

DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640X.2015.05.004

魏炳乾, 严培, 庞洁, 等. 浐河桃花潭库区冲淤演变的二维数值模拟[J]. 水利水运工程学报, 2015(5): 30-37. (WEI Bing-qian, YAN Pei, PANG Jie, et al. Two-dimensional numerical simulation of riverbed evolution of Taohuatan in the Chan River[J]. Hydro-Science and Engineering, 2015(5): 30-37.)

浐河桃花潭库区冲淤演变的二维数值模拟

魏炳乾¹, 严培¹, 庞洁¹, 刘洋², 周双明¹, 李强¹

(1. 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048; 2. 江西省水利规划设计院, 江西 南昌 330029)

摘要: 橡胶坝是一种低水头轻性薄壳柔体挡水建筑物, 结构简单、施工方便且造价低廉, 修建橡胶坝拦水造湖可形成景观水面, 但立坝运行会造成库区床面的泥沙淤积, 因此遵循河床演变规律, 合理运行橡胶坝, 可保持库区长期可利用库容。采用 MIKE 软件模拟桃花潭库区 10 年水沙条件下的河床演变, 综合考察桃花潭河段水流流场、床面淤积厚度、河床比降以及纵断面形态的变化。结果表明: 桃花潭河段的冲淤平衡年限约为 7 年, 平衡后主河道淤积较为严重; 冲淤平衡后河床纵断面在展宽段呈向上凸起的河床形态; 基于桃花潭河段的几何特性、来水来沙条件和由宽入窄的壅水作用, 进入该河段的含沙水流会因河道突然展宽, 水流挟沙力与水流动能减小, 导致泥沙更易淤积, 造成床面抬升和洪水位的抬高。

关键词: 橡胶坝; 数值模拟; 河床演变; 淤积厚度; 河床比降; 平衡年限

中图分类号: TV133.1

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2015)05-0030-08

浐河和灞河环绕地区的最大亮点当属浐灞生态区, 其中桃花潭滨水公园是浐河河道穿越城市的唯一一拓宽段, 也是自然与人文相融合的湿地景观。桃花潭区域河道较宽, 造成潭内水体流动性差, 流量较小且含沙量大, 泥沙淤积问题尤为严重^[1]。为削减桃花潭内泥沙淤积, 研究桃花潭河段包括淤积厚度、淤积平衡年限、河床比降等的冲淤演变趋势, 提出切实可行的防沙减淤工程措施尤为重要。韩其为^[2]系统研究了水库及下游泥沙运动规律等, 建立了水库淤积的理论体系。王普庆^[3]对库区泥沙淤积分布特征进行分析, 结果表明上游水库运用方式及水沙条件严重影响了冲淤量大小, 局部河段的冲淤遵从水沙运动的基本规律。文献[4-9]针对河道水沙特点, 建立水沙数学模型进行淤积过程的模拟研究, 分析不同控制水位及不同泥沙粒径对泥沙冲淤过程的影响。但上述文献只是对现有淤积过程进行分析而未能预测未来水库淤积平衡年限, 从而不能合理管理橡胶坝群、不能最大限度减少库区泥沙淤积和最大程度地发挥橡胶坝库区水面景观等的综合效益。本文采用 MIKE21 软件中的水动力模型(HD)和输沙模型(MT), 以浐河下游桃花潭为例, 建立平面二维水沙数学模型, 模拟分析 10 年水沙系列下桃花潭河段河床的冲淤演变趋势, 为类似工程河道治理提供参考。

1 数学模型的建立

1.1 区域概况

浐河全长 64.6 km, 源于秦岭北麓蓝田县汤峪镇紫云山南, 其流域面积约 760 km², 河道宽 35~120 m, 下

收稿日期: 2015-01-28

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(2011CB403305); 陕西省教育厅科学研究计划项目(11JK0739); 陕西水利科技计划资助项目(2014skj-14)

作者简介: 魏炳乾(1963—), 男, 陕西西安人, 教授, 主要从事河流工程泥沙研究。E-mail: weibingqian@xaut.edu.cn

通信作者: 严培(E-mail: 1066578145@qq.com)

游平均比降为 $1‰ \sim 2.2‰$ ^[8], 河道床沙为卵砾石加沙, 床沙中值粒径 7.44 mm, 上游来沙以悬移质为主, 研究区域位置为沱河 2#橡胶坝至沱河陇海铁路桥段(如图 1)。桃花潭河段位于沱河下游, 介于西安市北二环东延线的沱河大桥与沱河陇海铁路桥之间, 该河段长约 1 800 m, 最宽处约 600 m, 平面形态呈藕节状, 属宽窄相间型河道(图 1)。统计马渡王水文站资料, 得沱河多年平均径流量为 2.35 亿 m^3 , $C_V = 0.48$, $C_S/C_V = 1.5$ 。

