水沙调节后三峡工程变动回水区泥沙冲淤变化

陆永军[1] , 左利钦[1] , 季荣耀[1] , 毛继新[2]

(1. 南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室 , 江苏 南京 210029 ; 2. 中国水利水电科学研究院 , 北京 100044)

摘要: 长江上游溪洛渡、向家坝等水电工程的建设 , 改变了进入三峡水库变动回水区及库区的水沙环境。上游水库水沙调节后 , 变动回水区的泥沙淤积情况将会发生相应变化。在分析三峡工程变动回水区水沙特性的基础上 , 应用建立的适合多连通域的贴体正交曲线坐标系下的二维水沙数学模型 , 根据三峡工程初步设计阶段选定的 1961 - 1970 年(简称 60 系列)及上游水库水沙调节后的水文系列及相应进出口边界条件 ,预测了重庆主城区河段 100 年泥沙冲淤的时空变化规律。研究表明 , 60 水沙系列条件下 , 该河段淤积比较严重 , 淤积主要位于岸线凹凸不平的弯沱、回流区及河道的宽浅河段 ; 上游水沙调节后 , 仅局部岸线凹凸不平的弯沱有少量泥沙淤积 , 主城区川江段的淤积量仅为 60 系列的 17. 4 % , 嘉陵江段仅为 60 系列的 10. 3 % , 这对三峡水库有效库容的保持及主城区河段岸线利用有利。

关 键 词: 水沙调节 ; 变动回水区 ; 泥沙冲淤 ; 数学模型 ; 重庆河段 ; 长江 ; 嘉陵江 ; 三峡工程

中图分类号: P333. 4 **文献标识码**: A **文章编号**: 1001-6791(2009)03-0318-07

国内外已建成的水利枢纽工程运用实践表明 , 水库变动回水区的泥沙问题 , 将随着运用年限的增长而日趋严重。根据“七五”、“八五”及“九五”三峡工程泥沙研究[1~3] , 其变动回水区从江津至剪刀峡长约 200 km , 在天然状态下河床冲淤呈现汛期淤积、汛末和汛后冲刷、年内冲淤基本平衡的规律 ; 三峡工程蓄水按 175 m 方案运用后 , 本河段泥沙淤积严重 , 两岸形成淤积边滩 , 大部分港口将被淤废 , 特别是上游重庆河段部分航道条件恶化 , 将严重影响重庆港的兴衰和重庆市沿江防洪及市政建设。

近年来 , 长江上游大型水库群 , 溪洛渡 - 向家坝 - 百鹤滩 - 乌东德等水电工程的建设和发展重新构筑了长江流域水资源利用的新格局 , 这种新格局改变了三峡工程建设前、后与及建设期间的环境和条件 , 又构筑三峡水库泥沙淤积新态势 , 并直接影响到三峡水库的功能和健康。有关研究表明[4] , 随着上游已建水库的增加和流域植被条件的改善 , 目前上游来沙量已较三峡工程初步设计阶段选定的 1961 - 1970 年水文系列泥沙数量明显减少 , 且 2007 年 11 月 8 日 , 溪洛渡电站已实现了大江截流 ; 向家坝电站 2008 年 12 月 28 日已实施了大江截流。溪洛渡、向家坝电站的总库容在百亿 m^3 以上 , 具有较好的水沙调节作用 , 可以大幅减少进入三峡水库变动回水区及库区的泥沙数量。上游水库水沙调节后 , 变动回水区的泥沙淤积情况将会发生相应变化。显然 , 对于不同的淤积数量和淤积部位 , 其适宜的治理方法和治理措施也不相同 , 非常有必要开展上游不同来水来沙条件下三峡工程变动回水区泥沙冲淤时空变化规律的研究 , 研究具有巨大的经济效益和社会效益。

1 河段概况及水沙特性

三峡水库变动回水区上游重庆河段平面形态为宽窄相间 , 窄段的洪水河宽为 600～800 m , 宽段达 1 200～2 000 m。两岸有基岩裸露 , 石梁、礁石、突咀较多 , 岸线参差不齐。由于河床宽窄相间 , 窄段水深较大。宽段多江心洲和边滩 , 在洲尾和边滩 , 或者两个边滩之间形成过渡段浅区。本河段内有九龙滩、铜元局、猪儿碛、

