

三峡水库不同类型支流河口泥沙淤积成因及趋势

朱玲玲¹, 许全喜¹, 鄢丽丽²

(1. 长江水利委员会水文局, 武汉 430010; 2. 镇江市长江河道管理处, 镇江 202003)

摘要: 为揭示三峡水库库区不同类型支流河口泥沙淤积的内在机理和变化趋势, 本文充分利用水文、泥沙、固定断面和河道地形等原型观测资料, 从支流水沙输移规律和河口局部水沙分布特征出发, 研究了不同类型支流河口段泥沙淤积规律及主要影响因素的作用机理, 探讨其淤积趋势及形成拦门沙的风险。结果表明: 三峡水库蓄水后, 库区不同类型支流河口普遍淤积, 淤积范围及河道形态的变化各有特点; 水库蓄水造成水动力条件减弱是河口泥沙淤积的根本原因, 淤积幅度和范围主要取决于干支流来沙量和局部河势。在干支流来沙均明显减少的情况下, 三峡水库库区支流河口泥沙淤积速度显著下降, 形成拦门沙坎的可能性较小。

关键词: 三峡水库; 磨刀溪; 香溪河; 顶托作用; 泥沙淤积

DOI: 10.11821/dlxb201901010

1 引言

三峡水库自2010年开始连续蓄至175 m正常蓄水位, 尾水抵达江津附近, 库区范围内共分布有66条支流, 其中流域面积超过100 km²的一级支流占比66.7%。支流相当于干流河道的横向延伸, 三峡水库175 m正常蓄水位下, 库区支流防洪总库容约为55.4 m³, 约占水库总库容的四分之一, 对于水库防洪效益的发挥具有重要的作用。三峡水库蓄水后, 库区拦截上游来沙, 干流河道和支流河口附近泥沙淤积明显。根据实测水下地形计算, 2003-2011年三峡水库库区支流河口段泥沙淤积总量约1.8亿m³, 约占同期库区泥沙淤积总量的12.5%, 侵占水库防洪库容的0.03%。支流淤积范围一般在距河口20 km的范围内, 局部淤积厚度达20 m以上, 淤积纵向呈倒锥形分布, 部分支流口门段深泓基本淤平, 有可能形成拦门沙坎。

已有关于水库库区支流河口泥沙淤积规律、拦门沙坎形成条件及机理等方面的研究多见于黄河、汉江及海河等流域, 如小浪底^[1-2]、三门峡、丹江口^[3]、官厅^[4]等, 水库蓄水后都发生了支流河口淤积形成拦门沙坎的现象, 其影响因素不外乎水库运行方式、来水来沙条件、河口河势条件等几类^[1, 5-6], 而拦门沙坎形成对水库库容、支流航运和防洪^[7-9]等都会造成不利影响, 也有部分水库试图通过优化调度来减缓拦门沙坎形成速度或加大河口泥沙冲刷, 但效果并不明显^[10], 拦门沙坎一旦形成, 势必要通过疏浚、挖泥等工程措施来进行治理^[4]。三峡水库库区具有范围大、支流多且库容占比高等特点, 其支流河口泥沙累积淤积的影响不可忽视。目前, 有关三峡水库库区支流的研究多集中在水动力条件

收稿日期: 2018-04-25; 修订日期: 2018-12-14

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0402301); 三峡工程泥沙重大问题研究项目(ZZ2018013001F) [Foundation: National Key R&D Program of China, No.2016YFC0402301; Research on the Major Sediment Problems of the Three Gorges Project, No.ZZ2018013001F]

通讯作者: 朱玲玲(1984-), 女, 江西鄱阳人, 博士, 高级工程师, 主要从事河道演变及数值模拟研究。

E-mail: Zhull1012@foxmail.com

变化^[11-12]、水库蓄水的生态环境效应^[13-14]等方面。三峡库区支流尚未淤积形成拦门沙坎,有关支流河口泥沙淤积方面的研究十分少见。然而目前部分支流口门泥沙堆积幅度超过预期,甚至有可能继续发展形成拦门沙坎,开展支流河口泥沙淤积规律方面的研究是迫切和重要的。本文以三峡水库库区不同类型的支流磨刀溪和香溪河为例,充分对比分析三峡水库蓄水后两条支流河口泥沙的主要特点,研究支流河口泥沙淤积的共性规律和个体差异,阐述水库运行方式、干支流水沙条件及口门河段河势特征等因素对于不同支流河口泥沙淤积的影响,基于对水库可能优化调度方式和干支流水沙条件变化的预判,初步探讨三峡库区不同类型支流河口泥沙淤积的发展趋势。

2 研究区域与数据来源

2.1 研究区域

三峡库区具有典型的山区河流特征,支流分布众多,水库蓄至 175 m 正常蓄水位后,库区范围内共有 66 条支流汇入。本文研究对象磨刀溪和香溪河属于不同类型的支流,其区别体现在距坝里程、入汇岸别和交角、河口局部河势及流域特性等方面,具体表现为:磨刀溪河长约 189 km,流域面积 3049 km²,河流平均比降为 4.87‰,于长江干流右岸入汇,汇口距三峡大坝坝址约 221 km,位于水库常年回水区内,河口附近干流河道形态单一顺直,支流河势蜿蜒。香溪河流域面积略大于磨刀溪,河长、河流比降则均较之偏小,于干流左岸侧入汇,汇口距三峡坝址仅 30.8 km,入汇交角为 120°,交汇段干流河道沿程河宽减小,支流河道相对顺直(图 1)。

2.2 数据来源

磨刀溪和香溪河水文、泥沙及河道地形等观测资料收集情况如表 1 所示。磨刀溪水沙分析数据主要来源于龙角水文站(观测截至 1990 年,控制流域面积的 74.4%)和长滩水文站(2001 年设立,位于龙角站上游约 32.6 km,控制流域面积较龙角站偏小 7.7 个百分点)。香溪河水沙分析数据主要来源于兴山水文站(1958 年设立,泥沙观测始于 1974 年,观测截至 2010 年)。三峡水库蓄水后,磨刀溪长滩站多年平均径流量、输沙量分别

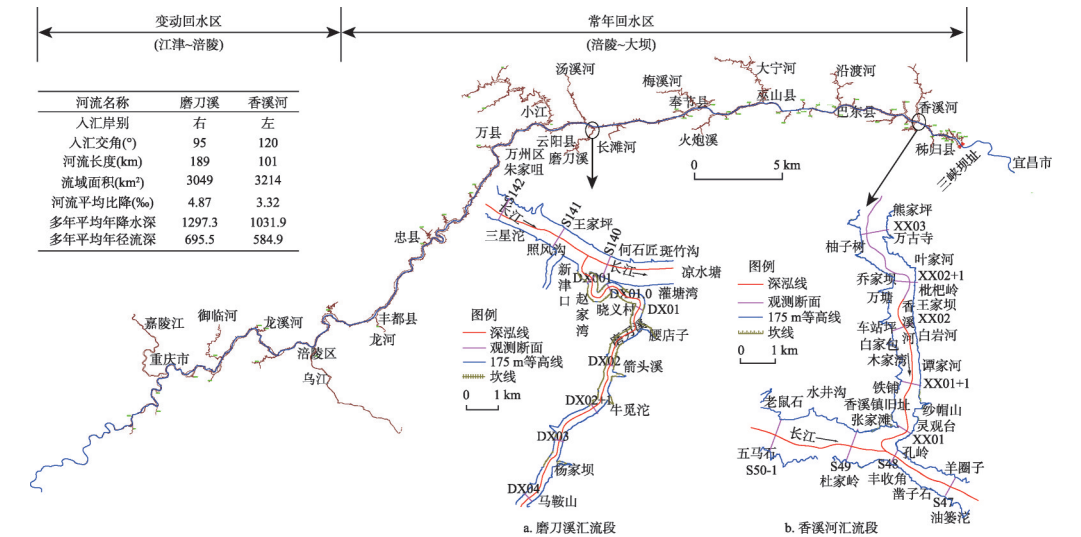


图 1 三峡水库库区及磨刀溪、香溪河口门河段河势
Fig. 1 Sketch of Three Gorges Reservoir and two tributaries estuary