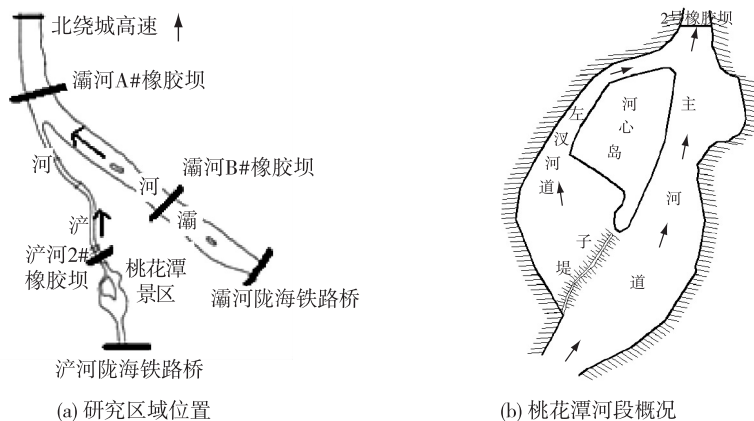


图 1 研究区域位置及桃花潭河段

Fig. 1 Overview of research region of Taohuatan reach in Chan River

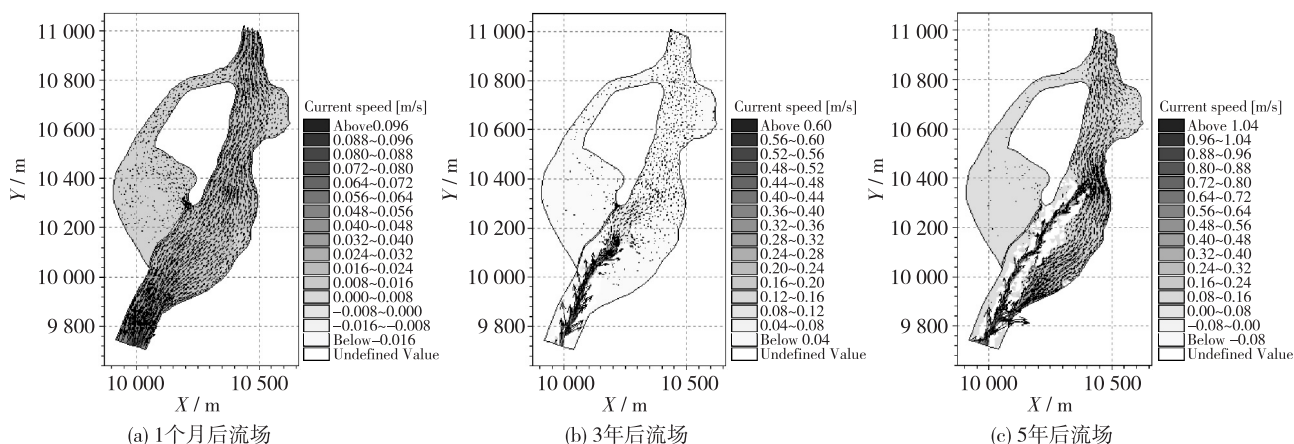
1.2 定解条件

模拟计算选用文献[5]所列的二维质量守恒方程和 x, y 方向的动量方程。采用 MIKE21 中非结构网格模块的水动力与输沙模型模拟河段淤积最严重、最不利工况, 即沱河 2#橡胶坝(基座高程为 392.31 m, 坝袋高 3 m)立坝运行 10 年, 由于沱河河道“小水大沙”的不利水沙条件使得河道淤积愈演愈烈。为模拟该河道的“小水”条件, 计算工况采用枯水年的径流量资料, 即入口端边界条件选取 1993—2003 年枯水 10 年的径流量资料, 这 10 年中流量大部分为 $5 m^3/s$, 只有个别时段因洪水而流量较大。下游出口端边界条件设定为水位, 可按堰流公式计算得出, 初始水位为模拟开始时上下游水位的平均值, 根据实测地形数据取 396.6 m。初始流速设定为零启动, 即当 $t=0$ 时, $u=v=0$ 。沱河水流含沙量采用 2008 年开展的水沙条件取样和测试工作的实测枯水期最大含沙量 $3.679 kg/m^3$, 不考虑调度运行及其对河道水流的影响^[6]。

