

外秦淮河武定门闸上游减淤物理模型试验

吕升奇^{1,2}, 许郑宇^{1,2}, 唐洪武^{1,2}, 王世昭^{1,2}, 陈界仁^{1,2}

(1. 河海大学水文水资源及水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;
2. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 针对南京市外秦淮河武定门闸近年来发生泥沙淤积严重的问题, 建立了武定门闸河段物理模型, 设定两种方案进行悬沙冲淤试验, 分析偏转角为 15° 的导流墙工程对闸上游的减淤作用。结果表明: 方案 1 (将闸门至上游 60 m 开挖至设计断面), 设置导流墙后, 经过 2 年 8 个月的水沙过程, 整治段淤积量减少 30.4%; 方案 2 (将闸门至上游 240 m 开挖至设计断面), 设置导流墙后, 经过 1 个典型水文年, 整治段淤积量减少 50.8%, 经过 2 个典型水文年, 淤积量减少 44.0%, 减淤幅度下降, 河床趋于形成新的冲淤平衡, 断面地形也趋向于均匀分布; 设置偏转角为 15° 的导流墙对武定门闸上游河道有显著的减淤作用, 有助于提高河道的过流能力。

关键词: 武定门闸; 闸上淤积; 物理模型; 导流墙; 减淤

中图分类号: TV131.61 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2020)02-0063-06

Physical model experiment of silt reduction in upper reaches of Wudingmen sluice in outer Qinhuai River//LYU Shengqi^{1,2}, XU Zhengyu^{1,2}, TANG Hongwu^{1,2}, WANG Shizhao^{1,2}, CHEN Jieren^{1,2} (1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Due to serious sediment deposition in the upper reaches of Wudingmen sluice in the outer Qinhuai River in Nanjing, a physical model was established and two schemes were designed to study the silt reduction effect of a diversion wall with a 15° deflection angle in the upstream of the sluice. In scheme 1, a scope of 60 m upstream of the sluice was excavated to the design section. After two years and eight months of flow and sediment process, the sediment volume in the regulated section was reduced by 30.4% after the diversion wall configuration. In scheme 2, a scope of 240 m upstream of the sluice was excavated to the design section also with a diversion wall. The sediment volume of the regulated section was reduced by 50.8% and 44.0% after one and two typical hydrological years respectively. The range of sediment reduction decreased, the riverbed tended to form a new balance between erosion and deposition, and the topography of the section tended to show a uniform distribution. The results show that the diversion wall with a 15° deflection angle can significantly reduce the siltation in the upstream of the Wudingmen sluice and can improve the flow capacity of the channel.

Key words: Wudingmen sluice; siltation upstream of a sluice; physical model; diversion wall; sediment reduction

水闸发挥着控制下泄流量、保持上下游水位等作用,在平原河道中应用广泛^[1]。建闸后,河道上游水动力条件减弱,易在闸上游河道出现泥沙淤积现象,河道淤积导致河床抬高,河道过流能力减弱,水闸正常运行受到不利影响。20 世纪末,闸上河道淤积问题开始引起关注,一些学者对闸上淤积成因问题进行了研究。张明光^[2]论证了长期关闸运行及回水顶托是造成双台子河闸上游淤积的原因;杨华等^[3]认为造成淮阴闸上游引河淤积的主要原因是闸上引河过长以及冲淤水量不足;杨纪伟等^[4]的

试验结果表明闸前流速的骤减、闸前河型的突变是闸前泥沙淤积的主要原因;刘雅萍等^[5]认为造成闸上游河道淤积的主要原因是建闸后闸上壅水,不合理的高水位运行也加重了淤积;王世昭等^[6]对南京市外秦淮河武定门闸上游河道淤积成因进行了分析,认为主要在于闸上游弯道及闸前水动力弱。综上可知,导致闸上游淤积的原因主要是闸门的阻水作用、闸前边界的改变以及高水位运行。