表 1 三峡库区支流磨刀溪、香溪河水沙和地形观测资料收集情况表
Tab. 1 Compilation information of hydrological and topographic data

数据类型	观测内容	年份	资料来源
河道地形	水下地形	2002、2006、2011	长江委水文局
	固定断面	2004、2006、2009、2010、2012、2017	
水文泥沙	流量、含沙量	兴山：1958-2010 年流量、1974-2010 年含沙量	四川省水文局
		长滩：2004-2015 年流量、含沙量	
		龙角：1960-1990 年流量、1970-2010 年含沙量	
局部水流	流量、含沙量、流速	2014、2015	长江委水文局

为 10.2 亿 m³、35.9 万 t，年内汛期 5-10 月径流量占比为 73.9%，输沙量占全年的比例在 90%以上；香溪河兴山站多年平均径流量、输沙量分别为 10.3 亿 m³、19.6 万 t，水沙也集中在汛期输移。支流水文泥沙观测资料来源于四川省水文局。此外，长江委水文局于 2014 年 9 月、2015 年 8 月在两条支流河口段开展了局部水文观测，观测时段内干流对支流有较强的顶托作用，观测内容包括断面流速、水位、含沙量等，可用于分析顶托作用期河口局部水沙输移特性。

三峡水库蓄水后磨刀溪和香溪河口门泥沙淤积特征的研究，主要基于三峡库区（含支流河口段）2002 年、2006 年及 2011 年水下地形资料（其中 2002 年仅观测低水主河槽的地形，2006 年和 2011 年地形观测范围一致），干支流河道地形观测比例分别为 1:5000 和 1:2000；以及 2004-2017 年汛后固定断面观测资料（固定断面布置如图 1）。地形和固定断面观测数据均来源于长江委水文局。

3 支流水沙输移特性

3.1 水沙条件变化

1990 年之前磨刀溪龙角站年际间径流量略呈增加的趋势，输沙量年际变幅较大，趋势不明显；2003-2015 年磨刀溪长滩站年径流变化幅度较小，多年平均径流量为 10.2 亿 m³，呈下降趋势，输沙量减小明显，较 1959-1990 年龙角站均值减少 89.3%。2003 年前香溪河兴山站年际间径流量略呈减小趋势，输沙量年际变幅较大，略呈减少趋势；2003 之后，兴山站输沙量减小幅度也较大，2003-2010 年年均输沙量相较于 2003 年之前多年均值减少约 70.2%。可见，三峡水库蓄水后，磨刀溪和香溪河径流量变化不大、输沙量大幅度减少，水沙相关关系发生变化（图 2）。

3.2 河口局部水沙输移特性

对比分析 2014 年和 2015 年主汛期局部水文特征，磨刀溪口门断面（DX001）2 个测次的断面流量分别为 573 m³/s、537 m³/s（对应干流流量分别为 26200 m³/s、15900 m³/s），断面水位分别为 166.14 m、151.65 m。干流来流量大且水位偏高，对于磨刀溪来流的顶托作用较强，其口门断面的流速偏小。断面主流带贴近右岸侧的边滩，主河槽的流速较小，主河槽高程均在 120 m 以下，其水深均超过 40 m（图 3a），呈现流速小且水深大的特征。强顶托作用下，磨刀溪河口段上溯输沙能力衰减明显，河口支流断面含沙量与干流相差无几（表 2），且较上游各断面明显偏大，可以认为河口断面泥沙基本源自于干流倒灌。香溪河口门断面（XX01）2 个测次的断面流量分别为 221 m³/s、-492 m³/s（对应长江干流流量分别为 26400 m³/s、18300 m³/s，负值表示水流方向与图 1 所示流向相反），断面水位分别为 145.0 m、148.7 m。干流水位高或流量较大时，都会对香溪河形成强顶托作用，使其口门断面流速偏小，直至出现倒灌。顺流时，主河槽的流速较小；逆流

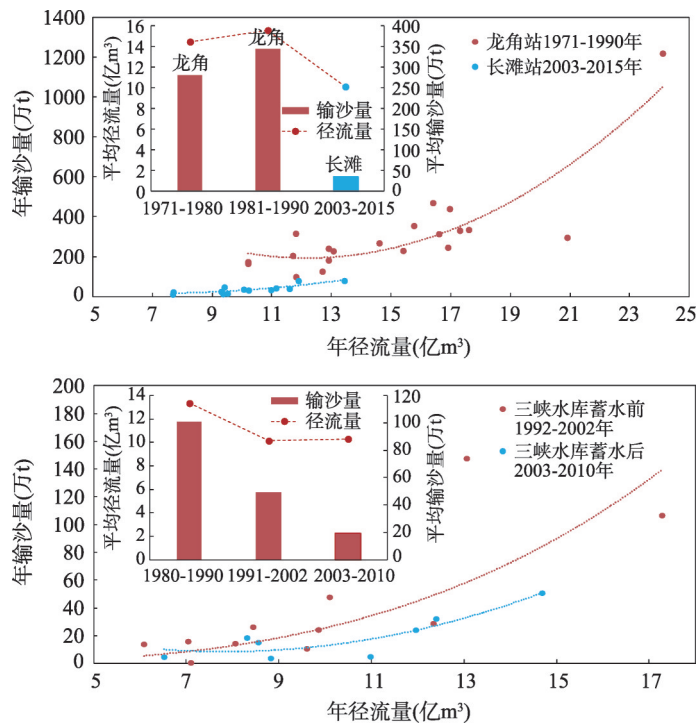


图2 三峡水库支流磨刀溪和香溪河径流输沙基本特征和相关关系

Fig. 2 Feature and correlation of annual runoff and sediment in Modao Creek and Xiangxi River

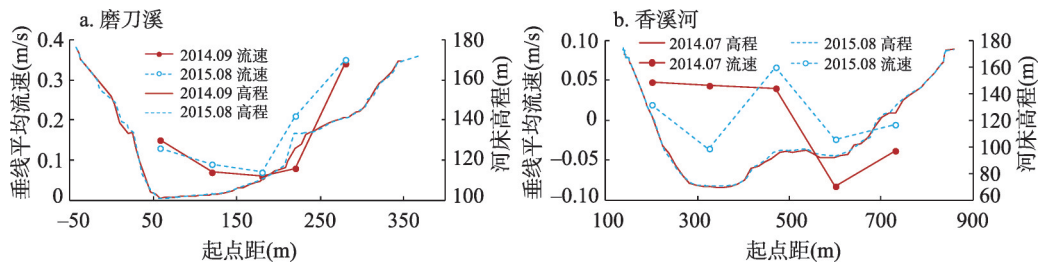


图3 三峡水库支流磨刀溪、香溪河口门断面流速(流向进入纸面)分布

Fig. 3 Flow velocity distribution of cross sections at Modao Creek and Xiangxi River mouth (the flow direction perpendicular to cross-section)

表2 三峡库区支流磨刀溪、香溪河河口段沿程含沙量变化统计

Tab. 2 Cross-section mean sediment concentration of Modao Creek and Xiangxi River

河流	距河口里程 (km)	断面平均含沙量(kg/s)		河流	距河口里程 (km)	断面平均含沙量(kg/s)	
		2014.09.16	2015.08.31			2014.07.03	2015.08.20
磨刀溪	9.36	0.008	0.009	香溪河	8.2	0.004	0.002
	6.91	0.008	0.014		6.1	0.003	0.003
	5.29	0.008	0.018		3.61	0.005	0.003
	3.47	0.007	0.018		1.97	0.006	0.005
	1.82	0.012	0.011		1.44	0.005	0.003
	0.6	0.029	0.023		0.62	0.008	0.007
长江干流	0	0.033	0.021	长江干流	0	0.025	0.01