2 模型计算结果与分析

2.1 流速场分析

采用前述建立的模型进行模拟计算, 模拟完成后的流速分布见图 2。



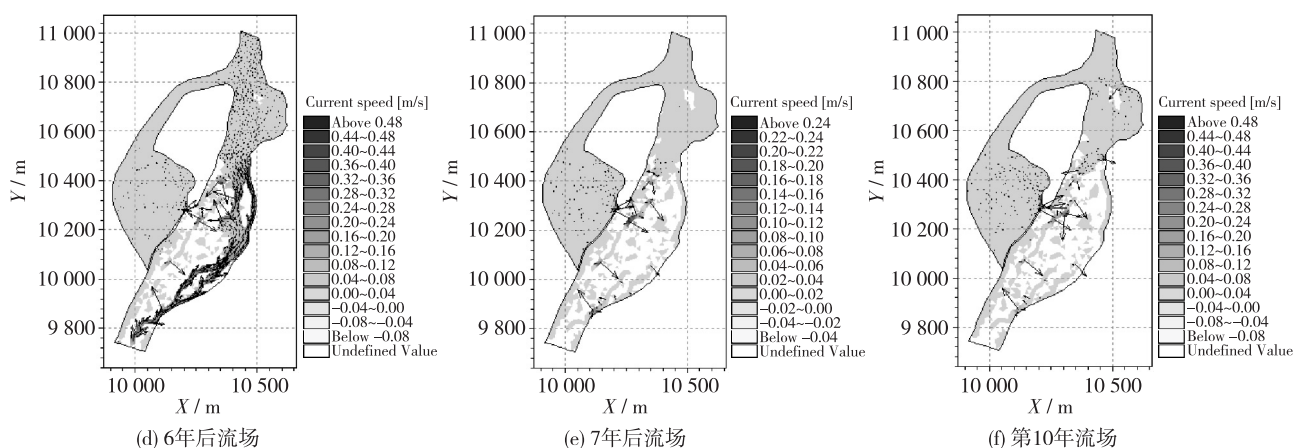


图2 桃花潭河段流速分布

Fig. 2 Distribution of velocity in Taohuatan reach

由图2可见:①模拟初期,主河道内流速分布较为均匀,只在河道入口与出口处由于河道较窄而流速较大,在子堤左侧相对封闭的区域流速很小,并存在回流;②在第5年时,由于主河道淤积严重床面抬高,使得洪水水流择路向地势较低的右岸一侧流动,第6年时已在原河道右侧形成一狭长河槽;③第7年以后,桃花潭主河道与右汊河道床面整体淤积抬升、大面积滩地出露,说明经过7年的淤积,桃花潭库区已基本淤死。