收稿日期: 2008-08-14
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50879047 ; 50779037) ; 国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(2003CB415206)
作者简介: 陆永军(1964 -) , 男 , 江苏南通人 , 教授级高级工程师 , 主要从事河流海岸泥沙研究。E-mail : yjlu @nhri. cn

铜锣峡、金沙碛等浅滩或险滩。本河段(图 1)有长江重要支流嘉陵江入汇，使得汇合口河段的水流及泥沙运动受到很大影响。特别当干流与支流嘉陵江洪水期不一致时，水位相互顶托，流速减小，水流挟沙能力下降，促使大量泥沙淤积，形成支流河口浅滩，直接影响干、支流航运[5]。

长江寸滩站位于川江与嘉陵江的出口，为该河段的控制水文站，控制了重庆以上河段的来水来沙过程。据朱沱站(川江)、北碚站(嘉陵江)及寸滩站 1956 - 2003 年实测资料统计，三峡工程蓄水前，寸滩站多年平均径流量为 3 436 亿 m^3，上游干流和嘉陵江各约占 80 %和 20 %；多年平均悬移质输沙量为 4.18 亿 t，上游干流和嘉陵江各约占 73 %和 27 %，汛期 7～9 月悬沙来量占全年 78 %～80 %。寸滩站多年平均流量约 11 000 m^3/s，最大流量 80 000 m^3/s 以上，最小流量 2 000～3 000 m^3/s，径流量主要集中在汛期，占全年的 75 %左右；水位变幅大，日最大变幅 6～9 m，年内变幅 20～30 m；多年平均含沙量 1.2 kg/m^3，中值粒径为 0.027 5 mm。寸滩站多年平均卵石推移质输沙量为 21.7 万 t，沙质推移质输沙量为 24.1 万 t，两项之和约占悬移质输沙量的 0.11 %。卵石推移质输沙量也都集中在汛期的 7～10 月份，占全年输沙量的 90 %以上；其中值粒径为 51 mm，最大粒径达 202 mm。一般情况下，窄深河段床沙较粗，宽浅河段床沙较细；主槽床沙较粗，滩地床沙较细。

图 1　重庆主城区河段河势图

Fig. 1　River regime of Chongqing reach

嘉陵江一般枯水期在 12～3 月，中洪水期在 4～11 月。枯水期流量小，洪水期暴雨集中，年内水量分配不均匀，洪、枯流量比可达 200～300 倍，河道的水位变化情况与流量变化是相应的，枯水期水位较稳定，洪水期水位暴涨暴落[5]。嘉陵江多年平均悬移质输沙量为 1.48 亿 t，约占长江寸滩站输沙量的 1/3[5]。非汛期来自嘉陵江的沙量所占的比重要大一些，约 41.7 %。北碚站悬移质级配与寸滩站很接近。

2　水沙系列及边界条件

2.1　水沙系列

20 世纪 90 年代以来，重庆以上河段来水来沙除 1998 年属大水大沙年外，其余年份多属小水小沙年和中水小沙年。据统计，朱沱站 1992 - 2003 年平均输沙量为多年平均输沙量的 88.3 %；寸滩站 1992 - 2003 年平均输沙量为多年平均输沙量的 73.2 %；嘉陵江减沙明显，北碚站 1992 - 2003 年平均输沙量仅为多年平均输沙量的 29.2 %。三峡出库的宜昌水文站年平均输沙量为 4.23 亿 t，较之多年平均 5.23 亿 t 已减少 1.00 亿 t。可见，随着三峡上游已建水库的增加和植被条件的改善，上游来沙数量已较三峡工程初步设计阶段选定的 1961 - 1970 年水文系列泥沙数量明显减少。修建向家坝及溪洛渡水库后，三峡水库来沙还将大幅度减少。向家坝水库修建后，在 10～70 年内朱沱站悬移质来沙总量将减少约 50 亿 t。溪洛渡水库修建后，在三峡水库运用 10～100 年内，朱沱站来沙量将减少约 115 亿 t[4]。

