论文

三峡水库支流河口淤积及拦门沙形成风险研究

朱玲玲^{1*}, 许全喜¹, 张欧阳¹, 杨云平², 王伟¹

1. 长江水利委员会水文局, 武汉 430010;

2. 交通运输部天津水运工程科学研究所, 天津 300456

* E-mail: Zhull1012@foxmail.com

收稿日期: 2017-11-15; 接受日期: 2018-07-28; 网络版发表日期: 2019-02-25

国家重点研发计划(编号: 2016YFC0402301, 2016YFC0402101)和武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室开放基金(编号: 2016HLG02)资助项目

摘要 三峡水库库区分布有大小66条支流, 水库蓄水后部分支流河口泥沙大幅度沉积, 其形成拦门沙坎的可能性亟待揭示. 本文以多期次水下地形为基础, 辅以原型固定断面观测成果, 基于DEM数字高程模型, 计算和分析了三峡水库蓄水后库区支流河口段泥沙淤积量及其沿程、平面的分布特征, 研究了三峡库区主要支流河口泥沙堆积形态及成因. 结果表明, 三峡水库蓄水后2003年3月~2011年11月间库区支流累计淤积泥沙1.8亿 m^3 . 水库蓄水使得支流河口段水动力条件减弱是泥沙淤积的根本原因, 支流来沙、倒灌泥沙及交汇段干支流河势影响泥沙淤积幅度和范围. 三峡水库支流河口段淤积的泥沙以干流倒灌为主, 支流来沙堆积的现象也存在, 随着干支流来沙量趋于减少, 支流河口淤积形成拦门沙坎的风险较小.

关键词 三峡水库, 支流河口, 顶托作用, 泥沙淤积, 拦门沙

1 引言

水库库区支流相当于干流河道的横向延伸, 在水库正常运用情况下, 具有一定的库容, 同时因为水库蓄水带来的水位抬高也会衍生出航运等功能, 河口泥沙淤积对库容及其他功能都有一定影响. 三峡水库分布约66条支流, 对应145~175 m防洪库容约为55.4亿 m^3 , 约占总库容的25.0%. 三峡水库蓄水后, 2003年3月~2011年11月66条主要支流累计淤积1.8亿 m^3 , 占同期库区淤积总量的12.5%, 侵占水库防洪库容的0.03%. 淤积泥沙主要分布在口门附近10 km范围内, 最大淤积

厚度可达20 m, 部分支流河口段形成类似拦门沙的淤积体.

支流河口区域的拦门沙一旦形成, 侵蚀基面抬高, 对河口泄水排沙不利, 导致水位壅高, 泥沙沉积, 并发展产生溯源淤积. 一方面, 会一定程度上削弱水库的调节能力, 黄河的刘家峡、三门峡及小浪底水库^[1~3], 海河的官厅水库^[4], 以及汉江的丹江口水库支流^[5]都曾出现拦门沙坎形成后对应支流库容失效的情况. 另一方面, 三峡水库蓄水使得库区大小支流枯水期水位大幅度抬高, 通航条件改善, 为库区航运和经济发展提供了新机遇, 河口持续泥沙淤积对其通航条件也可能产

引用格式: 朱玲玲, 许全喜, 张欧阳, 等. 三峡水库支流河口淤积及拦门沙形成风险研究. 中国科学: 技术科学, 2019, 49: 552–564

Zhu L L, Xu Q X, Zhang O Y, et al. Sedimentation at estuary of 66 tributaries in the Three Gorges Reservoir (in Chinese). Sci Sin Tech, 2019, 49: 552–564, doi: 10.1360/N092017-00393

生不利影响. 关于成库后支流口门拦门沙的同类型研究多见于黄河、海河及汉江流域的水库内, 研究主要关注拦门沙形成的因素及其对水库运行的影响. 拦门沙形成的影响因素较为复杂, 包含异重流、来水来沙条件、支流地形条件、库区淤积形态和高程、支流口门位置、水库运行方式等多个方面^[4-6], 不同水库拦门沙形成的控制性因素也有所差异.

三峡水库支流河口段虽普遍淤积, 但目前尚未形成明显的拦门沙坎, 因此相关研究较少. 考虑到部分支流口门泥沙堆积幅度较大, 存在发展成为拦门沙的风险, 开展支流河口泥沙淤积规律研究是必要的. 本文以2003~2011年三峡水库库区66条支流水下地形的数字高程模型为基础, 分析掌握库区支流河口段泥沙淤积的总体特征, 重点研究渠溪河、小江、汤溪河、磨刀溪、梅溪河、大宁河、沿渡河、青港河及香溪河等观测资料较全的典型支流河口泥沙淤积的规律, 结合干支流水沙输移特性分析, 阐述三峡水库蓄水运行、干支流的来水来沙条件及口门河势等因素对于支流河口段泥沙淤积的影响, 初步探讨支流河口泥沙淤积发展成为拦门沙的风险.

2 研究区域及数据源

2.1 研究区域

三峡水库支流分布众多, 水库175 m试验性蓄水后, 回水末端上抵江津, 库区入汇大小支流共计66条, 支流沿程分布如图1, 含流域面积100 km²以上一级支

流44条, 流域面积为1000 km²以上约15条, 支流河谷纵比降在0.942‰~33.2‰之间, 基本属于山区河流的范围. 常年回水区内存有55条支流, 其中流域面积在1000 km²以上的有渠溪河、龙河、小江、汤溪河、磨刀溪、长滩河、梅溪河、火炮溪(大溪河、五马河)、大宁河、沿渡河(龙船河)、香溪河等; 变动回水区内存有11条支流, 包括库区最大的支流嘉陵江, 御临河、龙溪河和乌江流域面积也超过1000 km². 就入汇岸别来看, 有38条支流于干流于左岸入汇, 其余于右岸入汇; 就入汇主泓与干流深泓的交角来看, 左岸入汇支流有24条交角超过90°, 右岸入汇支流有12条交角超过90° (表1, 支流编号对应图1, 干支流入汇交角统计方式见3.2节).