2.2 含沙量变化

图3为模拟的10年时间内6个具有代表性时刻的桃花潭河段总含沙量分布。

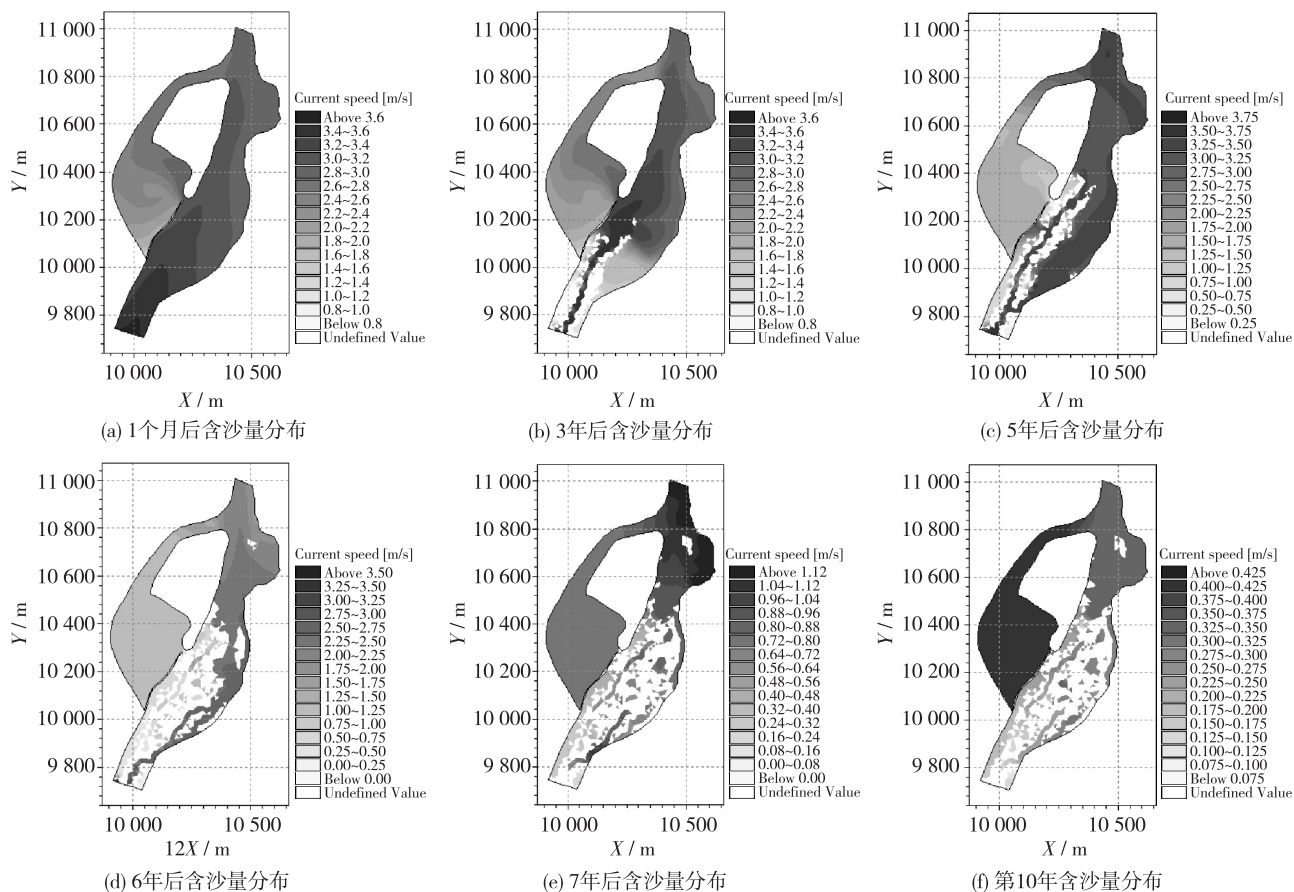


图3 桃花潭河段含沙量分布

Fig. 3 Distribution of sediment concentration in Taohuatan reach

由图3可见:①含沙量在平面分布上表现为上游入口处最大,并从上游向下游递减,主流较两侧含沙量高,模拟初期该规律尤其明显;②与流速分布规律类似,前5年,浑水主要沿主河道向下游流动,主河道两侧河床随时间推移暴露于水面以上的区域逐渐增多;③5年后,主河道上游段已基本达到冲淤平衡,河床较高,在洪水作用下河水开始沿靠近右岸地势相对较低的右汊河道向下游流动,并在6年后形成一狭长河槽;④第7年时,右汊河道断流,整个桃花潭河段基本达到冲淤平衡,7年以后,含沙量分布基本不变;⑤子堤左侧相对封闭区域与左汊河道的含沙量一直较低,只是在7年后主河道与右汊河道断流时含沙量相对较高,最后稳定在 0.42 kg/m^3 左右,这主要是因为从主流分流入该区域的水流很少,使得该区域淤积并不算太严重,后期还有流速很小的水流流动,而此时主河道上游河床已大部分暴露于水面以上,有水的区域主要为一些河道低洼处,基本没有流动性,悬移质泥沙在河道低洼处发生沉降,使得低洼处含沙量反而变小了。

从10年含沙量分布的总体变化情况来看,该河段主河道处淤积最为严重,含沙量变化较大,最大达到了 4 kg/m^3 以上,而最小时却不到 0.5 kg/m^3 ,这主要是因为主河道两侧河床不断露出水面、干涸区域增多、河道形态变化较大造成的。大概第7年时整个河段含沙量分布不再发生变化,桃花潭库区淤死,与前述流速得到的结论基本吻合。

2.3 淤积厚度的历时变化

2.3.1 沿程淤积厚度的历时变化 为分析桃花潭河道淤积厚度的历时变化规律,在右汊主河道选取9个特征点(A~I),在左汊河道选取7个特征点(J~P),如图4所示。绘制左右汊各特征点淤积厚度的历时变化,见图5。