在天然河道上,弯曲河道普遍可见,其产生的复杂流动结构对河床保护及河道工程设计提出更高的

要求^[7]。人们常采用导流墙、丁坝、导流坎等辅助工程措施^[8-10],试图调整、控制弯曲河道内的流态及流速分布,使之在设定距离达到一定要求^[11],此外,合理调控闸门,利用水流冲淤也是比较经济的减淤防淤措施^[12]。导流墙可以用来改变水流方向。狄帆^[13]对导流墙的数值模拟结果表明,导流墙长度越大,水流所受的扰动越大,偏转角越小,水流对导流墙的冲力越小,越有利于导流墙的稳定;冯民权等^[14]研究了导流墙的最佳布置方式及其导流效果,发现多组导流墙组合的方式下导流效果最佳;傅宗甫等^[15]认为导流墙顶应露出水面,并提出导流墙合适长度的范围;王世昭等^[6]建立了外秦淮河武定门闸上游弯道河段定床物理模型,分析了不同的导流墙布置方案对闸上游流场的影响,提出在弯道下游布置偏转角为 15° 的导流墙,能够改善弯道河段流态,减小闸前回水区范围,但没有进一步研究导流墙对河道淤积的影响效果。本文在王世昭等^[6]的研究基础上,进一步进行武定门闸上游弯道河段悬移质冲淤试验,研究偏转角为 15° 的导流墙对闸上游河道淤积的影响。

1 武定门闸概况

武定门闸是秦淮河流域的主要控制工程之一,多年平均流量约为 $38.1\text{ m}^3/\text{s}$ 。闸门为6孔开敞式结构,每孔净宽8 m,底板高程0.30 m,设计排洪流量为 $450\text{ m}^3/\text{s}$ ^[15]。2005年外秦淮河环境综合整治工程结束后,武定门闸上游河道泥沙淤积严重。于2008年4—5月对武定门闸上游河道进行整治清淤,恢复河道设计断面,但由于防冲槽地势较低,清淤河段迅速回淤,河道过流面积减少,水流排泄不畅。针对这一现状,计划通过工程措施减轻闸上游的淤积。研究河段见图1。

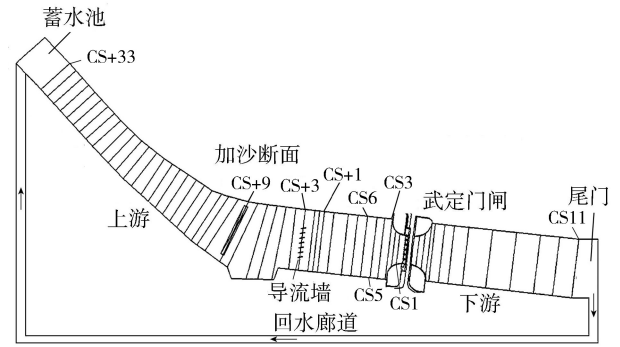


图1 武定门闸河段物理模型布置

2 闸上下游河道冲淤变化分析

根据2005—2016年武定门闸河段实测断面地形资料,对河床形态特征、上游河道冲淤量进行了分析。

2.1 河道断面形态变化分析

2008年4月进行的闸上游河道清淤范围为距闸60 m内,即图1中上游CS5断面处至闸门之间,本次选取上游CS3断面(距离闸门40 m)、CS6断面(距离闸门90 m)为代表断面,分别代表清淤范围内及清淤范围外的断面变化情况。由图2可见,2005年上游CS3断面淤积严重,相对于设计断面,左岸淤积厚度达4~6 m,右岸淤积厚度约3 m。2008年4月进行了河道清淤,CS3断面恢复至原设计断面,但至2008年11月,即清淤后6个月,该断面平均淤高约0.3 m,随后从2010年到2016年,该断面左岸持续淤积,年淤积量呈逐渐减小的趋势,右岸出现小幅度的冲刷现象。上游CS6断面位于清淤范围之外,从2005年以来,断面呈逐年淤积状态,2010年后淤积速度放缓,趋于冲淤平衡。