2.2 数据源

本文全面收集了三峡水库库区主要支流的水文泥沙观测资料, 用于分析其水沙特性、相关关系变化特征. 三峡库区支流水文站多以流量观测为主, 小支流监测资料不全, 很多支流都是20世纪90年代后期设站, 监测断断续续. 水库常年回水区内存有龙河、大宁河、香溪河等有较为连续的泥沙观测资料, 磨刀溪、小江(无沙)有近年的观测资料, 木洞河、大洪河、龙溪河仅有零星的泥沙观测资料. 此次主要以龙河、大宁河、香溪河、磨刀溪的水文资料分析来代表库区支流水沙输移的总体变化特征. 各支流控制站及资料收集情况见表2, 考虑到三峡成库前后河口段泥沙淤积的差异性, 水沙分析以2003年为界统一划分为三峡水库

图1 (网络版彩图)三峡水库支流分布图

表 1 三峡水库库区66条支流基本特征

编号	支流名称	河口距坝里程(km)	入汇角(°)	岸别	编号	支流名称	河口距坝里程(km)	入汇角(°)	岸别	编号	支流名称	河口距坝里程(km)	入汇角(°)	岸别
1	靖江溪	3.8	80	左岸	23	小溪河	94	85	右岸	45	东河 ^{a)}	74.8	80	左岸
2	下小溪	4.9	95	左岸	24	鳊鱼溪	98.6	95	左岸	46	南河 ^{a)}	74.9	70	左岸
3	太平溪	5.8	90	左岸	25	下山羊溪	99.9	85	右岸	47	苕溪河	284	90	左岸
4	百岁溪	7.2	85	左岸	26	山羊溪	101	75	右岸	48	磨滩河	314	50	左岸
5	曲溪	7.7	75	右岸	27	抱龙河	105	90	右岸	49	武陵河	322	90	左岸
6	兰陵溪	11	85	右岸	28	神女溪	109	55	右岸	50	汝溪河	346	90	左岸
7	端坊溪	11.4	95	左岸	29	大宁河	123	110	左岸	51	戚家河	369	100	左岸
8	杉木溪	11.9	85	右岸	30	赤溪沟	130	95	左岸	52	长道河	373	95	左岸
9	横溪	14.3	90	左岸	31	乌峰溪	139	80	右岸	53	龙河	432	70	右岸
10	九畹溪	18.6	90	右岸	32	马腹溪	144	90	左岸	54	渠溪河	460	100	左岸
11	龙马溪	24.9	75	左岸	33	错开峡	145	90	右岸	55	乌江	485	75	右岸
12	香溪河	30.9	120	左岸	34	火炮溪	151	85	右岸	56	梨香溪	511	80	右岸
13	卜庄河	32.3	105	右岸	35	草堂河	158	105	左岸	57	龙溪河	533	95	左岸
14	旧州河	35.8	85	右岸	36	梅溪河	161	90	左岸	58	桃花溪	535	95	左岸
15	胜利河	39.6	80	左岸	37	木瓜溪	169	90	右岸	59	御临河	561	70	左岸
16	青港河	44.4	90	右岸	38	朱衣河	170	100	左岸	60	木洞河	574	90	右岸
17	陈家小河	46.9	85	左岸	39	上沟下沟	171	90	右岸	61	渔溪河	589	100	右岸
18	紫阳沟	69.8	110	左岸	40	长滩河	206	105	右岸	62	嘉陵江	611	50	左岸
19	沿渡河	76.5	95	左岸	41	磨刀溪	221	95	右岸	63	花溪河	630	95	右岸
20	纸厂沟	78.7	85	左岸	42	汤溪河	225	85	左岸	64	箭滩河	643	90	右岸
21	链子溪	81.6	85	右岸	43	小江	252	80	左岸	65	杨柳溪	660	90	左岸
22	富里磧	91.5	90	左岸	44	普里河 ^{a)}	60.1	75	左岸	66	綦江	666	60	右岸

a) 距小江河口的里程.

蓄水前和蓄水后两个时段, 设站以来的资料并未完全收集, 个别年份有缺失.

此外, 应三峡水库支流河口泥沙淤积特性的研究需要, 长江委水文局于2014年9月和2015年8月先后在渠溪河、磨刀溪、梅溪河及香溪河4条典型支流河口段开展了局部水文观测, 该资料可用于分析其口门附近的水沙输移特征, 有助于深化汛期干流对支流顶托作用和倒灌现象的认识.

三峡水库蓄水后库区支流河口的泥沙淤积特性研究, 主要基于三峡水库库区已有的2002年、2006年及2011年水下地形资料(其中2002年为三峡水库蓄水前, 天然状态下水位较低, 仅观测了水下主河槽的地形, 2006和2011年地形观测范围一致). 其中, 干流观测比例为1:5000, 支流为1:2000, 以及2003~2015年(支流观测为2004~2010年)固定断面观测资料. 所有的河道断

面、地形观测数据以及植被覆盖度统计数据均来源于长江委水文局.