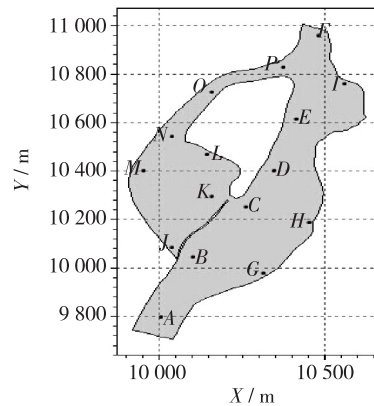


图4 桃花潭河段特征点分布

Fig. 4 Distribution of characteristic points in Taohuatan reach

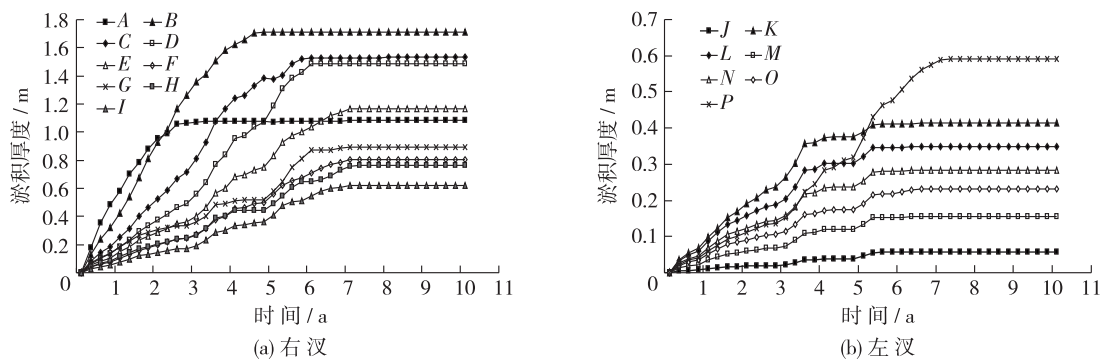


图5 各特征点淤积厚度历时变化

Fig. 5 Changes in duration curves of silting thickness at characteristic points

由图5(a)可见:①右汊主河道上A~F点与右侧河槽上的G,H,I点均呈逐年淤积抬高之势,各点均在相应年限后达到冲淤平衡;②模拟初期,各点淤积厚度曲线的变化率从上游往下游依次变小,说明淤积由上游向下游发展,模拟初期的淤积厚度主要与推移质泥沙的淤积有关,即推移质泥沙由入口处开始以沙波运移方式向下游作推移运动;③主河道上除A点外,其余各点在同一时刻的淤积厚度表现为上游比下游大。这是因为,A点位于上游入口处,河道较窄,水流流速较大,床沙质泥沙不易落淤,所以A点相对下游B~E点来说淤积厚度较小;④主河道A~F点的冲淤平衡年限分别为2.5、4.5、5.5、6、7和7年,表现出从上游往下游递增的趋势。平衡时右汊各点淤积厚度为:A点1.081 m,B点1.708 m,C点1.535 m,D点1.483 m,E点1.168 m,F点0.806 m,G点0.894 m,H点0.765 m,I点0.621 m。可见,达到冲淤平衡时,淤积最严重的区

域集中在主河道上游开阔段,而上下游河道狭窄处与靠近右岸区域淤积厚度相对较小,这是因为河道较窄处,水流流速较大,悬移质泥沙不易落淤,而当水流由窄深河道进入宽浅河道时,流速变小,悬移质泥沙易于淤积。

由图 5(b)可见:①左汊河道水流自子堤末端处狭窄缺口流入,流量很小,与右汊相比,除出口 P 点处受主河道水流影响淤积厚度较大外,其余各特征点的淤积厚度均较小,最终淤积厚度分别为 J 点 0.058 m, K 点 0.413 m, L 点 0.350 m, M 点 0.156 m, N 点 0.284 m, O 点 0.233 m, P 点 0.591 m;② $J \sim O$ 点的淤积厚度曲线变化趋势很相似,均于 5 年半左右达到冲淤平衡,这是由于左汊来流量小,来流中悬移质为推移质的数十倍或数百倍,因此推移质对淤积的贡献很小,而 P 点达到冲淤平衡的年限与右汊主河道接近,约为 7 年。

2.3.2 横断面淤积厚度的历时变化 在桃花潭河段的上、中、下游分别选取 3 个横断面 $J-G$, $M-H$ 和 $P-I$, 绘制各横断面上淤积厚度的历时变化(见图 6)。