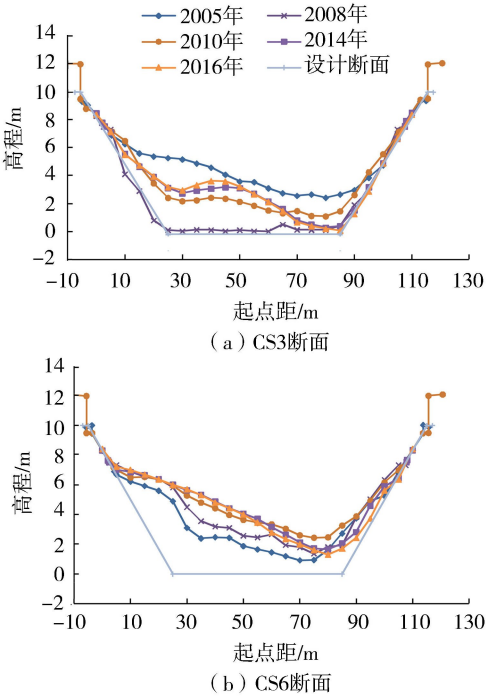


图2 武定门闸上游河段断面历年高程变化

2.2 冲淤量变化分析

表1为武定门闸上游190 m范围内河段冲淤量变化统计,表中正值表示淤积,负值表示冲刷。从表1中可以得知,2005—2016年这12年中,第一次闸前淤积量减少发生在2008年,原因是2008年4月对闸上游60 m范围内进行了清淤,通过挖泥船开挖,恢复至设计断面。清淤量约为 11700 m^3 ,清淤工程结束后,淤积情况得以改善。但是2009—2010年迅速回淤,其中2009年回淤量为 3000 m^3 ,占清淤量的26%。至2010年底,回淤量累计为 11000 m^3 ,接近2008年4月的清淤量,清淤工程效果基本消失。第二次闸前淤积量减少发生在2011年,原因是该年丰水期持续时间较长,水动力较大,对闸上游产生了

冲刷作用。第三次闸前淤积量减少发生在 2015 年, 该年淤积减少量仅占 2008 年淤积减少量的 12.7%, 原因是近年该河段趋于冲淤平衡。

表 1 闸上游河段冲淤量变化统计 10^3 m^3

时 段	时段冲淤量	累计冲淤量
2005-12—2006-11	6.167	6.167
2006-12—2007-11	2.460	8.627
2007-12—2008-11	-11.680	-3.053
2008-12—2009-11	2.997	-0.056
2009-12—2010-11	7.836	7.780
2010-12—2011-11	-5.224	2.556
2011-12—2012-09	3.074	5.630
2012-10—2013-11	1.275	6.905
2013-12—2014-11	0.041	6.946
2014-12—2015-11	-1.484	5.462
2015-12—2016-11	0.432	5.894

3 物理模型的建立及验证

3.1 模型建立

由于本试验主要研究的内容是悬移质的冲淤问题,故采用定床悬沙试验。根据试验要求,确定武定门闸河段物理模型的上边界为中和桥下游铁路桥处,距离武定门闸 820 m,下边界为武定门闸抽水站处,距离武定门闸 352 m,总长度约为 1 200 m,模型范围如图 1 所示。河道地形采用 2015 年 10 月实测资料,闸上游布置 43 条断面,闸下游 11 条断面。模型的平面比尺及垂直比尺均为 40 : 1,流速比尺为 6.32 : 1,糙率比尺为 1.85 : 1,悬沙沉速比尺为 6.32 : 1,悬沙粒径比尺为 0.76 : 1。现场取样结果表明,武定门闸河段水样悬移质泥沙中值粒径为 0.011 4 mm,需满足泥沙沉降相似及紊动悬浮相似,选取的模型沙为中值粒径 0.015 mm 的木屑,湿容重 1 150 kg/m³。加沙的位置设置在弯道前 CS+9 断面,距离闸门 340 m,试验过程中,通过预先设置的加沙装置在断面上均匀加入高含沙水流,并根据流量变化调整加沙量。试验中利用旋桨流速仪测量断面流速,悬移质含沙量利用采样烘干法确定。

3.2 模型验证

根据 2015 年 10 月 14—15 日武定门闸上游河段水位测量数据对模型进行验证,结果表明模型水位与实测水位最大偏差 0.019 m,最大相对误差仅 0.26%。对研究河段 2015 年 10 月至 2016 年 12 月水沙过程进行概化,经过 14 个月的水沙过程后,对冲淤后的地形进行测量,结果与 2016 年 12 月实测地形基本一致(图 3),最大误差 0.1 cm,最大相对误差 4.0%。验证试验表明模型与原型相似性良好,试验结果能够反映原型的水沙运动规律。