3 支流河口泥沙淤积特征

水动力条件减弱和干流倒灌泥沙及支流来沙等综合影响下, 三峡水库蓄水后, 库区支流河口段泥沙淤积存在一定的必然性, 仅因局部边界(包括河床边界、水沙边界等)的差异, 各河口段的淤积幅度、范围有所不同. 2003~2011年三峡库区66条支流累计淤积泥沙量为1.80亿m³. 泥沙主要淤积在涪陵以下入汇的支流, 涪陵~坝址段分布的支流淤积量为1.69亿m³, 占三峡库区各支流总淤积量的94%, 占同期三峡库区淤积总量的12.5%. 淤积在145~175 m之间库容范围内的支流淤积量为0.066亿m³, 占三峡库区支流总淤积量的3.7%, 侵

表 2 三峡水库库区主要支流水文站基本观测情况

河名	水文站	断面地点	至河口 距离 (km)	控制流域 面积 (km ²)	控制 面积比 (%)	设站时间	测量项目	资料收集情况
龙 河	石柱(二)	石柱县南宾镇	81	898	31.7	1958.12	流量、沙	1960~2013 (泥沙 1963~2013)
大宁河	巫溪(二)	巫溪县城乡	72	2001	45.4	1972	流量、沙	1972~2013 (泥沙 1997~2013)
磨刀溪	长滩	万州区长滩镇	56	2034	66.7	2001.11	流量、沙	2004~2015
	龙角	四川省云阳县 龙角乡	23.4	2268	74.4	1958~1990	流量、沙	1960~1990 (泥沙 1970~1990)
香溪河	兴山	兴山县高阳镇	36	1900	59.1	1958.10	流量、沙	1961~2010 (泥沙 1974~2010)

占三峡水库防洪库容的0.03%。

3.1 淤积量厚度平面分布特征

以三峡水库库区水下地形原型观测资料为基础数据, 建立河段的数字高程模型(DEM), 将河道划分不同空间距离的矩形或三角形网格, 网格的尺寸一般与地形的测量比例匹配, 如1:10000的实测地形, 网格的尺寸一般为10 m, 采用直线插值和算术平均方法计算各网格的平均河床高程。对不同测次的高程模型进行叠

加, 各网格河床平均高程之间的差值即为冲淤厚度分布模型, 依据冲淤厚度分区, 绘制其变化值云图, 以表征泥沙冲淤厚度在平面上的分布情况^[7]。结果显示, 2002~2011年三峡水库支流河口段的泥沙淤积主要分布在口门附近的10 km范围内, 河口段的最大淤积厚度可达20 m (图2)。对比分布于库区河段不同位置的支流来看, 渠溪河河口距三峡大坝里程较远, 175 m试验性蓄水前, 处于变动回水区, 因此其2002~2006年淤积不明显, 2006~2011年也仅在河口局部有淤积。下游的

图 2 (网络版彩图)三峡水库库区典型支流河口附近冲淤厚度分布图. (a) 2003~2006年; (b) 2006~2011年

磨刀溪、梅溪河和香溪河自水库运行起就位于常年回水区内, 2002~2006年支流河口段都产生了较为明显的淤积现象, 最大淤积幅度在8~10 m以上, 表现出距坝址越近, 淤积幅度越大的规律; 2006~2011年, 磨刀溪和香溪河河口段的淤积减缓, 梅溪河河口淤积厚度也较2002~2006年偏小. 同时, 支流河口段的淤积厚度与干流的淤积厚度有一定相关性, 梅溪河汇口处干流河道放宽, 淤积厚度大, 是其2002年以来累计最大淤积厚度接近20 m的主要原因之一. 此外, 入汇交角对淤积范围有一定影响, 梅溪河入汇交角较小, 尽管其河口附近淤积幅度大, 但淤积上溯范围却不及上游的磨刀溪和下游的香溪河.

3.2 淤积量左右岸分布特征

三峡水库常年回水区涪陵~坝址段内共分布有55条支流, 其中33条自左岸入汇, 冲淤计算总河长为479 km, 淤积总量为1.389亿 m^3 , 淤积强度为29万 m^3/km ; 22条自右岸入汇, 冲淤计算总河长为258 km, 淤积总量为5420万 m^3 , 淤积强度为21万 m^3/km , 左岸入汇支流的淤积强度大于右岸. 同时, 分别统计左岸入汇、右岸入汇交角小于 90° 与大于 90° 的支流河口泥沙淤积强度(入汇交角统计方式如图3所示), 左右岸入汇的支流, 若入汇交角大于 90° , 即顶托效应更容易上溯或者发生倒灌的支流, 其淤积强度显然大于入汇交角小于 90° 的情况. 如左岸入汇的支流, 入汇交角大于 90° 河口段的淤积强度为45.0万 m^3/km (表3), 小于 90° 河口段的淤积强度仅6.89万 m^3/km , 同样地, 右岸入汇的支流, 入汇交角大于 90° 河口段的淤积强度为41.3万 m^3/km , 小于 90° 河口段的淤积强度仅7.27万 m^3/km . 以往研究表明, 三门峡水库渭河口的拦门沙坎的产生是黄河洪水倒灌造成的^[8], 小浪底水库支流大多时段也为异重流倒灌淤积^[9], 丹江口水库支流淤积则是干流倒灌与支流来沙淤积共同作用的结果^[5].