时, 右岸侧低滩出现逆流区 (图 3b)。河口断面主河槽的河床高程基本在 80m 以下, 水深超过 65 m, 也具有流速小且水深大的特点。强顶托作用下, 香溪河河口段上溯输沙能力衰减明显, 河口支流断面含沙量与干流相近 (表 2), 且较上游各断面均明显偏大, 也可以认为河口支流的泥沙基本来源于干流倒灌。

河口局部输沙特征表明, 遇干流来流较大或水位较高时, 磨刀溪和香溪河河口都呈现出水深大、流速小的水力特征, 有利于泥沙落淤; 且无论磨刀溪、香溪河, 一方面河口段泥沙输移量沿程增大, 另一方面口门断面含沙量干支流极为相近, 符合倒灌输沙的基本特征。干流倒灌的泥沙沿程落淤, 是支流河口段泥沙堆积的重要来源。

4 支流河口泥沙淤积特性及成因

基于上述磨刀溪、香溪河河口段水沙输移的基本特性可知, 三峡水库蓄水前, 一方面汛期支流河口段存在水深大、流速小的水力特征, 当干流水位和流量达到一定幅度时, 还会出现倒灌流; 另一方面河口泥沙同时来源于支流和干流倒灌, 两者综合作用下, 河口段汛期泥沙处于淤积状态。三峡水库蓄水后, 库区支流河口段全年处于干流高水位顶托状态, 河口段年内泥沙淤积频率增大, 因而出现累积性淤积的现象。受河床边界、水沙边界及所处库区范围等差异的影响, 各支流河口附近的淤积幅度、范围有所不同。下文就磨刀溪、香溪河河口段的泥沙淤积特征及成因展开对比分析, 以明确不同支流泥沙淤积成因的共性规律和个体差异。

4.1 河口泥沙淤积特征

4.1.1 冲淤量及分布特征 三峡水库蓄水前 2002 年库区水下地形测量范围仅限于低水河槽, 较蓄水后 2006 年、2011 年显著偏小, 仅针对 2006-2011 年, 采用地形法, 计算在三峡大坝坝前 175 m 水位下, 支流河口段的泥沙淤积量。结果显示, 2006-2011 年磨刀溪河口支流段淤积量为 247 万 m³, 其中箭头溪 (距河口 5.27 km) 以下淤积量达 199 万 m³, 平均淤积强度为 37.8 万 m³/km, 箭头溪以上长约 5 km 的河段平均淤积强度为 9.32 万 m³/km, 显著小于下游河口段; 香溪河河口支流段淤积量为 241 万 m³, 其中枇杷岭 (距河口约 4.8 km) 以下淤积量达 192 万 m³, 平均淤积强度为 51.9 万 m³/km, 枇杷岭以上长约 3 km 的河段平均淤积强度为 16.9 万 m³/km, 也显著小于下游的河口段 (表 3)。可见, 磨刀溪和香溪河河口段泥沙淤积沿程分布的规律存在相似性, 都集中在距河口约 5 km 范围的河段内, 越往上游泥沙淤积强度越小, 符合倒灌泥沙淤积的分布特征。

通过建立三峡水库库区水下地形数字高程模型 (DEM), 对不同测次的高程模型进行叠加, 可得到冲淤厚度平面分布模型, 进而绘制出河口区域泥沙冲淤厚度变化值云图 (图 4)。三峡水库蓄水后, 2002-2006 年磨刀溪河口段深槽大幅度淤积, 至濯塘湾附近淤积厚度大多在 5 m 以上, 2006-2011 年淤积幅度减小, 但强淤积范围上延至箭头溪附近。汇流区支流河口段的泥沙淤积幅度大于干流河道。2002-2006 年香溪河河口段深槽部分开始淤积, 河口往上至谭家河附近淤积厚度为 3~5 m 左

表 3 2006-2011 年磨刀溪、香溪河河口段冲淤量统计表
Tab. 3 Erosion and deposition amount of the mouth reach of Modao Creek and Xiangxi River confluence to Yangtze River in 2006-2011

库区支流	河段范围	河长 (km)	淤积总量 (万 m ³)	淤积强度 (万 m ³ /km)
磨刀溪	马鞍山—箭头溪	5.15	48	9.32
	箭头溪—河口	5.27	199	37.8
	马鞍山—河口	10.42	247	23.7
香溪河	万古寺—枇杷岭	2.9	49	16.9
	枇杷岭—孔岭	3.7	192	51.9
	万古寺—孔岭	6.6	241	36.5

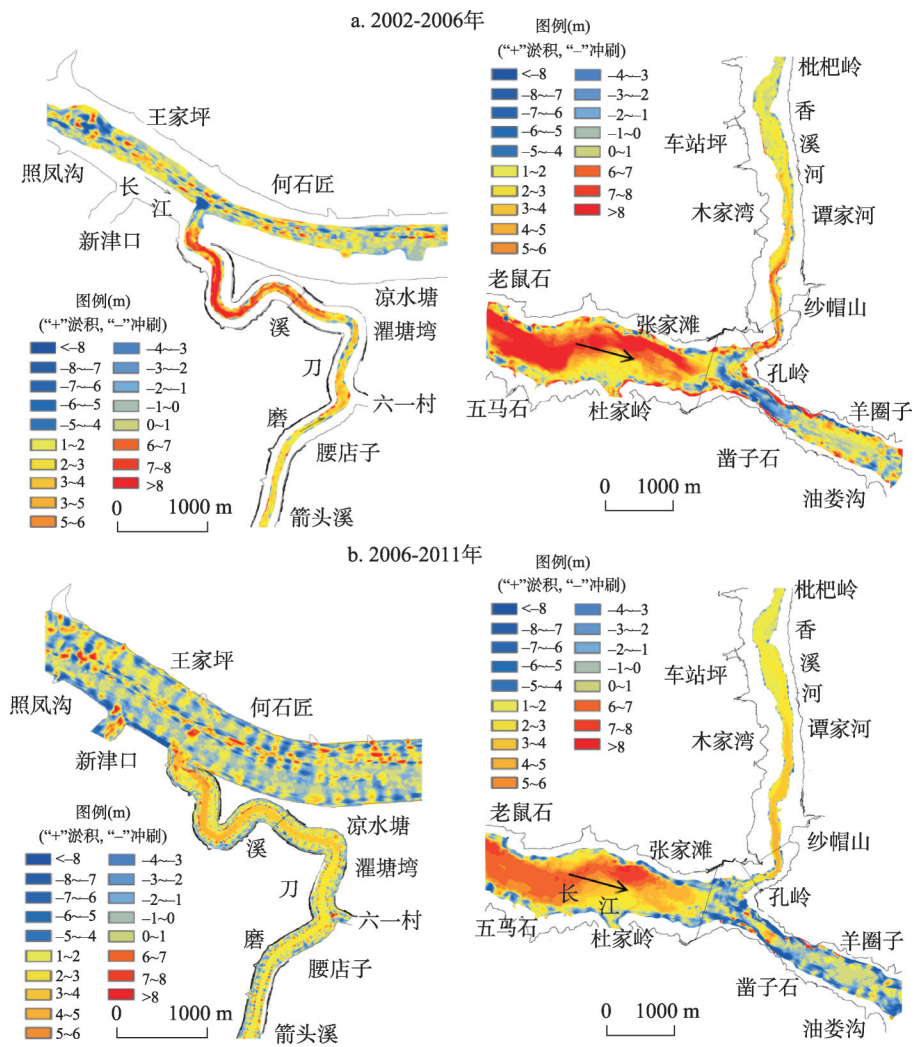


图 4 三峡水库磨刀溪和香溪河口附近冲淤厚度分布图

Fig. 4 Scouring and silting thickness distribution around the reach of Modao Creek and Xiangxi River mouth in 2002-2011

右，谭家河往上游淤积幅度略小；2006-2011年淤积幅度减小，淤积范围上延不明显，自河口至谭家河附近淤积幅度增加至5~8 m。与磨刀溪不同，香溪河入汇干流段上游淤积明显。三峡水库蓄水后，库区干流河道淤积呈“宽多窄少”的规律^[15-16]，对应地香溪河汇口上游干流河道放宽，淤积幅度也偏大，汇口下游河槽束窄，淤积则不明显。