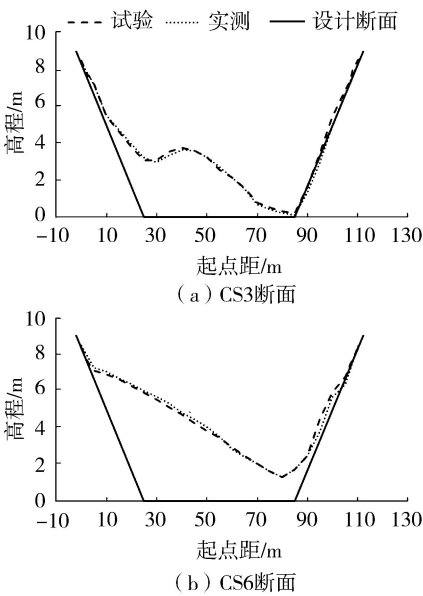


图 3 武定门闸上游河段断面地形验证

4 试验结果与分析

4.1 试验工况

为探究偏转角为 15°的导流墙对减淤及消除左右两岸淤积不均衡的作用,开展了悬沙试验,在闸上游 CS+3 断面(距离闸门 220 m)沿断面方向布置 7 个导流墙,长度均为 10 m,偏转角度为 15°,相邻导流墙间距 10 m,导流墙位置见图 1,设定以下 2 种试验方案。

方案 1:根据 2008 年 4 月河道整治的实际情况设置,将闸门至上游 60 m 开挖至设计断面,概化 2008 年 5 月至 2010 年 12 月过闸流量及水位变化,分别在无导流墙和有导流墙 2 种情况下进行冲淤试验。由于试验时间较长,分成 3 个阶段完成,第 1 阶段为 2008 年 5—11 月,第 2 阶段为 2008 年 12 月至 2009 年 12 月,第 3 阶段为 2010 年 1—12 月。每个阶段完成后进行地形测量,对比分析导流墙的减淤作用,试验要素见表 2。

方案 2:由于 2008 年 4 月河道整治工程实施后闸上游回淤迅速,方案 2 考虑增大清淤范围,将闸前的整治范围由 60 m 扩大至 240 m,即闸门至导流墙附近区域全部开挖至设计断面,概化典型水文年的流量及水位变化,分别在无导流墙和有导流墙 2 种情况下进行 2 个典型水文年的冲淤试验,在试验完成后进行地形测量,对比分析导流墙的减淤作用,试验要素见表 3。

4.2 结果分析

方案 1 实施后的淤积量统计见表 4,可见,导流墙并不能消除闸上游的淤积现象,但是能显著减少淤积量。整治段 2008 年 5—11 月淤积量减少 7.6%,

表2 方案1 试验要素

时 段	时间/ 10 ³ s	流量/ (10 ⁻³ m ³ · s ⁻¹)	上游水位/cm	下游水位/cm	闸门开启数	闸门开高/cm	模型 加沙量/kg
第 1 阶段 (2008-05—2008-11)	2.28	2.97	18.73	16.40	3	1.00	6.09
	1.63	1.71	18.03	16.31	2	1.00	2.49
	0.81	7.08	20.32	20.11	3	2.00	5.35
	2.36	3.26	19.51	16.40	3	1.00	6.87
	0.81	7.93	20.52	20.29	6	5.00	6.00
	8.06	2.94	19.41	19.21	2	1.25	21.27
第 2 阶段 (2008-12—2009-12)	8.31	1.83	18.01	16.28	2	1.25	13.71
	1.38	6.11	19.41	17.50	3	2.50	7.62
	4.07	2.89	18.80	16.11	3	1.25	10.58
	4.89	1.63	18.02	16.45	2	1.25	7.18
	3.67	10.50	19.30	19.11	6	2.50	34.64
	9.12	3.89	19.51	16.40	2	1.25	31.95
第 3 阶段 (2010-01—2010-12)	5.62	2.89	18.86	16.21	3	1.25	14.60
	6.27	5.67	19.37	17.52	3	2.50	31.98
	6.03	2.38	18.66	16.01	3	1.25	12.91
	1.14	13.28	21.32	21.13	6	4.00	13.63
	6.68	5.45	19.33	17.52	3	2.50	32.73
	5.62	2.48	18.66	16.03	3	1.25	12.52

注:闸门开启数为2 表示开左岸起第3、4 孔;闸门开启数为3 表示开左岸起第2、3、4 孔。

表3 方案2 典型水文年试验要素

时间/10 ³ s	流量/(10 ⁻³ m ³ · s ⁻¹)	上游水位/cm	下游水位/cm	闸门开启数	闸门开高/cm	模型加沙量/kg
12.96	2.20	18.87	16.35	2	1.25	28.50
2.46	5.31	19.25	17.37	3	2.50	13.06
1.62	9.22	19.10	19.00	6	3.75	14.94
1.92	21.07	24.10	24.01	6	5.00	40.45
2.64	7.31	21.54	17.88	2	1.25	19.46
8.10	2.33	19.05	16.77	2	1.25	18.87