图3 (网络版彩图)支流入汇交角统计模式示意图

表3 不同入汇交角的支流河口段淤积强度统计

入汇岸别	冲淤计算总河长 (km)	入汇交角 ($^\circ$)	冲淤总量 (万 m^3)	单位河长冲淤量 (万 m^3/km)
左岸	195.7	>90	8800	45.0
	220.6	<90	1520	6.89
右岸	58.6	>90	2420	41.3
	152.6	<90	1110	7.27

果^[5], 异重流倒灌淤积是水库支流河口拦门沙形成的共性因素. 可以推断, 三峡水库支流河口泥沙淤积也与干流的倒灌关系密切, 干流水流挟泥沙倒灌支流, 并沿程落淤, 为其河口堆积提供物质来源, 尤其是对来沙极少的支流, 倒灌泥沙占淤积量的比例较大. 这一机理也很好解释了入汇交角与淤积强度之间的关系. 例如, 2010年上游来水量偏大, 汛期和水库高水位运行期内, 香溪河均观测到水流从干流倒灌进入的现象^[10].

4 支流河口泥沙淤积的形态响应

4.1 横断面形态响应

选取支流距河口最近的断面(位置示意如图3中的断面2), 分析其横断面淤积特征. 三峡水库蓄水后库区持续淤积, 干流河道的横断面形态变化主要表现为主河槽的平淤^[11], 部分宽谷段出现了全断面淤积的现象^[12]. 支流河口泥沙堆积带来的横断面形态调整效应与干流河道基本类似. 从库区9条支流河口附近断面的形态调整过程来看(图4), 除大宁河和沿渡河存在低滩淤积的现象以外, 其他的支流淤积都集中在主河槽内, 以主槽平淤为主. 其中, 位于常年回水区末端的渠溪河2009年之前淤积并不明显, 而其下游的各条支流河口淤积基本上都集中在2009年之前, 2009年之后河槽淤积幅度趋缓, 尤其是近坝的沿渡河、青港河和香溪河2009年之后河口断面主槽高程基本稳定. 一方面, 库区支流河口泥沙淤积与水库运行方式密切相关, 渠溪河在2009年之前位于变动回水区内, 因而泥沙堆积现象并不明显, 堆积主要集中在水库的常年回水区内; 另一方面, 2009年干流来沙量偏小, 三峡入库总沙量相较于2003~2008年均值偏少约15.2%, 2010年开始, 金沙江中下游梯级水库相继建成运行, 干流来沙量进一步减少^[13], 干流倒灌至支流的沙量相应减少, 是库区

图 4 (网络版彩图)三峡水库典型支流河口附近横断面套绘图

支流河口2009年以来淤积不明显的主要原因,也是影响三峡水库支流河口泥沙堆积情势以及是否会形成拦门沙坎的决定性因素之一。

4.2 纵剖面形态响应

三峡水库库区主要支流河口泥沙堆积带来的横断面形态调整表现为主河槽的平淤,淤积对于纵剖面形态的调整可以用深泓点高程的变化来表征。三峡水库蓄水后库区干流河道深泓纵剖面并未呈现淤积三角洲形态^[12]。然而,由于库区主要支流河口堆积以异重流倒灌泥沙为主,河口段纵剖面不同程度地出现三角洲形态(图5)。从库区常年回水区9条典型支流的深泓纵剖面形态变化过程来看,除渠溪河淤积幅度相对较小以外,其他支流河口15 km左右的河道范围内深泓点高程都不同幅度地淤积抬高,且越靠近河口,淤积幅度越大,呈现一定的倒三角特征。2004~2010年小江、汤溪河、梅溪河、大宁河和青港河河口断面深泓

点高程抬高幅度均超过10 m (表4)。与河口横断面的变化一致,河口段的深泓纵剖面淤积也主要集中在2009年以前,2009~2010年深泓纵剖面基本稳定或淤积幅度较小。

赵克玉和王小艳^[1]发现,小浪底水库运用初期支流在纵向剖面形成倒锥体,锥体淤积形状与支流原始比降有关,比降越大,支流淤积量越小。三峡水库常年回水区内,支流小江河口段的原始比降最小,2004年4月其河口约15 km范围内的深泓纵比降为1.4‰,相较于其他8条支流都显著偏小,但其河口段深泓淤积幅度及范围都偏大,与小浪底水库支流的情况相似。为此,针对图4中所示的支流,绘制其2004年4月河口段比降与2004~2010年深泓平均淤积幅度的相关关系如图6所示,也存在原始比降越小,河口段深泓平均淤积幅度越大的变化规律,反之亦然。这一特征关系亦可反映出倒灌泥沙的上溯过程,原始比降平缓,挟沙水流上溯需要克服的势能较小,泥沙容易上溯淤积,且河口段

图5 (网络版彩图)三峡水库库区典型支流河口段深泓淤积纵剖面图

的淤积分布相对均匀,如小江(图5(b));原始比降陡急,泥沙淤积基本上集中河口附近,如汤溪河、沿渡河和青港河,河床深泓原始比降分别为3.6‰、2.9‰和5.2‰,河口断面的淤积幅度显著地大于上游,且淤积上溯的范围较小,基本在6 km范围以内(图5(c), (g), (h)).

三峡水库蓄水后,库区干流河道和支流河口的泥沙淤积几乎是同时发生的,干流河道是支流的出口边界,两者的泥沙淤积幅度应存在一定的相关关系.根据图3所示的位置关系和表4中的数据,建立支流河口断面2的深泓淤积幅度与汇口下游的干流河道断面3深泓淤积幅度的关系(图7),可以发现,支流入汇口下游干流河道淤积幅度越大,对应支流口门断面的淤积幅度也越大,与汇口上游干流河道的淤积幅度则无明显关联.从绝对值的变化来看,支流河口深泓的淤积幅度一般比汇口附近干流河道的偏大,2006年前支流河口深泓的年均淤积速度较大,2006年之后淤积速度减缓.