为比较变动回水区重庆河段在不同水沙系列作用下泥沙淤积的时空变化规律，本文选择了两种水沙系列，即初步设计阶段采用的 1961 - 1970 年水沙系列(简称 60 系列)及上游修建骨干水库后的水沙系列(简称上游建库系列)，这里说的骨干水库主要指金沙江上的向家坝、溪洛渡水库及嘉陵江上的亭子口水库等。为便于说明长江上游水沙条件的变化，将现状的 1991 - 2000 年水沙系列(简称 90 系列)一并分析。

表 1 给出了不同水沙系列情况下川江朱沱站、嘉陵江北碚站流量、含沙量及其中值粒径。可见：①川江朱沱站年均来流量变化不大，介于 8 449.1～8 608.8 m^3/s，嘉陵江北碚站 60 系列与上游建库系列相同，均为 2 385.5 m^3/s，仅 90 系列北碚站的年均流量为 1 748.9 m^3/s。②川江朱沱含沙量 60 系列与 90 系列相比，变化不大，而含沙量粒径明显减小，60 系列 D_{50}为 0.040 mm，90 系列 D_{50}为 0.025 mm，粒径明显变细。上游建库后含

沙量仅 0.48 kg/m^3，为 60 系列的 39.3 %，D_{50}为 0.018 mm，较 90 系列还要细。③嘉陵江北碚含沙量 60 系列为 2.30 kg/m^3，90 系列为 0.73 kg/m^3，90 系列仅为 60 系列的 31.7 %，上游建库后含沙量仅 0.55 kg/m^3，为 60 系列的 23.9 %；90 系列的粒径较 60 系列明显变细，60 系列 D_{50}为 0.033 mm，90 系列 D_{50}为 0.019 mm，而上游建库系列与 60 系列相当。

表 1 不同系列 10 年平均水沙特征值

Table 1 10-year Mean value of runoff, sediment concentration and D_{50} with different series of water and sediment conditions

水沙系列	流量 Q/(m^3·s^{-1})			含沙量 S/(kg·m^{-1})			中值粒径 D_{50}/mm		
	朱沱	北碚	寸滩	朱沱	北碚	寸滩	朱沱	北碚	寸滩
60 系列	8608.8	2385.5	10994.4	1.22	2.30	1.44	0.040	0.033	0.037
90 系列	8449.1	1748.9	10198.1	1.15	0.73	1.07	0.025	0.019	0.023
上游建库系列	8458.8	2385.5	10844.4	0.48	0.55	0.49	0.018	0.034	0.021

2.2 边界条件

根据中国水利水电科学研究院[4]提供的 2003 - 2102 年的模型进口茄子溪断面流量、含沙量及其级配过程，嘉陵江井口流量、含沙量及其级配过程，出口铜田坝(生基塘)水位过程计算了本河段的淤积过程，包括两种水沙系列的计算。计算均以 2003 年地形作为起始地形。

2003 年 6 月～2006 年 9 月三峡水库采用 135～139 m 蓄水位方案*；2006 年 10 月～2007 年 9 月三峡水库采用 156 m 蓄水位方案；2007 年 10 月～2012 年 9 月三峡水库采用 172 m 蓄水位方案；2012 年 10 月以后三峡水库采用 175 m 蓄水位方案。在 2003 年 6 月～2006 年 9 月期间，本河段基本处于天然状态，本河段河床仍呈现天然河床的演变特性。2006 年 10 月以后，受水库壅水影响，本河段处于变动回水区，水位壅高，流速减小，水流挟沙能力减弱，泥沙淤积。

3 岸线变化前淤积量与长模型试验结果比较

在分析水沙特性及河床演变特征的基础上，笔者建立了贴体正交曲线坐标系下的二维水沙数学模型[6～9]。该模型克服了干支流汇合处河道边界形状复杂的困难，对长江上游重庆主城区河段(图 1)，上起茄子溪(距宜昌 687.6 km)下至铜锣峡(距宜昌 644 km)，嘉陵江口以上约 25 km 河段的水流和泥沙冲淤进行了验证计算。验证表明[10,11]，计算的水位、流速分布、含沙量及其级配分布、川江九龙滩及支流河口金沙碛浅滩的冲淤量、冲淤部位与实测值吻合良好，尤其模拟了汇合口两江水流相互交汇所形成的回流及局部不规则岸边形成的回流。为了保证大洪水数模计算的精度，在模型中复演了 1981 年 7 月大洪水，调整了大洪水糙率[10]。

