比建库前还小，这可能是与卵石抗冲层的形成有关。在流速与流量关系中，建库后除黄家港站外，其它各站指数值均较小，但有沿程增加的趋势。说明了建库后，从上游向下游比降有所调平，但是一旦抗冲层形成，流速就相应降低，其降低的幅度近库段大于下游段。

表 5 库下游各站河相关系的指数平均值

河 站	b (为河宽与流量)		f (为水深与流量)		m (为流速与流量)	
	1959年	1979年	1959年	1979年	1959年	1979年
黄 家 港	0.19	0.06	0.36	0.27	0.44	0.66
襄 阳	0.41	0.12	0.02	0.55	0.54	0.32
皇 庄	0.45	0.30	0.12	0.31	0.43	0.39
仙 桃	0.10	0.12	0.29	0.48	0.61	0.41

注：①以上河相关式为 $B = aQ^b$, $H = aQ^f$, $V_{cp} = aQ^m$ 。
②1959年皇庄和仙桃未设水文站，表中引用的是邻近二站（碾盘山和新城站）资料。

通过以上河相关系的分析，使我们认识到，建库后河宽的增加比水深增加的幅度小，库下游的深蚀作用直到1979年仍占主导地位。随着河床的不断整调，水深的增加减缓，但流速的增加却不随着水深的增加而加快。

(四)河床地貌的再造

建库前，河床宽浅，河身顺直，河道淤积，水流散乱，主泓摆动不定，洲滩密布，河床可动性大于河岸可动性，基本上属于游荡性河段，但局部具有分汊河道的特点。建库后，下游河道为了适应新的水流条件，从而塑造出新的河床形态，其主要表现在以下几方面。

1)水流归槽，河槽刷深，动力轴线加大弯曲，河床深泓普遍冲深2—4米，侵蚀代替了堆积，河床向单槽方向发展。河道弯曲加大，襄樊以上弯曲系数由原来的1.27增加到1.44。

2)支汊衰塞，多汊变单汊，河道向单一化方向发展。建库后，改变了河床宽广多变。江中洲滩密布的特点。太平店以上，由于支汊的淤塞，多汊河道基本上变成单一稳定性河道；太平店以下部分支汊淤死，部分支汊因床沙来源不足淤而不死，但分流比不断减少。

3)小滩併大滩，低滩变高滩，高滩变阶地。随着水沙条件的变化，江中小滩不断合并靠拢变成大滩。低滩由于深蚀作用以及水位被调整降低，逐渐变成高滩，高滩则变成了新的阶地。这样，也促使了滩槽高差发生新的变化，对于老的滩地来说，滩槽高差平均加大一倍；但对于建库后形成的新的滩地来说，滩槽高差却降低了，其高差为3.83米，新滩地对老滩地起了保护作用，使滩地可耕面积增加了230多平方公里。

4)岸坡稳定，岸边物质粗化，岸崩减少。建库后，水流条件受到控制，流路稳定，水位高差变幅减少。水面比降调平，因此，岸坡也相应稳定。建库后，岸崩总的说来减少了，但由于水流条件与边界条件的变化，崩岸的位置也发生了变化，一般位于弯曲段的凹岸：河道拓宽处和无新滩保护的地方（见图1）。

根据距坝远近和所处的区域条件可将库下河道演变分成三段：

1)库下游正常自由段（即近库段）：大坝至牛首之间，长90多公里，是受下泄清水影响最大的一段。目前除个别河段分汊外，基本上已变成单一性河道，其弯曲系数由原来的1.25增加到1.50。河床刷深了2—4米。河床物质粗化，原砂卵石河床基本上变成了卵石河床。河床纵向稳定系数达到2.0，侧蚀作用因受边界条件的限制，变幅不大。河床比降调平，但是在粗化层形成之后，一般比降变化不大，有时比降还略有变陡。根据以上的变化，本河段只要继续在上游水库来水来沙条件的控制下，深泓将会进一步变弯，河道将向着稳定单一弯

曲方向发展,但因受到河谷以下条件的限制:①河谷受地质构造断层带的控制,展宽受限;②河谷不对称,河流向右岸摆动,水流紧逼山麓,拓宽难;③宽浅碟形的横断面形态,横向环流作用不强,特别是随着物质的粗化,横向环流能携带来的细粒物质缺乏,使边滩不易淤长,曲流不易发展;④河岸物质组成缺乏明显的二元结构;⑤要发展成曲流,比降还需进一步调平,但是,粗化层的形成是不利于比降调平的。本段河道在上述条件的限制之下,虽然经过20年来的调整,河道基本上只能形成成为一种限制性的曲流河段。