3.1.2 河道形态调整响应 (1) 河口横断面形态。三峡水库蓄水以来，库区干流河道大幅度的淤积，库区支流河口区域淤积也较为明显，且干支流淤积存在许多相似性。以横断面变化为例，磨刀溪和香溪河口门断面淤积较为明显，且以主槽平淤为主，磨刀溪口门断面狭窄，无明显滩体，香溪河河口断面较宽，右岸侧分布有一定范围的滩体，高程在140 m以下，无明显淤积。统计主槽内泥沙淤积幅度来看（图5a），磨刀溪口门断面宽约80 m的主河槽2004-2017年平均淤积厚度（ $\bar{d_z}$ ，下同）为11.2 m，最大淤积厚度（ $d_{z_{max}}$ ，下同）为12.9 m，其中，水库初期运行期2004-2006年，其年均淤积厚度为1.53 m，水库蓄水位达到175 m以来的2010-2017年，其年均淤积厚度下降至0.410 m，尤其是金沙江中下游梯级水库运行后的2012-2017年，其年均淤积厚度仅0.266 m，淤积速度明显减

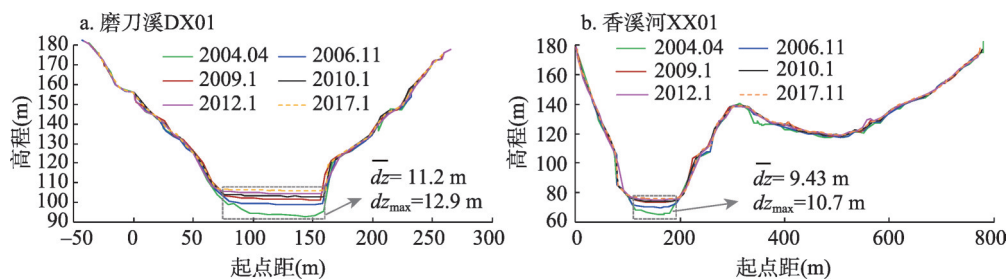


图5 磨刀溪、香溪河河口横断面冲淤变化

Fig. 5 Cross-section erosion-deposition changes of Modao Creek and Xiangxi River mouth

缓。香溪河口门断面宽约80 m的主河槽2004-2017年平均淤积厚度为9.43 m, 最大淤积厚度为10.7 m, 其中水库运行初期2004-2006年, 其年均淤积厚度为1.96 m, 大于磨刀溪, 2010-2017年其年均淤积厚度下降至0.274 m, 2012-2017年其年均淤积厚度仅0.066 m, 其淤积减缓较磨刀溪更为明显, 因而累积和最大淤积幅度均不及磨刀溪(图5b)。

(2) 河口段深泓纵剖面形态。磨刀溪和香溪河河口段深泓纵剖面淤积形态变化规律也相似, 即越靠近河口淤积幅度越大, 越往上游淤积幅度越小, 淤积体呈倒锥形, 仅磨刀溪淤积上延的幅度更大一些, 香溪河河口深泓淤积集中在距河口7 km范围内(图6)。2004-2017年两条支流河口约15 km的河段深泓平均淤积幅度基本相当, 淤积厚度分别为4.73 m和4.70 m, 磨刀溪河口段深泓最大淤积厚度为13.0 m, 香溪河则为10.7 m。两条支流河口5 km范围内深泓基本淤平, 绝对高程分别在110 m和80 m以下(在三峡坝前最低水位145 m情况下, 支流河口仍保持有35 m以上的水深), 纵剖面比降分别由2004年的1.76‰、1.69‰下降至2017年的0.280‰、0.348‰。淤积发展过程略有差异, 三峡水库135 m运行期内(2006年前), 磨刀溪河口段深泓年平均淤积幅度为0.846 m, 2006-2010年年均淤积幅度下降至0.307 m, 2010-2017年则进一步下降至0.198 m; 类似地, 香溪河河口段2004-2006年河口段深泓年均淤积幅度为0.674 m, 2006-2010年和2010-2017年分别下降至0.404 m和0.198 m。依然是2010年之后香溪河河口段深泓年均淤积幅度减小速度较磨刀溪更快。

综合对比磨刀溪、香溪河河口横断面及河口段的深泓纵剖面淤积发展过程, 三峡水库库区支流的强淤积范围不大, 基本在距河口15 km的河道范围内, 以主河槽平淤为主要形式, 河口段深泓淤积幅度沿程增大, 出现倒锥形淤积体。淤积主要发生在水库初期运行期, 之后淤积速度逐渐下降, 2010年以来淤积减缓尤为明显, 且香溪河河口段淤积减缓的现象较磨刀溪更为突出。

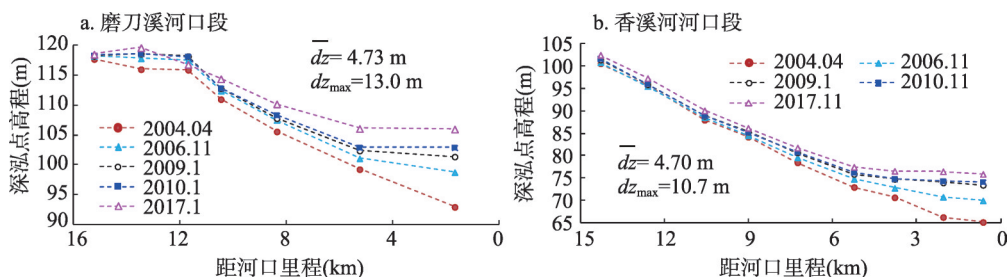


图6 磨刀溪、香溪河河口段深泓纵剖面冲淤变化

Fig. 6 Thalweg profile changes of Modao Creek and Xiangxi River mouth section

3.2 河口泥沙淤积成因

对于交汇河段，当一方来流较大或者水位较高时，会对另一方产生较强的顶托作用，且这种作用是相互的，强弱不断转换，存在时段效应，当顶托作用到达极限状态时，水流发生倒灌。三峡水库蓄水前，库区干流对支流的顶托作用在年内基本遵循“汛期强，非汛期弱”的变化规律，使得支流河口段泥沙“汛淤枯冲”，多年一般呈现冲淤相对平衡的状态。三峡水库蓄水后，水库汛期低水位运行，但来流量偏大，干流对支流仍处于强顶托状态；非汛期水库高水位运行，对支流的顶托作用也进入强效应阶段。换言之，水库蓄水使年内干流对支流顶托作用的频率显著增大，非汛期流速减小，挟沙能力明显下降，不仅无法将汛期淤积的泥沙带走，还可能继续汛期的淤积状态，从而导致河口泥沙累积性淤积，这是水库蓄水后河口段普遍淤积的内在机制。依据这一机制，认为影响三峡水库库区支流河口段泥沙淤积幅度和范围的主要因素有水动力条件、干支流输沙量及局部河势特征等方面。

3.2.1 水动力条件减弱的影响 三峡水库进入 175 m 试验性蓄水期以来，为充分发挥水库防洪效益，同时尽可能减少水库淤积及其蓄水对坝下游的影响等，先后开展了汛前减淤调度、汛期削峰调度及汛后提前蓄水等运行方式，对于坝前水位有下降和抬升两种效应，影响干流河道和支流河口段的水面比降。以 2012 年为例，统计年内不同时期及水库不同运行方式下磨刀溪河口段（长滩站至河口）和香溪河河口段（兴山站至河口）水面比降变化特征（表 4），首先，汛期库区河道水位低，磨刀溪、香溪河河口段的水面比降最大，非汛期受水库运行影响，库区干流河道水位明显抬高，支流河口段平均水位分别较汛期偏高 11.5 m、12.0 m，河口段水面比降减小明显，是年内比降最低的时期；其次，对比水库不同调度方式，汛后提前蓄水会加大支流河口比降的下降速度及幅度，比降值与非汛期基本持平，同时蓄水期上游来流仍较大，高水位和大流量更容易促进强顶托作用；减淤调度期与坝前水位正常消落重叠，对于支流河口段比降的回升拉动效应不明显；汛期削峰调度对距坝较远的磨刀溪河口段比降影响不明显，对距坝较近的香溪河河口段比降有减小效应。可见，三峡水库蓄水会造成非汛期支流河口段比降普遍减小，同时水库的优化调度方案也会小幅度地影响支流河口段比降的变化。