5 支流河口泥沙淤积机理及趋势

水库成库后,库区干流及支流口门泥沙淤积具有普遍性,因流域沙量、局部河势和水库运行方式等的不同,支流口门泥沙淤积的幅度存在差异,部分淤积体会发展形成拦门沙.结合以往关于黄河流域、海河流域以及汉江已建水库支流拦门沙形成的研究成果,以及三峡水库支流2003年以来的实际淤积情况,认为支流口门泥沙堆积的机理主要体现为水动力条件变化和泥沙物质来源两大方面,其中关于泥沙来源又可分为流域来沙和干流倒灌输沙两类.

5.1 水动力条件减弱

三峡水库为典型的河道型水库,先后经历了135、156和175 m等蓄水阶段,坝前水位逐步抬高,对于其上游的库区河道而言,下边界水位抬高改变了天然状态下的水力特性,水深大幅度增大、水面比降和水流

表 4 典型支流口门附近深泓高程变化幅度统计(断面位置关系如图3)

测时	支流名称		乌江	渠溪河	小江	汤溪河	磨刀溪	梅溪河	大宁河	沿渡河	青港河	香溪河
	统计河长 (km)		10.1	15.4	15.0	14.3	15.2	15.6	17.3	15.8	15.2	14.3
2004.04	支流深泓	均值	/	/	99.1	118.7	108.3	106.2	88.8	92.1	107.1	80.2
	高程 (m)	断面2	132.1	134	92.7	92.1	93.0	89.6	74.8	70.9	72.2	65.2
	干流深泓	断面1	125.1	118.9	77.3	53.8	44.7	71.2	60.4	47.7	43.1	42.8
	高程 (m)	断面3	127.3	116.7	71.2	41.1	44.1	71.5	57.1	0	-1.5	-6.2
2006.11	支流深泓	均值	125.5	143.9	102.0	120.6	110.5	107.5	90.3	94.0	109.1	81.9
	高程 (m)	断面2	132.2	133.7	98.5	97.8	98.8	95.3	80.0	75.9	79.0	70.0
	干流深泓	断面1	123.9	118.9	81.3	53.4	45.6	77.2	63.5	52.4	44.8	49.8
	高程 (m)	断面3	127	117.2	74.4	41.4	45.1	80.9	61.6	-3.1	8.7	-6.8
2009.10	支流深泓	均值	126.0	144.7	103.1	121.4	111.3	109.5	91.8	95.6	110.9	83.4
	高程 (m)	断面2	132.6	135.3	102.6	101.4	101.4	100.3	84.2	78.6	83.3	73.5
	干流深泓	断面1	124.5	121.9	86.1	54.2	44.4	79.2	65.8	51.7	46.8	53.2
	高程 (m)	断面3	127	117.4	75.7	41.8	44.1	86.0	63.6	-2.1	12.1	-6.2
2010.10	支流深泓	均值	126.4	144.6	103.8	121.7	111.7	109.9	92.1	95.6	110.9	83.5
	高程 (m)	断面2	132.2	138	104.5	102.2	102.9	101.9	85.2	78.6	84.2	74.1
	干流深泓	断面1	124.4	123.9	82.5	55.7	45.6	80.0	66.4	51.3	47.5	53.7
	高程 (m)	断面3	127.2	118	83.1	42.6	45.8	86.9	64.0	-2.5	13.6	-7.0

图 6 (网络版彩图)河口段原始比降与深泓平均淤积幅度的关系

流速显著减小. 针对水面比降的变化, 135 m 围堰蓄水期, 清溪场至万县、万县至茅坪段年内基本遵循汛前枯水期水面比降最大, 汛期次之, 汛后最小的变化规律, 且越靠近坝址, 水面比降越小; 156 m 初期运行期, 清溪场以下河段年内水面比降的变化规律发生改变, 汛期比降显著地大于非汛期, 比降相对第一阶段同期显著减小, 沿程仍然保持减小的规律; 175 m 试验性蓄水期, 库区河道水面比降进一步减小, 其中万县至茅坪河段年内各月月均比降均小于 0.01‰, 非汛期水面比降接近 0 值(表5). 对于支流河口段, 汇流区干流水位高, 同样地控制了支流出口边界. 以磨刀溪和香溪河

图 7 (网络版彩图)河口断面与下游干流断面深泓淤积幅度关系

为例, 分别计算2012年磨刀溪长滩站、香溪河兴山站至河口的水面比降, 建立其与干流水位的相关关系(图8), 2012年三峡水库先后进行了汛前减淤调度、汛期削峰调度及汛后蓄水等运行方式^[14], 对于坝前水位有下降和抬升两种效应, 从而影响水面比降. 首先, 从年内整体看, 汛期水库的河道属性较强, 支流河口段的水面比降最大, 非汛期成库, 干流水位高, 河口段水面比降显著偏小, 其次, 从不同水库调度方式看, 汛期削峰调度和汛后蓄水会明显加大支流河口比降的下降速度及幅度, 减淤调度期与汛前坝前水位正常消落重叠, 对于支流河口比降的回升拉动效应并不明显. 可见,