在此基础上，本文进行了重庆主城区河段岸线变化前(1986 年地形)各分河段淤积量与南京水利科学研究院长模型试验进行比较。南京水利科学研究院三峡变动回水区长模型曾进行过 175 m 方案 80 年的淤积试验[2]，当时为三峡工程水位论证阶段的试验，175 m 方案试验前 10 年按 156 m 蓄水位运行，10 年后按 175 m 蓄水位运行，模型试验中考虑到 156 m 时本河段基本不受回水影响，模型中未施放其流量过程，因此文献[2]给出的第 28 年试验结果相当于 175 m 蓄水位运行第 18 年的淤积量。表 2 给出了以 1986 年地形作为起始地形计算的重庆河段在水库 175 m 运行第 18 年淤积量与长模型试验结果的比较。由表可见，李家沱至铜田坝的 26 km 河段数模计算淤积量值为 4658.7 万 m^3，物模试验值为 4160.9 万 m^3，二者仅相差 497.8 万 m^3，除个别河段外，各分河段及支流嘉陵江的淤积量与物模试验值也相差不大。

* 库水位为吴淞基面，其余水位及高程一律为黄海基面，吴淞基面 = 黄海基面 + 1.7 m。

表 2　数模计算的重庆河段各分段淤积量与南京水利科学研究院物理模型试验结果的比较　　万 m^3

Table 2　Deposition amount of Chongqing reach calculated by mathematical models and its comparison with the test results of physical model by Nanjing Hydraulic Research Institute

河　段	起　讫 断面号	河段长度 / km	数模计算 175 m 方案运行 18 年	物模试验 175 m 方案运行 18 年	数模 - 物模 / 万 m^3
李家沱 - 九龙坡	96～119	2.0	99.9	116.3	- 16.1
九龙坡 - 黄沙	119～140	3.0	922.0	819.9	102.1
黄沙 - 储奇门	140～217	7.8	1 244.4	1 207.0	37.4
储奇门 - 朝天门	217～245	3.2	146.2	170.1	- 23.9
朝天门 - 寸滩	245～317	6.5	1 446.0	998.7	447.3
寸滩 - 铜田坝	317～345	4.0	800.2	780.9	19.3
李家沱 - 铜田坝	96～345	26.0	4 658.7	4 160.9	497.8
磁器口 - 牛角沱	85～192	11.0	2 019.4	2 917.9	- 898.5
牛角沱 - 口门	192～248	5.0	1 131.9	1 187.1	- 55.2

注：断面号位置见图 1。

4　水沙调节后重庆主城区河段泥沙冲淤变化

前文已述，20 世纪 90 年代以来，长江上游来沙已明显减少，尤其是嘉陵江的梯级渠化使得北碚站 1992 - 2003 年平均输沙量仅为多年平均输沙量的 29.2 %，且还在不断变化之中。为便于比较，本文选择了三峡工程初步设计阶段的 60 系列及水沙调节后的上游建库系列，分别就泥沙冲淤过程及重点滩段的冲淤分布讨论其变化。