表 4 2012 年年内不同时期磨刀溪、香溪河河口段水面比降统计
Tab. 4 Water surface slope of Modao Creek and Xiangxi River mouth section in 2012

时段	万县流量(m ³ /s)	磨刀溪		香溪河	
		河口水位(m)	河口段比降(‰)	河口水位(m)	河口段比降(‰)
全年	13400	162.77	11.9	162.49	0.554
非汛期(1-4 月、11 月、12 月)	5470	168.53	10.9	168.50	-0.119
汛期(5-10 月)	21300	157.06	13.0	156.53	1.22
5 月 7 日-5 月 24 日(减淤调度期)	12700	156.26	13.2	156.07	0.254
7 月 5 日-7 月 27 日(削峰调度期)	40400	155.73	13.3	154.21	0.865
9 月 10 日-10 月 30 日(蓄水调度期)	17200	168.53	10.9	168.32	-0.127

比降减小直接造成流速减小，进一步分析挟沙能力的变化，汛期受干流来流量大的影响，顶托作用较强，库区支流河口段的挟沙力指标极小。根据 2014 年、2015 观测资料计算，磨刀溪河口段挟沙力水流指标 U^3/H 基本在 10^{-6} 量级，香溪河河口段更小，接近 0 值（图 7）。然而，三峡水库蓄水后，汛期几乎是支流河口段比降最大的时期，非汛期虽来流偏小，但由于受水库高水位运行的影响，库区支流河口段的比降、流速较之汛期更小，且水深大，其挟沙能力势必更弱，这是和天然无库状态最为显著的区别。因此，三峡水库蓄水会导致支流河口段非汛期水动力条件减弱，挟带泥沙的能力显著下降，不仅

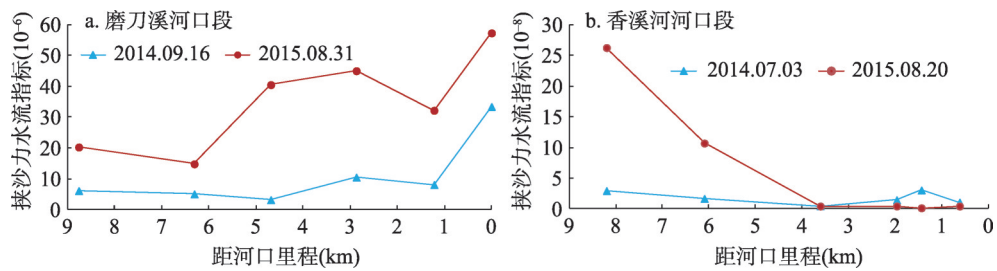


图7 三峡水库支流磨刀溪、香溪河河口段挟沙力水流指标变化

Fig. 7 Change of sediment carrying capacity index of Modao Creek and Xiangxi River mouth section

无法将汛期淤积的泥沙带走，还造成更多的泥沙落淤，这无疑是河口段泥沙累积性淤积的根本原因。

3.2.2 支流来沙的影响 据控制站输沙资料统计，2003-2011年2条支流流域输送至河口段的总沙量分别约为378.6万t和232.8万t。基于地形DEM数据，计算同期这2条支流河口段的冲淤量分别为1233万m³和1930万m³（2003-2006年统计范围仅限于低水主河槽），结合对三峡水库库区泥沙干容重调查结果，换算成泥沙淤积量分别约1202万t和1881万t。三峡水库蓄水前，干流对支流的强顶托效应仅发生在汛期，蓄水后全年干流对支流产生强顶托效应，且非汛期更为明显。磨刀溪和香溪河河口段即使是在比降最大的汛期，挟沙力指标也极小，非汛期水动力条件则更弱。可以推断，支流流域输入河口段的泥沙基本都沉积下来。基于这一假设，可初步估算得到支流来沙量占河口段淤积量的比例，磨刀溪和香溪河的这一比值均小于32%，而实际占比可能更小，因为支流河口淤积量的统计区间并未覆盖泥沙淤积的总范围（表5）。可见，对于磨刀溪和香溪河，其河口段淤积的泥沙少部分来源于流域，大部分来自于干流倒灌泥沙。

表5 2003-2011年三峡水库磨刀溪、香溪河来沙量占河口段淤积量的比例

Tab. 5 Proportion of incoming sediment load to the deposition amount of Modao Creek and Xiangxi River mouth section						
支流名称	控制站	计算河长 (km)	河床淤积量		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
香溪河	兴山	41.6	1930	1881	232.8	12.4

同时，对比磨刀溪和香溪河倒灌泥沙占淤积总量的比例，不难解释2010年之前香溪河河口淤积速度偏大，而2010以来淤积速度迅速减小这一变化过程。与磨刀溪相比，香溪河河口段泥沙淤积来自干流倒灌的比例更大，2010年之后，受上游金沙江中游、下游梯级电站陆续建成运行的影响，干流含沙量进一步减小，万县站2003-2010年平均含沙量为0.330 kg/m³，2011-2017年则下降至0.117 kg/m³，减幅为64.5%，倒灌水流含沙量相应地减小，因而其河口泥沙淤积速度下降较磨刀溪更快。

3.2.3 干流倒灌输沙的影响 支流河口段局部水沙输移特征表明，支流河口断面的含沙量与干流基本相同，顶托作用会逐步发展至倒灌，加之磨刀溪、香溪河入汇交角均超过90°，干流的逆流输沙容易进入支流。据上文关于支流来沙占淤积总量的比例，保守估算，2003-2011年磨刀溪、香溪河河口段的泥沙淤积总量分别约有68.5%、87.6%来自于干流倒灌，占比均较大。对比2003-2006年和2006-2011年的淤积情况和干支流来沙条件，两支流来沙量相差不大，且后一时段支流来沙量较前一时段偏大，与淤积幅度恰恰相反。究其原因，支流来沙总量较少，在河口段泥沙淤积中所占比例也较小，干流来沙量及其变化的影响显得更为突出。三峡库区干流年内输沙高度集中在汛期，2003-2006年

各个时期对应的干流来沙量较之2007-2011年同期的都偏大（表6），年内汛期和年平均输沙量，分别偏大43.2%及43.6%，与同期的断面、深泓淤积幅度变幅相一致；2012年以来，干流输沙再度减少，也与淤积幅度减缓相对应。可见，库区干流水流含沙量下降是两条支流河口段泥沙淤积减缓的重要因素之一。

表6 2003-2017年不同时段三峡库区干流(万县)、磨刀溪(长滩)和香溪河(兴山)含沙量及输沙量变化

Tab. 6 Changes of annual mean sediment concentration and transport rate at Wanxian, Changtan, and Xingshan hydrologic stations

控制站	时段	2003-2006年		2007-2011年		2012-2017年	
		平均含沙量 (kg/m ³)	平均输沙量 (万 t)	平均含沙量 (kg/m ³)	平均输沙量 (万 t)	平均含沙量 (kg/m ³)	平均输沙量 (万 t)
万县	汛期	0.470	13600	0.350	9500	0.160	4370
	非汛期	0.011	97.4	0.005	41.8	0.004	40.9
	全年	0.365	13700	0.263	9540	0.119	4400
长滩	全年	0.337	32.9	0.469	49.4	0.305*	30.9*
兴山	全年	0.237	22.6	0.274	28.5	未测沙	