表 5 三峡水库不同运行期内库区水面比降变化

河段	时段	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
清溪场~万县(‰)	2003~2005	0.071	0.071	0.074	0.076	0.080	0.051	0.054	0.053	0.052	0.033	0.016	0.010
	2006~2007	0.004	0.004	0.005	0.005	0.012	0.025	0.037	0.026	0.027	0.005	0.001	0.001
	2008~2011	0	0	0.001	0.001	0.002	0.009	0.018	0.018	0.011	0.002	0.001	0
万县~茅坪(‰)	2003~2005	0.036	0.035	0.035	0.034	0.030	0.006	0.012	0.011	0.012	0.004	0.001	0.001
	2006~2007	0.002	0.002	0.002	0.002	0.003	0.005	0.009	0.005	0.006	0.003	0.002	0.002
	2008~2011	0.002	0.002	0.002	0.002	0.003	0.004	0.007	0.007	0.005	0.002	0.002	0.002

图 8 (网络版彩图)2012年磨刀溪(a)和香溪河(b)河口段水面比降年内变化过程

水库蓄水显著地改变了库区河道及支流河口段的水力特性, 这是库区干流和支流河口附近泥沙普遍沉积的动力因素。

进一步将水力特性变化直接地反映到输沙能力上, 利用三峡水库库区一维河网数学模型^[15], 计算三峡水库首次蓄至175 m的2010年库区河道的挟沙力水流指标(u^3/h)的沿程变化情况(图9)。与水面比降变化类似, 三峡水库175 m试验性蓄水期间, 库区河道汛期的挟沙力水流指标值偏大, 汛前消落期次之, 汛后蓄水期最小。沿程变化来看, 汛期和非汛期在距坝约500 km范围以内(常年回水区), 挟沙力水流指标值基本在0.1和0.01以下, 区间内分布有52条支流; 距坝约500~600 km的河道内挟沙力水流指标值会有一定幅度的增加, 区间分布有9条支流。与此相应, 库区支流淤积总量的94%都集中在常年回水区范围内。

单从水动力条件来看, 三峡水库175 m正常蓄水位运行将逐步常态化, 即使水库年内短期的、小幅度的优化调度, 也并不会改变其库区输沙动力大大减弱的现状, 甚至诸如削峰调度等还可能进一步减小汛期的输沙动力, 这给水库干流河道和支流河口的泥沙长期沉积效应提供了基本条件。

5.2 支流来沙堆积

三峡水库支流的泥沙监测资料较少, 具有长系列泥沙观测资料的支流主要有磨刀溪、大宁河和香溪河, 按照相应的控制站输沙资料统计, 2003~2011年3条支流的流域输送至河口段的总沙量分别约为378.6万t, 988.9万t和232.8万t。基于地形DEM数据计算的同期, 这几条支流河口段的冲淤量分别为1233万 m^3 , 2653万 m^3 和1930万 m^3 , 结合长江委水文局对三峡水库库区泥

图 9 (网络版彩图)2010年不同时期三峡水库库区干流河道挟沙力水流指标 u^3/h 沿程变化

沙干容重调查结果^[16], 换算成淤积量分别约1202万t、2586万t和1881万t. 三峡水库蓄水前, 干流对支流的强顶托效应发生在汛期, 蓄水后全年干流都会对支流形成强顶托效应. 因此, 可以假设, 支流输入河口段的泥沙基本都沉积下来, 初步估算得到支流来沙量占河口段淤积量的比例, 磨刀溪、大宁河和香溪河的这一比值均在40%以下(表6). 可见, 仅针对三峡水库3条有泥沙观测资料的支流而言, 其河口段淤积的泥沙只有少部分是来源于流域, 换言之, 其河口段堆积的泥沙大部分是来源于干流的倒灌.

在此基础上, 通过研究发现, 三峡水库支流的输沙已经出现了减少的趋势. 自1989年国家实施“长治”工程以来, 三峡库区相继开展了“长江防护林工程”、“天然林保护”、“退耕还林(草)”等生态环境工程, 森林面积明显增长、水土流失得到有效控制^[17], 使得区间支流输沙减少. 使用1981~2006年AVHRR NDVI数据和2000~2015年的MODIS NDVI数据, 根据估算 $NNDVI_{veg}$ 和 $NNDVI_{soil}$ 的方法^[18,19], 进行三峡库区以及部分支流植被覆盖度变化的研究. 发现三峡水库蓄水后, 尤其是从2005年开始, 三峡区间及支流丰水期(5~10月)、枯水期(11月~次年4月)的植被覆盖度均有所增加(图10), 耕地面积减少, 林地面积增加; 加之区间支流水库控制面积增加, 拦沙能力增大, 流域下垫面条件的变化等均向有利于输沙量减少的方向变化, 三峡区间输沙量较之前大幅度减小, 区间及支流输沙总体减少的趋势较为明朗. 以磨刀溪、大宁河和香溪河为例, 三峡水库蓄水后, 其年均输沙量分别较蓄水期多年平均值偏少88.6%, 37.2%和71.0% (图11), 香溪河的减沙在水保措施之后的3~5 a就开始显现了^[20].

综上, 根据已有观测资料, 初步估算三峡水库支流自身来沙占其河口泥沙淤积量的比例不高, 再加上水土保持、水库拦沙及下垫面条件变化等因素影响下,

库区支流的来沙已经出现减少趋势, 并极可能将持续这种减少效应. 因此可以认为, 支流对于其河口泥沙淤积的补给作用十分有限, 这也是三峡水库175 m试验性蓄水后支流河口泥沙淤积速度相较于其初期运行期减缓的主要原因之一.