2)唐白河汇入影响河段:唐白河的汇入对于库下游河段影响是明显的,它的汇入使河床演变,河型转化复杂化。本河段牛首镇至宜城,长约75公里,河道形态复杂多变,主要受下列作用的影响:①本段正处于库下游强烈冲刷阶段;②襄樊河段近年来主支汉急剧交替;③襄樊人工护岸形成的卡口作用;④大支流唐白河的汇入处。在以上四种作用的相互作用之下,干流来水时河床冲刷,唐白河大量粗颗粒物质汇入时,河床则发生淤积,这样,使本河段仍然保持着一种游荡性河道的特点。今后的发展变化仍然是比较复杂的,如果干流作用加强,游荡特性将会进一步减弱,河流朝着单一稳定方向发展;如果唐白河汇入作用加强,河道将仍保持游荡的特性。但是,我们认为,在本河段起主导作用的还是干流来的清水,因此,河床将会进一步向单一稳定性方向发展。

3)下游段:宜城至河口,长约460公里,按原河型来看,其上段为游荡性河段,下段为弯曲性河段。建库后由于水流归槽河道受冲,洲滩减少,支汉淤塞,河道向单一性方向发展。从目前河床演变来看,游荡特性虽有所减弱,但是还未发生根本性的变化。今后在清水冲刷的影响之下,游荡的特点会进一步降低。对于钟祥以下的弯曲河段,下泄清水的影响主要反映在河床的刷深,但因河岸上土质和人工护岸的影响,河床拓宽受到限制,河道要进一步向弯曲方向发展将会受到阻碍。

参 考 文 献

〔1〕沈玉昌:汉水河谷地貌及其发展史,地理学报,22(4),1957年。

〔2〕韩其为、王玉成、向熙说:丹江口水库淤积及下游河道冲刷,河流泥沙国际学术讨论会论文集,光华出版社,1981年。

CHANNEL CHANGES IN THE HAN-JIANG RIVER BELOW THE DAN-JIANG-KOU RESERVIOR

Gong Guoyuan

(Institute of Geography, Academia Sinica)

Abstract

Since the construction of Dan-Jiang-Kou Reservoir in 1959, the reservoir regulation has markedly altered the discharge and sediment process in the channel downstream. The flood-peak hydrograph has been lowered and flattened; the period of

low flow has disappeared with the discharge becoming constant at $1000-1500\text{m}^3/\text{s}$; sediment load has been reduced from $1.33\text{kg}/\text{m}^3$ and the turbid water has become cleaner. Essential changes have taken place in the channel below the reservoir with the effect of the reservoir regulation and regional physical conditions. Degradation has been replaced by aggradation in the channel; the deep scour in channel thalweg by 2-4m has occurred over the whole channel; deep scour has been slowed down with the establishment of the resistant layer, and lateral erosion increased, but far it will go on depends on the boundary conditions. Degradation is dominant in the channel downstream from the reservoir and has extended up to the mouth 630km below the dam. The channel slope has been gradually flattened except for the places near the confluences of major tributaries where the channel slope becomes steeper due to the aggradation caused by these tributaries of heavy sediment load. The relationships between channel geometry and discharge and sediment load have been improved with a relative factor up to more than 0.8 compared with what they were. Since the increase of channel depth is more rapid than that of the width while there is no increase in velocity as the depth increases, the channel geometry has been subject to much alteration; the flow has concentrated into the channel; deep scour of the channel has occurred and sinuosity of the channel thalweg has increased. Consequently, the height difference between the bed and surface of bars has increased; branch channels have been filled up and the channel pattern has changed from multichannel to the single channel, with the width depth ratio being reduced to about 10. Small bars have joined to become big bars and lower bars have been transformed to higher ones which have after then become terraces. Bank slumping has slowed down as a result of stabilization of bank slope and coarsening of bank material.

According to the distance away from the dam and regional natural conditions, the channel downstream from the reservoir can be divided into three parts of different characteristics: 1, near reservoir reach (Dan-Jiang-Kou-Nou-Shou) which is more than 90Km long and most markedly affected by reservoir regulation and channel adjustment is rapid so that the straight wandering channel has been transformed to the single restricted meander with sinuosity being increased from 1.25 to 1.50; 2, the reach influenced by Tang-Bei-He river; Its length is 70km. In this reach the channel remains wandering as a large amount of coarser material coming from major tributaries has disturbed the channel self-adjustment; 3, the lower reach which has a length of 460km and less affected by the reservoir regulation owing to the long distance from the dam. In this reach lateral migration has become weakened in the wandering channels whereas the deep erosion has developed and sinuosity has increased in the meandering channels with the effect of bank material.