注：汛期和非汛期统计时段同表4；*：数据统计时段为2012-2016年。

金沙江下游是长江流域的重要产沙区，也是三峡入库泥沙的主要来源。1956-2010年三峡入库干流控制站朱沱站多年平均输沙量为2.88亿t，金沙江出口屏山站年均输沙量为2.39亿t，占朱沱站输沙总量的83.0%。2010年以来，受上游金沙江中游金安桥等6个梯级及下游溪洛渡和向家坝梯级水电站相继运行的影响，金沙江中下游的泥沙被大幅度拦截，2011-2017年屏山站（2012年改为向家坝电站下游的向家坝站）年均输沙量仅0.305亿t，朱沱站年均输沙量相应减少至0.633亿t，进入三峡水库库区的泥沙量大幅度减小，干流水流含沙量显著下降，倒灌输沙量必然减小，磨刀溪和香溪河河口段的泥沙淤积均趋缓。

3.2.4 河口段河势的影响 上述分析表明，磨刀溪和香溪河河口段的泥沙淤积过程和范围都存在差别，原因除河口相对于三峡大坝的地理位置、支流来沙条件等不同以外，支流河口局部河势条件（包括干流和支流）也有一定影响。首先，河道纵比降不一。据赵克玉等人对小浪底水库运用初期支流与干流淤积形态研究，认为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^[5]。与香溪河相比，磨刀溪河口段河势蜿蜒，河床原始比降相对较小，倒灌逆流更容易挟带泥沙上溯，淤积范围相对较大（图6），平均淤积量则偏小；其次，入汇交角不同。香溪河入汇交角更大，更容易发生倒灌，全年各时段都观测到倒灌现象^[17]，因而其倒灌泥沙占淤积总量的比例偏大，总体淤积量也相应偏大；最后，干支流放宽比有别。香溪河河口河道干支流放宽比均较大（河宽比1为支流河口断面与其上游紧邻固定断面河宽比值，河宽比2为汇口上游、下游干流断面河宽比）（表7），分别有利于顺流和倒灌流泥沙落淤，因而香溪河汇口附近干支流河道内泥沙集中淤积的现象较之磨刀溪更为明显。

表7 三峡水库支流磨刀溪、香溪河河口局部河道形态特征对比

Tab. 7 Comparison of channel morphological characteristics in Modao Creek and Xiangxi River mouth

支流名称	入汇交角(°)	入汇岸别	河口段深泓 原始比降(‰)	河宽比1		河宽比2		2003-2011年单位河长 冲淤量(万 m ³ /km)
				175 m	145 m	175 m	145 m	
磨刀溪	95	右岸	1.82	0.993	0.925	1.03	1.00	36.3
香溪河	120	左岸	2.59	1.29	1.39	1.14	1.11	46.4

5 支流河口淤积趋势研究

综上分析,造成磨刀溪和香溪河河口累积性淤积的关键因素大体一致,即三峡水库的蓄水运行,其淤积的幅度、分布特点及范围等则与干支流来沙条件和局部河势特征有关。考虑到两条支流河口段的河势相对稳定,今后一定时期内,决定其泥沙淤积发展趋势的因素主要有两个方面,一是三峡水库调度方式,二是干支流来沙的变化趋势。

5.1 三峡水库调度方式

三峡水库干流输沙高度集中在汛期,倒灌输沙也主要集中在汛期,尽管非汛期蓄水加大了倒灌发生的几率,但其倒灌输沙量较少,对于支流河口泥沙淤积的最大作用表现为:将天然情况下的走沙状态转变为蓄水后的难以挟带泥沙或者是小幅度倒灌泥沙的状态。因此,关系到汛期水库泥沙输移的洪水调度方式是影响河口泥沙淤积幅度的重点。2010年三峡水库汛后蓄至175 m后,为了充分发挥水库的防洪作用,同时又尽可能地保证其排沙比,先后开展了汛期削峰调度和排沙调度,探索出“涨水面水库削峰,落水面则加大泄量排沙”的蓄清排浑新模式^[18]。国家防汛抗旱总指挥部关于2017年度长江上中游水库群联合调度方案的批复(国汛[2017]6号)中指出,汛期6月10日-8月31日期间,三峡水库在不需因防洪要求拦蓄洪水时,原则上按防洪限制水位145 m控制,实时调度时在144.9~146.5 m之间浮动,给汛期削峰调度留下了一定的空间。实际调度中,2012年、2013年三峡水库汛期都开展了削峰调度,2012年7月7日和7月12日水库分别迎来两次洪峰,入库洪峰流量分别为56000 m³/s和55500 m³/s,出库流量控制在40000 m³/s左右,坝前水位随之上升至158.88 m,7月24日三峡水库迎来成库后的最强洪峰,最大入库洪峰流量达71200 m³/s,水库进行削峰拦洪,以45000 m³/s流量下泄。可见,相对于规程调度,削峰调度会在一定时期内使得水库处于大流量、水位偏高的运行状态,均可促进干流倒灌支流,且距坝越近影响越大;同时,汛期集中输沙。因而,汛期削峰调度对库区干支流的泥沙淤积有一定的促进作用,但考虑削峰调度仅适用于一定的来水条件,尚未常态化,加之干流来沙量大幅减少的趋势明显,香溪河淤积特征也表明其累积影响并不明显。

此外,针对库尾河段的泥沙淤积问题,三峡水库在消落期末期加大水位降幅,以期拉动库尾淤积的泥沙,但这一效应与水位正常消落重合,影响较小。随着上游大中型梯级陆续建成运行,水库群集中蓄水,为了保证三峡水库的蓄满率,同时进一步减轻对下游河湖枯水水情的影响,水库蓄水起始时间由设计阶段的10月中旬提前至9月10日(自2010年起),年内高水位运行时间较长,对支流河口的淤积也有一定促进作用。总体来看,三峡水库实际调度过程中采用的削峰、减淤和提前蓄水等运行方式,多数都对库区干支流泥沙的落淤有一定的促进作用,但河口泥沙淤积的发展过程表明,目前累积效应尚不明显。

5.2 干支流来沙量

根据长江流域综合规划,长江上游干支流库容大、有调节能力的控制性枢纽涉及干流的金沙江和川江段,以及支流雅砻江、岷江(含大渡河)、嘉陵江(含白龙江)、乌江等河流上的梯级水库。目前,金沙江中游梨园等6个梯级、下游的溪洛渡和向家坝,雅砻江的锦屏一级和二滩,岷江的瀑布沟和紫坪铺,嘉陵江的宝珠寺和亭子口,乌江的洪家渡、乌江渡、构皮滩和彭水,及长江干流的三峡等控制性水库均已蓄水运用(水利枢纽分布示意如图8a)。水库群几乎控制了长江流域金沙江下游、嘉陵江、乌江及三峡区间等主要产沙区域,使得三峡入库的沙量一减再减,尤其是其最大的来源金沙江下游梯级

a. 长江上游已建干支流控制性水库及水文站网分布示意图

b. 长江上游干流控制站输沙量和含沙量变化

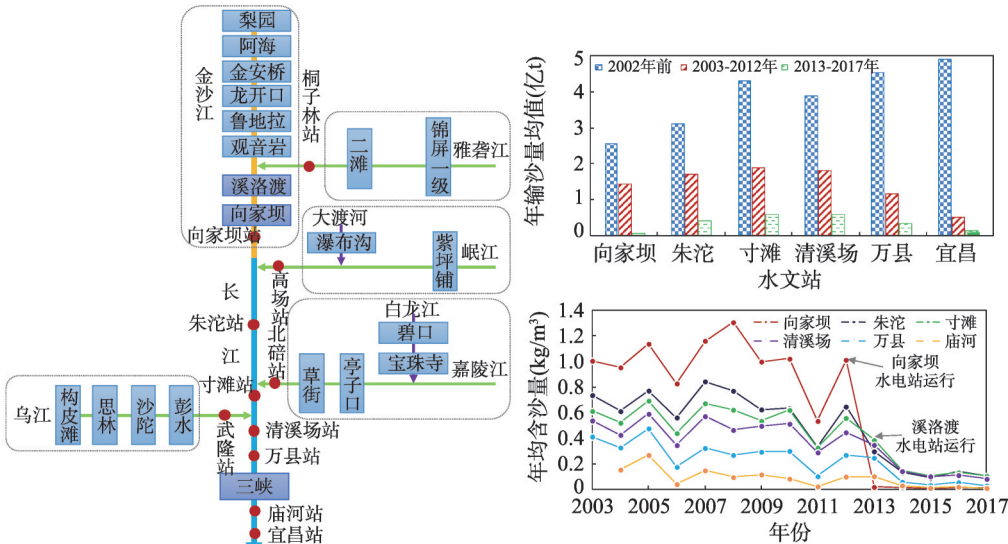


图8 长江上游干流控制站分布及年均输沙量、含沙量变化

Fig. 8 Changes in annual mean sediment discharge and concentration of hydrological stations in the mainstream of the upper Yangtze River