4.1　淤积量

表 3 给出了重庆主城区河段在三峡水库运行 100 年的淤积量，图 2 给出了相应淤积量随时间的变化过程。可见：①若上游来水来沙为 60 系列，水库运行 20 年，川江茄子溪至铜田坝河段淤积了 6 307.3 万 m^3；上游水沙调节后，即上游建库后，该河段淤积了 1 695.1 万 m^3，淤积量仅为 60 系列的 26.9 %。嘉陵江井口至口门河段，60 系列淤积量为 6 894.2 万 m^3；上游水沙调节后，该河段淤积了 932.4 万 m^3，淤积量仅为 60 系列的 13.5 %。②水库运行 60 年，60 系列川江茄子溪至铜田坝河段淤积了 15 541.8 万 m^3，上游水沙调节后，即上游建库后，该河段淤积了 2 331.1 万 m^3，淤积量仅为 60 系列的 20.7 %；嘉陵江井口至口门河段，60 系列淤积量为 13 630.7 万 m^3，上游水沙调节后，该河段淤积了 1 508.8 万 m^3，淤积量仅为 60 系列的 11.1 %。③水库运行 100 年，川江茄子溪至铜田坝河段淤积了 22 924.1 万 m^3，上游水沙调节后，即上游建库后，该河段淤积了 3 984.3万 m^3，淤积量仅为 60 系列的 17.4 %；嘉陵江井口至口门河段，60 系列淤积量为 17 087.0 万 m^3，上游水沙调节后，该河段淤积了 1 766.5 万 m^3，淤积量仅为 60 系列的 10.3 %。

表 3　重庆主城区河段在三峡水库运用不同年限的淤积量　　万 m^3

Table 3　Ddeposition amount of the Chongqin reach in different years after the impoundment of Three Gorges Project

三峡水库运行 / a	川江茄子溪 - 铜田坝			嘉陵江井口 - 口门		
	60 系列 (1)	上游建库系列 (2)	$P_{川}$/ % (2) / (1) ×100 %	60 系列 (3)	上游建库系列 (4)	$P_{嘉}$/ % (4) / (3) ×100 %
20	6 307.3	1 695.1	26.9	6 894.2	932.4	13.5
40	11 239.7	2 331.1	20.7	10 958.1	1 308.0	11.9
60	15 541.8	2 652.9	17.1	13 630.7	1 508.8	11.1
80	19 228.6	2 915.4	15.2	15 574.3	1 640.7	10.5
100	22 924.1	3 984.3	17.4	17 087.0	1 766.5	10.3

淤积量随时间的变化规律为：汛后 10～11 月水库蓄水，坝前水位由 145 m 逐步抬至正常蓄水位 175 m 时，本河段水位壅高，流速减小，挟沙能力减弱，泥沙淤积；每年的汛前，坝前水位降至防洪限制水位 145 m，本河段水位几乎没有壅高，本河段主槽河床微冲。因此，淤积量过程每年均有冲淤交替的变化，总体上呈上升趋势，淤积主要在 10 月至次年的 5 月，水库消落冲刷时间则为 6～9 月，这充分体现了水库蓄清排浑的功能，以保持三峡水库的有效库容。

图 3 给出了茄子溪至铜田坝河段上游建库系列淤积量占 60 系列淤积量随时间的变化过程。可见，上游水沙调节后泥沙淤积量明显小于 60 系列，该河段上游建库水沙系列淤积量仅相当于 60 系列的 15.0 %～27.3 %。究其原因，二者朱沱站年均来流量变化不大，但上游建库后含沙量仅 0.48 kg/m^3，为 60 系列的 39.3 %；含沙量粒径明显减小。上游建库后朱沱 D_{50}为 0.018 mm。悬沙粒径变细导致沉速减小，使得水流挟沙能力进一步增加，泥沙淤积的机率更小。同样，嘉陵江井口 - 口门河段上游建库水沙系列淤积量仅相当于 60 系列的 10.3 %～13.5 %，北碚站年均来流量变化也不大，但上游建库后含沙量仅 0.55 kg/m^3，为 60 系列的 23.9 %。