注:闸门开启数为2 表示开左岸起第3、4 孔;闸门开启数为3 表示开左岸起第2、3、4 孔。

表4 方案1 整治段淤积量统计 10³ m³

时 段	无导流墙淤积量	15°导流墙淤积量
2008-05—2008-11	1.70	1.57
2008-12—2009-12	4.67	3.03
2010-01—2010-12	8.02	5.41
总 计	14.39	10.01

2008 年 12 月至 2009 年 12 月淤积量减少 35.1%, 2010 年 1—12 月淤积量减少 32.5%。从 2008 年 5 月至 2010 年 12 月,试验时段 2 年 8 个月内,无导流墙时整治段淤积总量为 14390 m³,设置导流墙后,淤积量为 10010 m³,减淤 30.4%。

图 4~6 分别为方案 1 中 3 个试验阶段后断面变化情况。由图 4 可见,2008 年 5—11 月水沙过程后,无导流墙时上游 CS1 断面(距离闸门 20 m)平均淤积 0.62 m,设置导流墙后平均淤积 0.45 m,减少了 27.4%。由图 5 可见,2008 年 12 月至 2009 年 12 月水沙过程后,闸前开始呈现出左岸淤积大于右岸的特征。无导流墙时上游 CS1 断面左岸平均淤积 0.87 m,设置导流墙后,左岸平均淤积 0.48 m,减少了 44.8%。由图 6 可见,2010 年 1—12 月水沙过程后,无导流墙时上游 CS3 断面淤积增幅明显,其中左岸淤积相比第 2 阶段平均增加 0.89 m,而设置