建成后，2013-2017年三峡水库年均入库沙量下降至5820万t，相较于设计阶段采用值减少88.8%。进入三峡库区后，自寸滩站往下，泥沙沿程落淤，2004-2017年，寸滩至清溪场年均输沙量变幅较小，清溪场至万县年均输沙量减少39.6%，万县至庙河年均输沙量减少56.2%。可见，三峡库区的泥沙主要淤积在清溪场以下，这与支流河口泥沙淤积沿程分布规律一致。在长江上游干支流梯级水库群的层层阻隔下，三峡水库入库沙量将在相当长的时间内保持较少的水平，这也正是近期库区支流河口泥沙淤积大幅减缓的关键原因，直接影响其泥沙淤积发展趋势。

当前，不仅三峡库区干流沙量大幅减少，同时，磨刀溪和香溪河支流来沙也呈明显的减少趋势，主要与水土保持工程和水利枢纽建设有关^[19-20]。除干支流有测站控制的区域以外，未控区间来沙量的占比越来越大，影响也不可忽视。为研究未控区间输沙量的变化趋势，从植被覆盖度着手，间接分析三峡水库区间、磨刀溪及香溪河流域下垫面条件的变化特征及发展趋势（图9）。结果表明，三峡水库区间、磨刀溪和香溪河3个流域年内丰枯水期的植被覆盖度自2005年开始都有较为明显的增加趋势，下垫面条件的改善将从源头上改变泥沙的输移量，未控区间来沙减少趋势也是可以预见的。

综合影响支流口水动力条件的三峡水库调度方式和决定河口泥沙淤积物来源的干支流来沙量两方面因素，能够很好地揭示近期三峡水库支流河口泥沙淤积减缓的内在机制。同时，兼顾这两个重要控制因子今后可能出现的调整，可以预判，在不发生突发状况的条件下，如局部强暴雨和地质灾害造成的输沙变异等，三峡水库库区支流河口的泥沙淤积将保持较缓的发展速度，堆积形成拦门沙坎的可能性较小。

6 结论

(1) 三峡水库蓄水后，库区支流磨刀溪、香溪河河口段均大幅淤积。磨刀溪和香溪

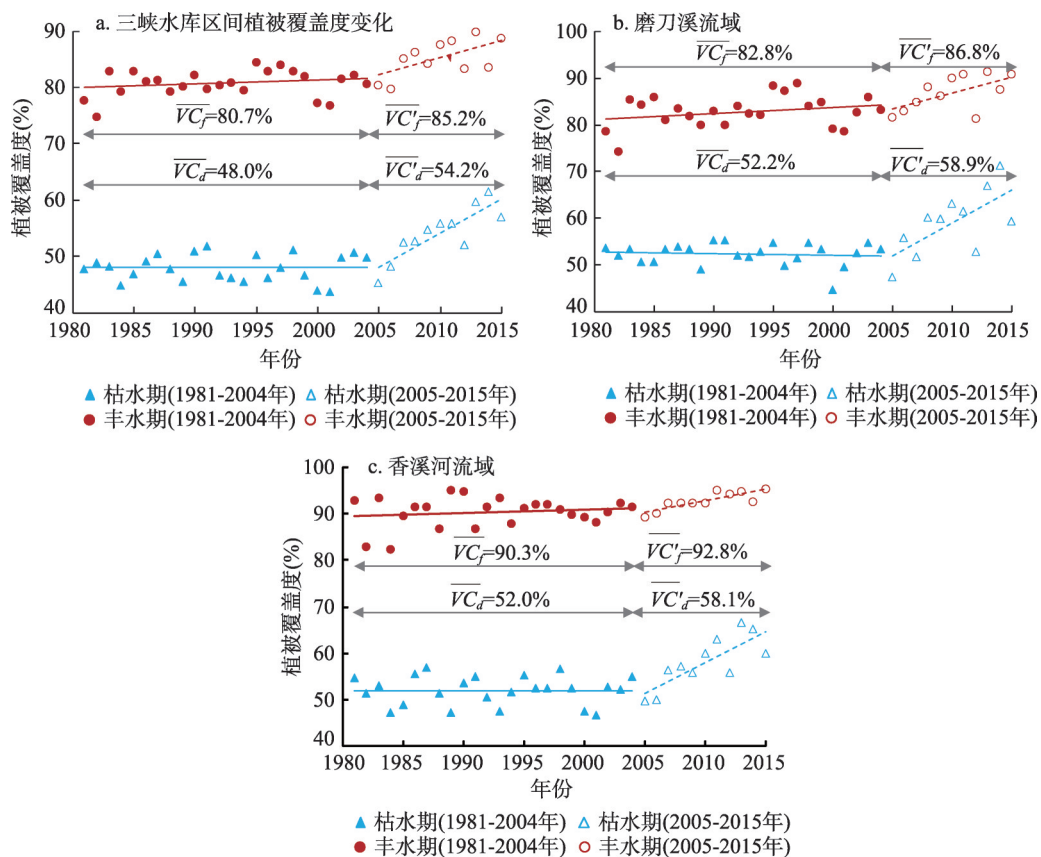


图9 三峡区间、磨刀溪及香溪河流域植被覆盖度变化图

Fig. 9 Changes of vegetation coverage in Three Gorges Reservoir Area, Modao Creek, and Xiangxi River basin

河河口段泥沙淤积沿程分布的规律相似,淤积基本分布在河口15 km范围以内,强淤积带集中在距河口约5 km的河段范围内,越往上游泥沙淤积强度越小;以主河槽平淤为主要形式,最大淤积厚度均超过10 m,深泓纵剖面出现锥形淤积体。泥沙淤积主要发生在水库运行初期,之后淤积速度下降,2010年以来淤积减缓尤为明显,且香溪河河口段淤积减缓较磨刀溪更为突出。

(2) 影响三峡水库库区支流河口段泥沙淤积幅度和范围的主要因素有水动力条件减弱、干流倒灌泥沙、支流来沙及河口段局部河势特征等方面。三峡水库蓄水导致支流河口段非汛期水动力条件减弱,挟带泥沙的能力显著下降,是泥沙大幅累积性淤积的根本原因。支流河口淤积的泥沙来自于干流倒灌和流域输沙,且以倒灌泥沙为主,近年干流泥沙来量大幅减少是河口泥沙淤积速度显著下降的控制因素。支流河口的河势条件主要影响泥沙淤积上溯范围及沿程分布特征。

(3) 三峡水库实际调度过程中的削峰、减淤和提前蓄水等运行方式,多数都对库区干支流泥沙的落淤有一定促进作用,但支流河口泥沙淤积的发展过程表明,目前累积效应不明显。三峡库区干流、磨刀溪和香溪河流域来沙均呈减少趋势,加之区间植被条件不断改善,库区支流河口泥沙淤积来源持续减少。在流域不发生局部强暴雨或地质灾害造成的集中输沙条件下,三峡水库支流河口堆积形成拦门沙坎的可能性较小。

参考文献(References)