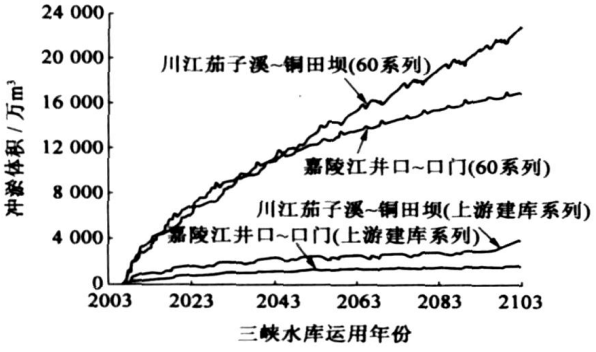

图 2 重庆主城区河段冲淤量随时间的变化过程

Fig. 2 Change of amount of deposition and erosion in Chongqing reach with time

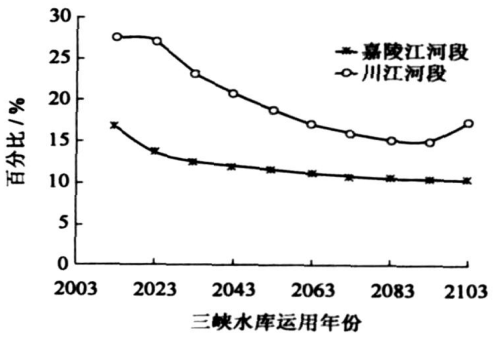

图 3 重庆主城区河段上游建库系列淤积量占 60 系列淤积量百分数随时间的变化

Fig. 3 Percent ratio of the deposition amount of the reservoir construction series to that of the 60 series

4.2 淤积部位

图 4 给出了 60 系列及上游建库系列水沙条件下，重庆主城区河段在三峡工程运行 100 年后的淤积分布图。可见，60 水沙系列条件下，该河段淤积比较严重，淤积后的 175 m 等高线河宽相当于建库前的 60 %～70 %，即泥沙淤积占居原河宽约 30 %～40 %。淤积主要位于岸线凹凸不平的弯沱、回流区及河道的宽浅河段，淤积后

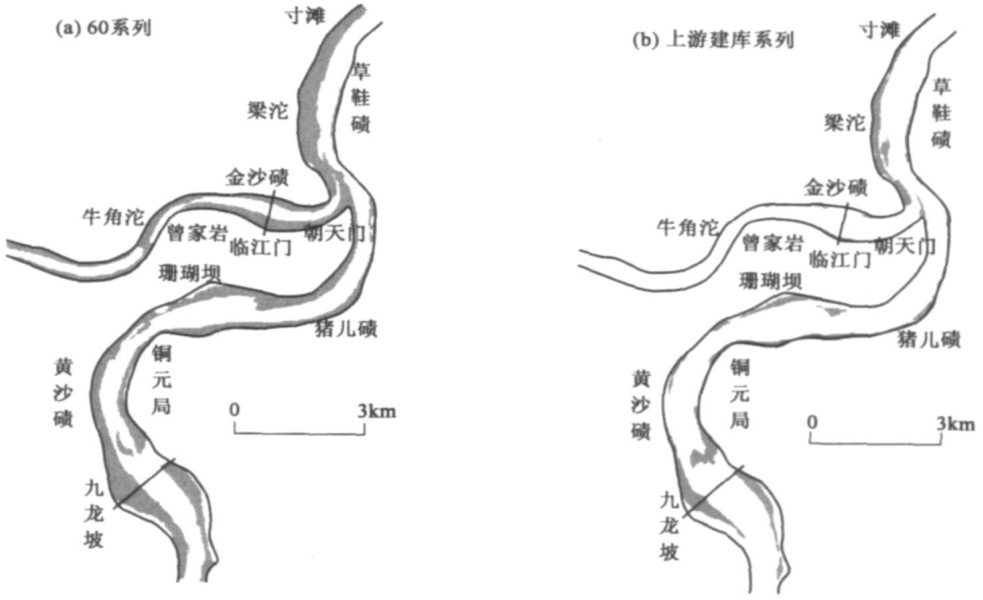

图 4 三峡工程运行 100 年重庆主城区河段的河床淤积分布图

Fig. 4 Deposition distribution of the Chongqing reach after the 100 years impoundment of Three Gorges Project

的河床岸线更趋平顺。上游建库系列水沙条件下，仅局部岸线凹凸不平的弯沱有少量泥沙淤积，其余河段几乎没有泥沙淤积，这对三峡水库有效库容的保持及主城区河段岸线的使用非常有利。文中仅仅考虑了溪洛渡及向家坝水电站的水沙调节作用，若上游继续建设百鹤滩、乌东德等水电站，上游水沙继续调节，再加上长江流域持续的水土保持工程，可以预见，主城区河段的泥沙淤积问题还将进一步减缓。