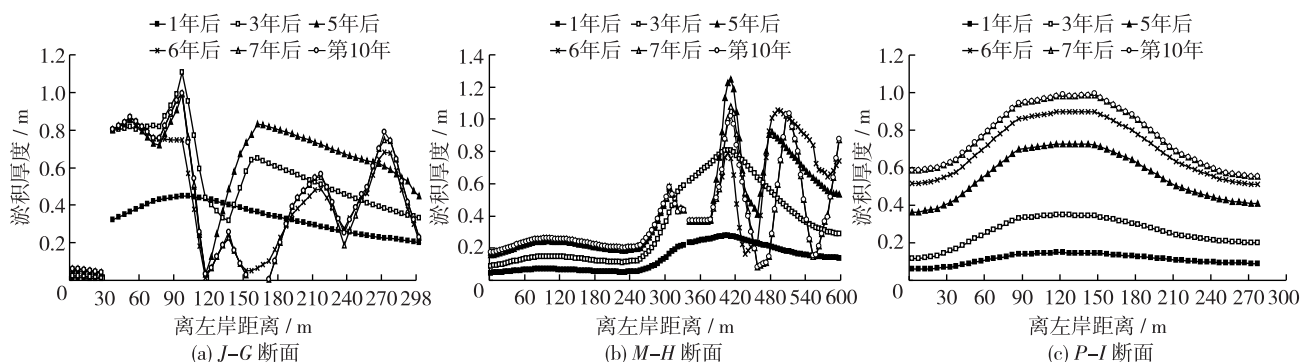


图 6 3 个断面河床淤积厚度分布

Fig. 6 Distribution of silting thickness in three sections

图 6(a)为上游 $J-B-G$ 断面河床淤积厚度的历时变化。图中离左岸约 30 m 处为子堤位置,其左侧淤积厚度不到 0.1 m。放水第 1 年床面淤积厚度变化平缓,到第 3 年后,在右汊河道冲出一条“V”型河槽,此后逐渐下切,到第 6 年之后河床形态变化剧烈,由原来的“V”型演变为“W”型,之后达到平衡。

图 6(b)为中游 $M-H$ 断面河床淤积厚度的历时变化,由于该断面河道较宽,水流挟沙力减小,淤积较为严重。子堤离左岸约 350 m,左汊进水口受主流影响较大,左汊入口附近淤积较大,最大值达到了 0.6 m,而其他区域河床淤积缓慢。右汊主流区的淤积厚度明显大于左汊河道,从第 3 年起,主河道河床形态变化剧烈,主要是因为随着淤积从上游向下游发展,露出水面的滩地逐渐增多,右汊逐渐形成“W”型河槽,于第 7 年右汊河床形态不再发生变化,达到平衡,而左汊断面形态于第 5 年后就基本平衡。

图 6(c)为下游 $P-I$ 断面河床淤积厚度的历时变化,由于该断面离 2#橡胶坝较近,水流流速较小,水流中的悬沙落淤,以致该断面淤积厚度变化呈等厚淤积。淤积厚度分布曲线随时间推移逐渐抬高,到 7 年后,各年的曲线基本重合,说明 7 年后该断面已达到冲淤平衡。

从以上分析可知,桃花潭河道开阔段比狭窄段淤积严重,右汊比左汊淤积严重。主河道断面达到冲淤平衡的年限为 7 年,这与前述沿程淤积厚度的历时变化分析结果一致。

2.4 河床比降的变化

图 7 为模拟 10 年内桃花潭河床比降的变化。从图中可见,右汊主河道($A-F$)的河床纵比降由 0.9‰增大至第 2 年的 1.66‰,此后逐渐减小,7 年后达到平衡,稳定在 1.23‰。从斜率 dJ/dt 也可看出,前 2 年斜率为正,淤积厚度增加;第 3 年斜率为负,淤积厚度开始减小,说明河床开始冲刷,直至第 7 年斜率变缓至 0,淤积厚度不再变化。最初的比降增大前面已经进行了分析,而 2 年后河床比降减小是因为河道上游已先达到冲淤平衡,沙波缓慢向下游输移,加之悬移质泥沙的落淤,使得上下游河床落差逐渐缩小,从而坡降变缓。

主河道上游段($A-D$)的河床比降先由 1.4‰增大至第 2 年的 3.11‰,然后随时间逐渐减小为 2.6‰;而

其下游段($D-F$)河床比降由 $-1.6‰$ 逐渐变缓,最后于第7年达到平衡,稳定在 $-0.19‰$ 。从斜率 dJ/dt 也可看出, $A-D$ 段前2年斜率为正,表明上游淤积厚度逐年增加,纵坡降逐年变大;第3年起斜率为负,纵坡降逐年减小,表明泥沙淤积已发展到了 D 点, D 点高程逐年抬升,与 A 点的高差逐年缩小,直至第7年为0。 $D-F$ 段前6年斜率 dJ/dt 为正,即纵坡降逐年增加,说明 D 点在逐年淤积抬升,与 F 点的高程逐年减小,直到第7年斜率变化为0,达到冲淤平衡。这与前述分析结果一致,即库区淤积平衡年限为7年。

同理,由图7也可分析得出,左汉河槽段($N-P$)河床比降于第6年不再变化,表明河床淤积演变达到平衡。左汉河道起初是正坡,2年后变为负坡,这是因为左汉河道出口处比进口处宽,并与右汉主流相接,受主流影响大,下游出口处淤积较上游严重,造成下游河床抬高幅度较大所致。