- [1] Wang Yuanjian, Xie Wei, Wang Ting, et al. Key factors influencing evolution of sand bars in tributaries of the Xiaolangdi Reservoir. *Journal of Sediment Research*, 2016(6): 51-58. [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.]
- [2] Zhang Junhua, Chen Shukui, Li Shuxia, et al. Sediment transport and morphological changes of the Xiaolangdi Reservoir in early sediment impoundment period. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, 38(9): 1085-1089. [张俊华, 陈书奎, 李书霞, 等. 小浪底水库拦沙初期泥沙输移及河床变形研究. *水利学报*, 2007, 38(9): 1085-1089.]
- [3] Liu Fazhong, Wang Hongzheng, Yang Kai, et al. Characteristics and problems of siltation in the tributary reservoir area of Danjiangkou Reservoir. *Yangtze River*, 2006, 37(8): 26-28. [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(8): 26-28.]
- [4] Hu Chunhong, Wang Yangui. Study on water-sediment optimum allocation in upstream basin and comprehensive measures of sediment control in Guanting Reservoir I: Reservoir sedimentation and general plan of water and sediment control. *Journal of Sediment Research*, 2004(2): 11-18. [胡春宏, 王延贵. 官厅水库流域水沙优化配置与综合治理措施研究 I: 水库泥沙淤积与流域水沙综合治理方略. *泥沙研究*, 2004(2): 11-18.]
- [5] Zhao Keyu, Wang Xiaoyan. The deposition feature in branch rivers in reservoir region of XLD Project. *Research of Soil and Water Conservation*, 2005, 12(5): 168-171. [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(5): 168-171.]
- [6] Yan Tao. Preliminary study on sediment deposition law and prevention of confluence reach in reservoir [D]. Wuhan: Wuhan University, 2014. [闫涛. 库区交汇河段泥沙淤积规律及防治的初步研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2014.]
- [7] Wang Zhaoyin, Li Changzhi, Wang Feixin. Effect of Tongguan's elevation on the fluvial process of the lower Weihe River. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004, 35(9): 1-8. [王兆印, 李昌志, 王费新. 潼关高程对渭河河床演变的影响. *水利学报*, 2004, 35(9): 1-8.]
- [8] Wang Yangui, Hu Chunhong. Study on Sedimentation and the mouth bar control in Guanting Reservoir. *Journal of Sediment Research*, 2003(6): 25-30. [胡春宏, 王延贵. 官厅水库淤积特点及拦门沙整治措施. *泥沙研究*, 2003(6): 25-30.]
- [9] Miao Jilun, Mu Dewei, Zhang Xujin, et al. The influence of Three Georges Project running on sediment deposition at Wujiang Entrance. *Journal of Chongqing Jiaotong University*, 2003, 22(1): 105-108, 120. [缪吉伦, 母德伟, 张绪进, 等. 三峡水库运行对乌江河口段泥沙淤积的影响. *重庆交通学院学报*, 2003, 22(1): 105-108, 120.]
- [10] Wu Baosheng, Deng Yue. Effects of controlled pool level in non-flood seasons on the sedimentation in Sanmenxia Reservoir. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2007, 26(2): 93-98. [吴保生, 邓玥. 三门峡水库非汛期控制运用水位对库区泥沙冲淤的影响. *水力发电学报*, 2007, 26(2): 93-98.]
- [11] Ma Chao, Lian Jijian. Preliminary research on influence mechanism of human controlled dispatching solutions to hydrodynamics and water quality of tributaries of reservoir. *Journal of Tianjin University*, 2011, 44(3): 202-209. [马超, 练继建. 调度方案对库区支流水动力和水质的影响机制初探. *天津大学学报*, 2011, 44(3): 202-209.]
- [12] Ji Daobin, Liu Defu, Yang Zhengjian, et al. Hydrodynamic characteristics of Xiangxi Bay in Three Gorges Reservoir. *Science China*, 2010, 40(1): 101-112. [纪道斌, 刘德富, 杨正健. 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(1): 101-112.]
- [13] Liu Defu, Yang Zhengjian, Ji Daobin, et al. A review on the mechanism and its controlling methods of the algal blooms in the tributaries of Three Gorges Reservoir. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2016, 47(3): 443-454. [刘德富, 杨正健, 纪道斌, 等. 三峡水库支流库湾藻类及其调控技术研究进展. *水利学报*, 2016, 47(3): 443-454.]
- [14] Peng Chengrong, Chen Lei, Bi Yonghong, et al. Effects of flood regulation on phytoplankton community structure in the Xiangxi River, a tributary of the Three Gorges Reservoir. *China Environmental Science*, 2014, 34(7): 1863-1871. [彭成荣, 陈磊, 毕永红, 等. 三峡水库洪水调度对香溪河藻类群落结构的影响. *中国环境科学*, 2014, 34(7): 1863-1871.]
- [15] Yuan Jing, Xu Quanxi, Tong Hui. Study of sediment deposition in region of Three Gorges Reservoir after its impoundment. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2013, 32(2): 139-145. [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(2): 139-145.]
- [16] Li Wenjie, Yang Shengfa, Fu Xuhui, et al. Sedimentation characteristics in the Three Gorges Reservoir during the initial operation stage. *Advances in Water Science*, 2015, 26(5): 676-685. [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(5): 676-685.]
- [17] Zhang Yu, Liu Defu, Ji Daobin, et al. Effects of Intrusions from Three Gorges Reservoir on nutrient supply to Xiangxi Bay. *Environmental Science*, 2012, 33(8): 2621-2627. [张宇, 刘德富, 纪道斌, 等. 干流倒灌重流对香溪河库湾营养盐的补给作用. *环境科学*, 2012, 33(8): 2621-2627.]

- [18] Dong Bingjiang, Chen Xianwei, Xu Quanxi. Investigations and considerations on peak sediment regulation of Three Georges Reservoir. *Yangtze River*, 2014, 45(19): 1-5. [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(19): 1-5.]
- [19] Liu Huiying, Lu Xianghui, Zhang Pingcang, et al. Variation of runoff and sediment discharge and its driving factors in Xiangxi River watershed in Three Gorges Reservoir Area. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2015, 35(5): 17-21. [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(5): 17-21.]
- [20] Sun Rong, Yuan Xingzhong, Liu Hong, et al. Influence of cascaded exploitation of small hydropower on riparian plant communities in Modaoxi River. *Advances in Water Science*, 2011, 22(4): 561-567. [孙荣, 袁兴中, 刘红, 等. 磨刀溪梯级水电开发对河岸植物群落的影响. *水科学进展*, 2011, 22(4): 561-567.]

Sediment deposition of Modao Creek and Xiangxi River mouth section since the impoundment of the Three Gorges Reservoir

ZHU Lingling, XU Quanxi, YAN Lili

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

2. Yangtze River Management Office of Zhenjiang City, Zhenjiang 202003, China)

Abstract: There are 66 tributaries in the Three Gorges Reservoir (TGR) area, where most of them witnessed pronounced deposition in mouth reach since the impoundment of the TGR. The lasting sedimentation may lead to the formation of outlet bar at mouth section, which generated adverse effects on storage capacity of the TGR and navigation of tributaries. This paper, taking the Modao Creek and Xiangxi River as examples, examines the characteristics and causes of sediment deposition in their mouth sections based on detailed observation data such as flow, sediment, cross section and channel topography. The results show that: (i) after the impoundment of the TGR, a large amount of deposition occurred in its tributary mouth. The maximum deposition thickness of Modao Creek and Xiangxi River mouth sections exceeded 10 m from 2004 to 2017. Deposition was basically within the range of 15 km of the mouth section, and the strong depositing zone was focused in the reach of about 5 km away from the river mouth. The sediment deposition in the river mouth mainly occurred in the initial operation period of the TGR, and slowed down particularly since 2010 when the cascade hydropower stations in the middle and lower Jinsha River began to operate; (ii) the weakened hydrodynamic condition in dry season at the tributaries mouth, and the significantly reduced sediment-carrying capacity, are the fundamental causes in responsibility to the intense deposition. Sediment deposited at Modao Creek and Xiangxi River mouth sections mainly came from the mainstream in the form of inverted flow, and partially came from their own basin. The deposition range of sediment and its influence on channel morphology were related to local river regime; (iii) Optimized operation of the TGR since 2010 has not affected the sediment deposition in the tributaries mouth. Decreased sediment concentration in mainstream and tributaries and the maintenance the low water level in flood season do not support the formation of outlet bar of tributaries in the TGR.

Keywords: Three Gorges Reservoir; Modao Creek; Xiangxi River; backwater effect; sedimentation