5　结　　论

(1) 在分析三峡工程变动回水区水沙特性的基础上，应用笔者建立的适合多连通域的贴体正交曲线坐标系下的二维水沙数学模型，进行了三峡工程初期蓄水后的验证计算，计算的重庆主城区河段冲淤量及冲淤部位与南京水利科学院长河段物理模型试验成果吻合较好。在此基础上，选择了三峡工程初步设计阶段的 60 系列及水沙调节后的上游建库(金沙江溪洛渡、向家坝水库及嘉陵江亭子口水库)系列，研究了上游不同来水来沙条件下三峡工程变动回水区泥沙冲淤时空变化规律。

(2) 计算结果表明，60 系列情况下，三峡水库运用 100 年，川江茄子溪至铜田坝 38.6 km 河段淤积了 22 924.1 万 m^3，上游水沙调节后，即上游建库后，该河段淤积了 3 984.3 万 m^3，淤积量仅为 60 系列的 17.4 %；嘉陵江井口至汇合口 25.0 km 河段，60 系列淤积量为 17 087.0 万 m^3，上游水沙调节后，该河段淤积了 1 766.5 万 m^3，淤积量仅为 60 系列的 10.3 %。60 水沙系列条件下，淤积比较严重，泥沙淤积占居原河宽约 30 %～40 %，淤积主要位于岸线凹凸不平的弯沱、回流区及河道的宽浅河段，淤积后的河床岸线更趋平顺。上游水沙调节后，仅局部岸线凹凸不平的弯沱有少量泥沙淤积，其余河段几乎没有泥沙淤积，这对三峡水库有效库容的保持及主城区河段岸线的利用有利。

(3) 由于紊流及泥沙运动规律极为复杂，文中有关问题还有待研究与完善。随着长江上游水土保持及水电开发建设，上游来沙量还在发生变化，建议进一步开展新的水沙条件下三峡工程变动回水区泥沙冲淤、对重庆洪水位及港口航道的影响研究。

致谢：研究过程中，得到韩其为院士的指导与帮助，特此致谢。

参考文献：

[1] 窦国仁，万声淦，陆长石. 三峡工程变动回水区泥沙淤积的试验研究[J]. 水利水运科学研究，1995，(4)：327 - 335. (DOU Guo-ren，WAN Sheng-gan，LU Chang-shi. Investigation on sedimentation in varying backwater zone of Three Gorges Project[J]. Journal of Nanjing Hydraulic Research Institute，1995，(4)：327 - 335. (in Chinese))

[2] 窦国仁，万声淦，陆长石，等. 长江三峡工程变动回水区长河段泥沙模型 175 m 方案试验研究报告[R]. 南京：南京水利科学研究院，1988. (DOU Guo-ren，WAN Sheng-gan，LU Chang-shi，et al. Study on sediment physical model on 175 m scheme for long reach of fluctuating backwater zone of Three Gorges Project[R]. Nanjing：Nanjing Hydraulic Research Institute，1988. (in Chinese))

[3] 韩其为，何明民. 论三峡水库泥沙淤积控制 ——处理三峡水库泥沙的策略与措施[J]. 泥沙研究，1996，(1)：1 - 19. (HAN Qi-wei，HE Ming-min. Sedimentation control of the Three Gorges Reservoir[J]. Journal of Sediment Research，1996，(1)：1 - 19. (in Chinese))

[4] 毛继新. 上游修建骨干水库对三峡水库入库水沙条件的影响[R]. 北京：中国水利水电科学研究院，2005. (MAO Ji-xin. Effects on water and sediment conditions of TGP by the construction of large-sized reservoirs on the upper reach of the Yangtze River[R]. Beijing：China Institute of Water Resources and Hydropower Research，2005. (in Chinese))

[5] 王桂仙，陈稚聪. 嘉陵江入汇对长江重庆河段影响的分析[J]. 泥沙研究，1987(4)：1 - 11. (WANG Gui-xian，CHEN Zhi-cong. Analysis of the effect of inflow of Jialingjiang River on Chongqing Reach in Yangtze River[J]. Journal of Sediment Research，1987(4)：1 - 11. (in Chinese))