2.5 河床纵向形态变化

桃花潭右汉主河道初始时刻与冲淤平衡后的纵断面如图8所示。由图可见,初始时,该段河道在大约距上游入口800 m处以内为正坡,而800 m至下游出口处为一比降很小的负坡。河道展宽段大概位于距入口约200~600 m,平衡后展宽段河床淤积较大,以致展宽段呈现上凸形的纵断面形态。形成如此纵断面形态的原因是该河段断面宽阔,入库水流与断面形状相适应进行单宽能量调整,流速降低、水流挟沙力减小,致使泥沙大量落淤展宽河段的床面。

3 结 语

借助 MIKE 软件的水沙数学模型对沱河下游桃花潭段河道的冲淤演变进行了数值模拟,综合考察了该河段在给定水沙条件下的水流流场、含沙量分布、淤积厚度、河床比降以及河床纵断面形态的变化,得出以下结论:

(1) 桃花潭左汉河道受河道主流影响很小,流速很小,右汉随着时间的推移逐渐形成一狭长河槽,主河道在第5年以后由于上游段淤积严重,河床抬高,开始沿着靠近桃花潭右岸地势较低处向下游流动,7年以后整个河道基本断流。

(2) 右汉河道淤积明显要比左汉严重,最大淤积厚度达1.8 m,于第7年河道达到冲淤平衡。

(3) 右汉上游开阔段由于河道突然由窄变宽,水流挟沙力减小,床沙质泥沙极易落淤,造成该开阔段淤积最为严重;而左汉河道河床由于仅有较细的悬沙以等厚淤积的方式落淤,使得比降在整个过程变化不大。

(4) 从冲淤平衡后河床纵断面形态上看,因展宽段泥沙更易淤积,故其纵向河床形态呈向上凸起形状。

综上分析可知,桃花潭河段冲淤平衡年限大概为7年,平衡后主河道淤积较为严重。合理的橡胶坝群管理和运用方式,应能最大限度地减少库区泥沙淤积,使橡胶坝群库区能保持一个长期可以利用的库容,进而最大程度地发挥橡胶坝库区水面景观等的综合效益。

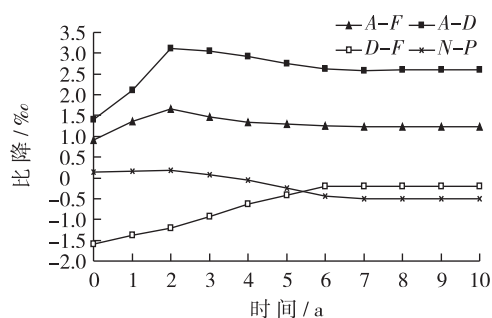


图7 10年内河床比降的历时变化

Fig. 7 Diachronic change of bed gradient in ten years

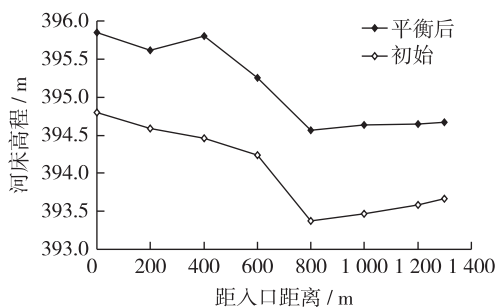


图8 主河道纵断面

Fig. 8 Longitudinal profile of main channel

参 考 文 献:

- [1] 魏兴. MIKE21 软件在平面二维水沙数值模拟中的应用[D]. 西安: 西安理工大学, 2010. (WEI Xing. Application of MIKE21 software in two-dimensional hydrodynamic and sediment transport numerical simulation[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2010. (in Chinese))
- [2] 韩其为. 水库淤积[M]. 北京: 科学出版社, 2003. (HAN Qi-wei. Reservoir sedimentation[M]. Beijing: Science Press, 2003. (in Chinese))
- [3] 王普庆. 小浪底水库运用初期库区泥沙淤积分布特征[J]. 人民黄河, 2012, 34(10): 26-27, 31. (WANG Pu-qing. Distribution characteristics of sediment deposition in the initial operation of Xiaolangdi Reservoir[J]. Yellow River, 2012, 34(10): 27-28. (in Chinese))
- [4] 张羽, 张仙娥, 鲁智礼. 典型河段悬移质泥沙模拟方法研究[J]. 水资源与水工程学报, 2007, 18(4): 37-40. (ZHANG Yu, ZHANG Xian-e, LU Zhi-li. Research on the suspended sediment simulating method in typical reach[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2007, 18(4): 37-40. (in Chinese))
- [5] 魏炳乾, 刘洋, 孟文强, 等. 沉沙池沉沙效果的平面二维数值模拟[J]. 自然灾害学报, 2013, 22(2): 21-28. (WEI Bing-qian, LIU Yang, MENG Wen-qiang, et al. Two-dimensional horizontal numerical simulation of silt depositional effect in settling basin[J]. Journal of Natural Disasters, 2013, 22(2): 21-28. (in Chinese))
- [6] 魏炳乾, 吴巍, 魏兴, 等. 浐河雁鸣湖-米家崖段泥沙淤积问题前期论证研究报告[R]. 西安: 西安理工大学, 2010. (WEI Bing-qian, WU Wei, WEI Xing, et al. Earlier stage demonstration report for sedimentation of Yanminghu to Mijiaya in Xi'an Chanba River[R]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2010. (in Chinese))
- [7] 郑珊, 吴保生. 黄河小北干流和渭河下游淤积过程模拟[J]. 水利学报, 2014, 45(2): 150-161. (ZHENG Shan, WU Bao-sheng. Simulation of sedimentation processes of the Xiaobeiganliu reach of the Yellow River and the lower Wei River[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(2): 150-161. (in Chinese))
- [8] 汪守东, 徐洪磊. 烟台港海阳港区沙滩冲淤稳定性数值模拟分析[J]. 水运工程, 2010(7): 11-17. (WANG Shou-dong, XU Hong-lei. Numerical study on scouring and silting stability of beach in Haiyang harbor area of Yantai port[J]. Port & Waterway Engineering, 2010(7): 11-17. (in Chinese))
- [9] 韦群英. 大化水库库区泥沙淤积现状分析及最终淤积预测[J]. 广西水利水电, 1997(4): 33-37. (WEI Qun-ying. Present situation analysis and final result prediction of sediment deposition in the Dahua reservoir area[J]. Guangxi Water Resources & Hydropower Engineering, 1997(4): 33-37. (in Chinese))
- [10] 英晓明, 贾后磊, 曹玲珑, 等. 海南儋州人工岛建设对海床冲淤影响数值模拟[J]. 海洋通报, 2014, 33(5): 571-575. (YING Xiao-ming, JIA Hou-lei, CAO Ling-long, et al. Numerical modeling of seabed morphological effects from the construction of artificial islands in Danzhou, Hainan[J]. Marine Science Bulletin, 2014, 33(5): 571-575. (in Chinese))
- [11] 魏炳乾, 王新宏, 吴巍, 等. 西安市浐灞河橡胶坝群工程河工模型试验研究报告[R]. 西安: 西安理工大学, 2007. (WEI Bing-qian, WANG Xin-hong, WU Wei, et al. Test research report of rubber dam group engineering physical model in Xi'an Chanba River[R]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2007. (in Chinese))
- [12] 梁志勇, 徐永年, 罗福安, 等. 引水防沙与河床演变[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2000. (LIANG Zhi-yong, XU Yong-nian, LUO Fu-an, et al. Water diversion and sediment prevention with fluvial process[M]. Beijing: China Building Materials Industry Press, 2000. (in Chinese))

Two-dimensional numerical simulation of riverbed evolution of Taohuatan in the Chan River

WEI Bing-qian¹, YAN Pei¹, PANG Jie¹, LIU Yang², ZHOU Shuang-ming¹, LI Qiang¹

(1. *College of Hydraulic and Hydropower, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China*; 2. *Jiangxi Provincial Water Conservancy Planning and Designing Institute, Nanchang 330029, China*)

Abstract: The rubber dam is a kind of water-retaining structure which has the advantages of low head, thin shell, flexible body, simple structure, convenient construction and low cost. Landscaped watercourse has been formed after building the rubber dam, which is used to retain and make lakes. But the operation of the dam will cause sedimentation in the upstream reservoir. Therefore, reasonable operation of the rubber dam is needed so as to maintain an ideal reservoir storage capacity for a long time. In this study, sediment calculation is made for ten years' design for water and sediment conditions by using MIKE software, and the simulation of bed evolution is conducted to study the sediment deposition of Taohuatan reach in the Chan River. A comprehensive survey is made to show the changes of the flow field, aggradation thickness of the bed surface, river gradient and the vertical morphology of the river bed profile. What can be concluded from the result is that: the equilibrium for scouring and siltation in the reservoir of Taohuatan can be reached at about the seventh year, and the siltation in the main channel reach is rather serious; the river bed profile at the broadening reach is slightly convex upward after the scouring and siltation are in the state of equilibrium on the whole; on the basis of the geometric characteristics, the effect of the incoming water and sediment, and the backwater effect of flowing from wide channel to narrow one, the entering sediment laden flow will decrease due to the sudden widening of the river, which will lead to the reduction of sediment carrying capacity of flow and flow energy, hence resulting in easier siltation, higher bed surface, and higher flood water level.

Key words: rubber dam; numerical simulation; bed evolution; deposition thickness; bed gradient; equilibrium year