5.3 干流泥沙倒灌淤积

干流对支流的顶托作用增大到一定程度时, 就会发生倒灌支流的现象, 倒灌是顶托的一种极限状态. 三峡水库蓄水前, 库区河道为天然状态, 长江干流对于支流的强顶托作用一般只出现在来流较大、水位较高的汛期. 三峡水库蓄水后, 受下边界水位抬高的影响, 水库回水影响范围内的支流年内受干流顶托作用的频率普遍增大, 相应的干流倒灌支流的频率也增大. 以香溪河为例, 年内几乎各个时期都能观测到干流倒灌支流的现象^[21], 仅在不同条件下, 倒灌的强度和上溯的范围存在差异, 但大多数时期倒灌上溯的距离都能达到10 km左右, 与河口段的淤积分布特征较为一致. 2010年4月下旬和11月底在大宁河、磨刀溪和小江都观测到倒灌现象^[22]. 2015年8月, 长江委水文局沿程在渠溪河、磨刀溪、梅溪河和香溪河河口观测了局部水动力条件, 同一时期内, 干流的来流和水位基本一致的情况下, 干流对支流的顶托强度自上而下呈递增状态, 其中, 在渠溪河和磨刀溪未能观测到逆流, 但下游梅溪河和香溪分别观测到167和492 m³/s的逆流流量, 香溪河倒灌流几乎覆盖整个河口断面.

结合上文支流口门段深泓纵剖面淤积形态响应特征、淤积强度的左右岸分布特点以及支流自身来沙量占淤积量的比例计算结果, 基本可以推断, 三峡水库蓄水后, 库区支流河口淤积的泥沙主要是来源于干流倒灌. 2003年以来, 长江上游向家坝至寸滩段输沙量沿程递增, 寸滩以下的三峡库区段输沙量沿程减少, 且

表 6 2003~2011年三峡水库典型支流来沙占河口淤积量的比例

支流名称	控制站	计算河长 (km)	冲淤量		流域输沙量 (万t)	输沙量/淤积量 (%)
			DEM地形计算 (万m ³)	按干容重折算 (万t)		
磨刀溪	长滩	34.0	1233	1202	378.6	31.5
大宁河	巫溪	57.3	2653	2586	988.9	38.2
香溪河	兴山	41.6	1930	1881	232.8	12.4

图 10 (网络版彩图)三峡水库区间及典型支流植被覆盖度变化

图 11 (网络版彩图)三峡水库典型支流径流输沙年际变化特征

泥沙主要沉积在清溪场以下(图12), 这也与库区支流泥沙淤积的沿程分布规律一致。2012年之后, 受溪洛渡、向家坝水电站运用影响, 进入三峡水库库区的泥沙量大幅度减少, 干流控制站朱沱的2013~2016年平均输沙量相较于2003~2012年均值偏小75.9%(图12), 整个库区的泥沙沉积速度都趋于下降, 支流河口的泥沙淤积也将趋缓。

综上所述, 三峡水库蓄水造成支流河口下边界水位抬高、水动力条件减弱是其泥沙沉积的根本原因。水库不同蓄水位对应回水范围不同, 使得水库不同区域的支流河口泥沙淤积幅度存在差异, 同时这种差异还与支流河口的局部形态, 如原始河床比降、入汇交角等有关。支流河口段的泥沙来源于流域自身和干流倒灌, 其中倒灌泥沙占主要地位。随着长江上游干支

图 12 (网络版彩图) 2003~2016年长江上游控制站输沙量历年及多年均值变化。(a) 长江上游控制站历年输沙变化;(b) 长江上游控制站输沙多年均值变化

流梯级水电站工程相继建成运行, 支流及水库区间植被覆盖度的增加, 支流和三峡入库的泥沙都呈现出较为明显的减少趋势, 相应的支流河口的泥沙淤积速度也明显减缓, 其淤积形成拦门沙坎的风险不大。

6 总结与讨论

本文基于大量的DEM地形、固定断面、长系列水沙、局部水动力观测等多源数据, 明确了三峡水库蓄水后库区66条支流淤积总量及其平面、纵向等分布特征, 揭示了代表性支流河口横断面、纵剖面形态对泥沙淤积的响应规律。从水动力条件变化、支流来沙和库区倒灌泥沙3个方面, 阐述了支流河口泥沙淤积机理, 结合典型支流及三峡水库区间的产输沙条件变化和水库拦沙等情况, 对于干支流的来沙量进行了趋势性预估, 从而得到了关于三峡库区支流河口拦门沙淤积风险的判断。

2003~2011年三峡库区66条支流累计淤积泥沙1.80亿 m^3 。泥沙主要淤积在涪陵以下常年回水区的支流, 涪陵~坝址分布的支流淤积量占总量的94%, 占同期三峡库区干支流淤积总量的12.5%, 仅侵占三峡水库防洪库容的0.03%。支流的淤积多数集中在河口口

门附近的10 km范围内, 河口最大淤积厚度可达20 m。2009年之后, 河口泥沙淤积的速度有所减缓。河口淤积在横断面上表现为主槽平淤, 深泓纵剖面不同程度地呈现三角洲形态。泥沙淤积形态及上溯范围等与河口段原始比降、干支流交汇关系等有关。

三峡水库成库后, 一方面非汛期支流河口下边界水位抬高、比降调平、流速减小等是泥沙累积呈现淤积状态的的决定性因素, 并将长期保持当前水平, 甚至三峡水库诸如汛期削峰调度等运行方式还可能进一步减小汛期支流口门的水动力条件, 促进其汛期泥沙落淤。另一方面, 支流河口段泥沙淤积物主要来源于流域自身和干流倒灌, 且以干流倒灌泥沙为主。随着干、支流流域植被覆盖度的增加, 同时受上游梯级水库群的拦沙作用, 干、支流的来沙已然出现较为明显的减少趋势, 并总体将持续保持来沙较少的水平。综合两方面的考虑, 认为三峡水库库区支流河口淤积形成拦门沙的风险不大。