[6] 陆永军. 支流河口水沙运动的二维数学模型研究 ——以长江上游的嘉陵江河口为例[J]. 水利学报，1998(10)：60 - 68. (LU Yong-jun. Study on 2D mathematical model of water and sediment movement at the branch river estuary[J]. Journal of Hydraulic Engineering，1998(10)：60 - 68. (in Chinese))

[7] LU Yong-jun，CHEN Guo-xiang. A non-uniform sediment transport model with the boundary-fitting orthogonal coordinate system[J]. Journal of

Hydrodynamics: Ser. B, 2002, 14(1): 64 - 68.

[8] 陆永军, 郝嘉凌, 李浩麟. 城市江堤外移工程对防洪影响研究[J]. 水科学进展, 2003, 14(2): 197 - 202. (LU Yong-jun, HAO Jia-ling, LI Hao-lin. Effects of levee realignment on flood control in unban area[J]. Advances in Water Science, 2003, 14(2): 197 - 202. in Chinese))

[9] 陆永军, 王兆印, 左利钦. 长江中游瓦口子至马家咀河段二维水沙数学模型[J]. 水科学进展, 2006. 17(2): 227 - 234. (LU Yong-jun, WANG Zhao-yin, ZUO Li-qin. 2D mathematical model for water-sediment between Wakouzi-Majiazui reach in the middle reaches of the Yangtze River[J]. Advances in WaterScience, 2006, 17(2): 227 - 234. (in Chinese))

[10] 陆永军. 三峡工程第八专题变动回水区港口与航道二维泥沙数学模型研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2007. (LU Yong-jun. 2D sediment model for the harbors and the navigation channel of the backwater area of TGP[R]. Nanjing: Report of Nanjing Hydraulic Research Institute, 2007. (in Chinese))

[11] LU Yong-jun, XU Cheng-wei, ZUO Li-qin, et al. Changes of sediment deposition and erosion at Chongqing Reach in backwater area of Three Gorges Project[C]. River Flow 2006, London: Taylor & Franeis Group plc, UK, 2006: 2179 - 2187.

Changes of sediment deposition and erosion at Chongqing reach in backwater area of Three Gorges Project after reservoir adjusting of the upstream in the Yangtze River*

LU Yong-jun[1], ZUO Li-qin[1], JI Rong-yao[1], MAO Ji-xin[2]

(1. *State Key Laboratory of Hydrology-Water Resourcesand Hydraulic Engineering Science, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing* 210029, *China*; 2. *China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing* 100044)

Abstract: In the upstream of the Yangtze River, the construction of the hydroelectric power projects, such as Xiluedu reservoir and Xiangjiaba reservoir, changes the hydrodynamic and sediment environment of the backwater area of the Three Gorges Project (TGP). After the adjusting of the runoff-sediment by the reservoirs in the upstream, the sediment deposition and erosion in the backwater area has the corresponding changes. In this paper, based on the water-sediment characteristics and fluvial process of the backwater area of the TGP, a 2D sediment mathematical model in the boundary fitting orthogonal curvilinear coordinate system is developed by the authors, then the rules of the space-time changes of the sediment deposition and erosion in the Chongqing reach is predicted in 100 years by using the model, and its effects on the harbors and navigation channels are detailedly analyzed. The Analysis of the results proves that, under the water-sediment conditions during 1960s, serious sediment deposition occurred mainly in the river sinuses, the recirculating zones and broad-shallow reach. After the construction of reservoirs, the sediment deposition volume decreases by 82.6 % in the Yangtze River and 89.7 % in the Jialingjiang River, compared with that of 1960s, which is advantageous for the maintenance of TGP and the development of Chongqing reach.

Key words: adjusting of water-sediment; backwater area; sediment deposition and erosion; mathematical model; Chongqing reach; Yangtze River; Jialingjiang River; Three Gorges project

* The study is financially suported by the National Natural Science Foundation of China (No. 50879047; 50779037) and the National Basic Research Program of China (No. 2003CB415206).