需要指出的是, 三峡区间暴雨产沙的现象突出, 遇特殊降水条件, 库区支流也可能存在输沙异常集中的现象, 从而加大河口泥沙堆积幅度, 因此, 对于现状堆积幅度较大的支流口门段, 仍应持续进行观测, 以便及时采取应对措施, 降低拦门沙形成风险。

参考文献

- 赵克玉, 王小艳. 小浪底水库运用初期支流淤积形态分析. 水土保持研究, 2005, 12: 168-171
- 陈书奎, 马怀宝, 李昆鹏, 等. 小浪底水库支流库容利用研究. 人民黄河, 2010, 32: 49-50
- 祁志峰, 屈章彬, 焦玉峰, 等. 小浪底水库库区支流东洋河及西阳河泥沙淤积规律分析. 水电能源科学, 2011, 29: 85-87
- 王延贵, 胡春宏. 官厅水库淤积特点及拦门沙整治措施. 泥沙研究, 2003, 6: 25-30
- 柳发忠, 王洪正, 杨凯, 等. 丹江口水库支流库区的淤积特点与问题. 人民长江, 2006, 37: 26-28
- 王婷, 陈书奎, 马怀宝, 等. 小浪底水库1999-2009年泥沙淤积分布特点. 泥沙研究, 2011, 5: 60-66
- 王伟, 陈泽方, 原松. 河床冲淤变化的CAD可视化分析与应用. 人民长江, 2014, 45: 99-101

- 8 程龙渊, 郭相秦, 张松林, 等. 黄河潼关站洪水组合对渭河北洛河的影响. 泥沙研究, 2004, 6: 31–35
- 9 王远见, 谢蔚, 王婷, 等. 小浪底水库库区支流拦门沙形成的主因分析. 泥沙研究, 2016, 6: 51–58
- 10 张宇, 刘德富, 纪道斌, 等. 干流倒灌异重流对香溪河库湾营养盐的补给作用. 环境科学, 2012, 33: 2621–2627
- 11 袁晶, 许全喜, 童辉. 三峡水库蓄水运用以来库区泥沙淤积特性研究. 水力发电学报, 2013, 32: 139–145
- 12 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. 水科学进展, 2015, 26: 676–685
- 13 朱玲玲, 陈翠华, 张继顺. 金沙江下游水沙变异及其宏观效应研究. 泥沙研究, 2016, 5: 20–27
- 14 朱玲玲, 杨霞, 许全喜. 上荆江枯水位对河床冲刷及水库调度的综合响应. 地理学报, 2017, 72: 1184–1194
- 15 董炳江, 陈显维, 许全喜. 三峡水库沙峰调度试验研究与思考. 人民长江, 2014, 45: 1–5
- 16 张娜, 代文良, 朱辉, 等. 三峡水库淤积物初期干容重试验初步分析. 人民长江, 2006, 37: 59–61
- 17 许全喜, 石国钰, 陈泽方. 长江上游近期水沙变化特点及其趋势分析. 水科学进展, 2004, 15: 420–426
- 18 李苗苗, 吴炳方, 颜长珍, 等. 密云水库上游植被覆盖度的遥感估算. 资源科学, 2004, 26: 153–159
- 19 甘春英, 王兮之, 李保生, 等. 连江流域近18年来植被覆盖度变化分析. 地理科学, 2011, 31: 1019–1024
- 20 刘惠英, 鲁向晖, 张平仓, 等. 三峡库区香溪河流域水沙关系变化及其驱动因素. 水土保持通报, 2015, 35: 17–21
- 21 纪道斌, 刘德富, 杨正健, 等. 三峡水库香溪河库湾水动力特性分析. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2010, 40: 101–112
- 22 胡念三, 刘德富, 纪道斌, 等. 三峡水库干流倒灌对支流库湾营养盐分布的影响. 环境科学与技术, 2012, 35: 6–11

Sedimentation at estuary of 66 tributaries in the Three Gorges Reservoir

ZHU LingLing¹, XU QuanXi¹, ZHANG OuYang¹, YANG YunPing² & WANG Wei¹

¹ Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, China;

² Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, Ministry of Transport, Tianjin 300456, China

There are about 66 tributaries distributed in the Three Gorges Reservoir (TGR) area. As obvious deposition has been observed at estuary of most tributaries estuary since the water-impoundment of TGR, the possibility of sedimentation leading to form entrance bar at estuary of tributaries should be highly concerned. Based on data of topography and cross-sections, the DEM digital elevation model is established to calculate the aggradation volume at the estuary of tributaries in TGR, also the scouring and silting thickness at estuary will be demonstrated. Changes of cross-sections and thalweg caused by aggradation are also studied. The results show that: (1) The aggradation volume at estuary of 66 tributaries in TGR was 180 million m³ from March 2003 to November 2011; (2) hydrodynamic conditions at estuary of tributaries weakened after the operation of TGR, which is the root cause of sediment deposition. The extent of sediment silting was affected by sediment from the tributaries and backward water from the mainstream, meanwhile the dynamic state of river course at estuary had an important influence on the range of aggradation; (3) sediment deposited at the estuary mainly derived from backward water of mainstream, and less from the tributaries. As sediment concentrations both in mainstream and tributaries decreased obviously and will be continually maintain a low level, there is little risk for the formation of entrance bar of tributaries in TGR.

Three Gorges Reservoir, tributary estuary, backwater effect, sedimentation, entrance bar

doi: [10.1360/N092017-00393](https://doi.org/10.1360/N092017-00393)