--- 无导流墙 15°导流墙 —— 设计断面

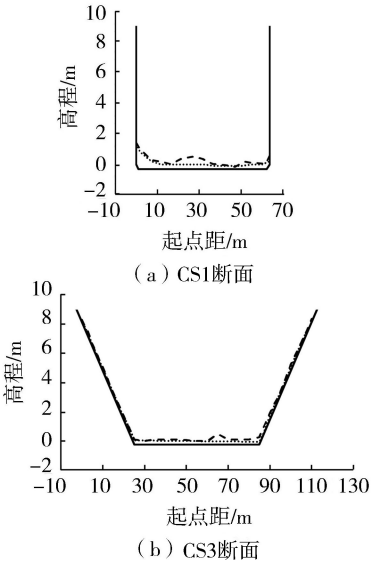


图4 方案1 第1 阶段试验后闸上游断面变化

15°导流墙后,左岸的淤积相比第 2 阶段平均增加 0.45 m,减少了 49.4%。可见,导流墙能明显减少闸前淤积。

方案 2 实施后,经过 1 个典型水文年,无导流墙时的淤积量为 14 240 m³,设置 15°导流墙后的淤积

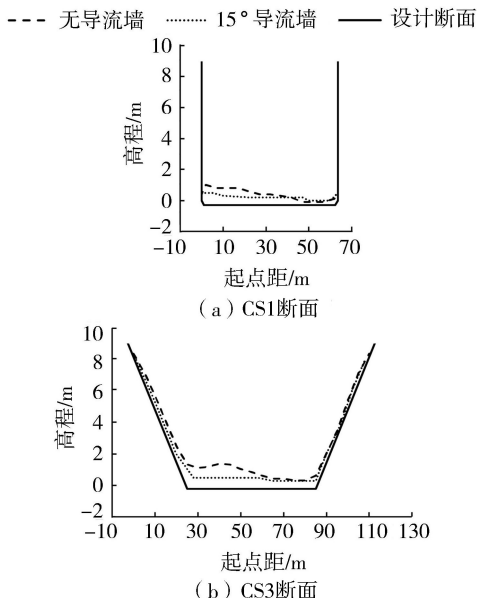


图5 方案1第2阶段试验后闸上游断面变化

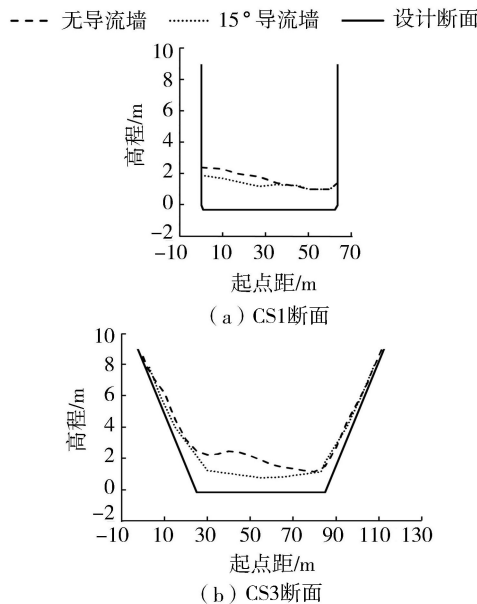


图6 方案1第3阶段试验后闸上游断面地形变化

量为 7010 m^3 ,二者相比,淤积量减少了 50.8% ,减淤幅度较大。经过2个典型水文年,无导流墙时的淤积量为 21400 m^3 ,设置 15° 导流墙后的淤积量为 11980 m^3 ,二者相比,淤积量减少了 44.0% ,减淤幅度下降,表明随着河床与水流相互作用条件的变化,趋向于形成新的冲淤平衡。

从图7可见,经过2个典型水文年后,闸上游各断面均产生较大淤积,且呈现左岸淤积大于右岸的特征。在无导流墙时,上游CS3断面左侧最大淤积 2.63 m ,右侧最小淤积 1.30 m ,相差 1.33 m ,设置导流墙后该断面左侧最大淤积 1.38 m ,右侧最小淤积 0.88 m ,相差 0.50 m ,该值比无导流墙时减小 62.4% ,这说明设置导流墙可以在减少淤积量的同时,也减小了断面左右两侧的淤积差别,这是导流墙

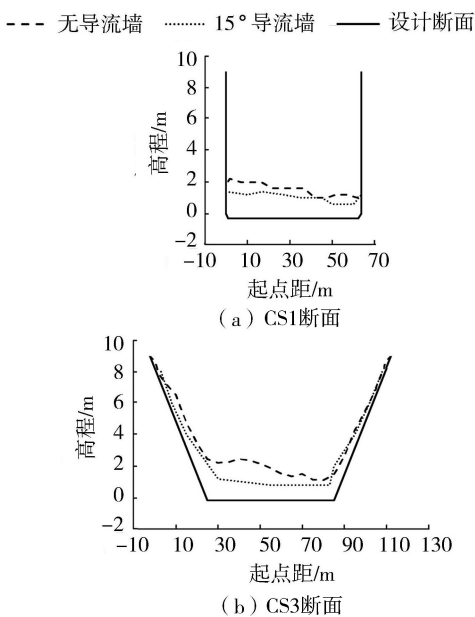


图7 方案2经过2个典型水文年后闸上游断面地形变化
调整流场的结果,在导流墙的影响下,左岸流速增大,因而淤积量也显著减少。在水流的长期作用下,断面地形趋向于均匀分布,这种变化也有利于形成更为均匀的流场,并使河道的过流能力得到提高。设置导流墙后,各断面平均淤积厚度减小的幅度也不一样,上游CS1断面、CS3断面、CS6断面、CS+1断面(距离闸门 180 m)平均淤积厚度分别减小了 29.3% 、 34.8% 、 50.0% 、 57.0% ,表明导流墙对距离较近的区域减淤效果更好。

5 结 语

根据对2005—2016年武定门闸河段实测地形资料的分析,闸前断面呈逐年淤积状态,造成河道过水断面逐渐减小。为了应对这一问题,进行了武定门闸上游弯道河段悬移质冲淤试验,设定2种淤泥开挖方案研究偏转角为 15° 的导流墙对闸上游河道

淤积的影响。试验结果表明,设置偏转角为 15° 的导流墙对武定门闸上游河道淤积有显著的减淤作用,有助于提高河道的过流能力。

参考文献:

- [1] 蓝雪春,章宏伟,王军,等. 浙江省入海河口建闸对环境的影响[J]. 水资源保护, 2015, 31(2): 79-83. (LAN Xuechun, ZHANG Hongwei, WANG Jun, et al. Environmental impacts of building sluice on river estuary of Zhejiang Province[J]. Water Resources Protection, 2015, 31(2): 79-83. (in Chinese))
- [2] 张明光. 对解决双台子河闸上游河道淤积问题的探讨[J]. 沈阳农业大学学报, 1992, 23(增刊1): 60-62. (ZHANG Mingguang. Study about solving channel fill in upper reaches of Shuangtaizihe Sluice[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 1992, 23(Sup1): 60-62. (in Chinese))
- [3] 杨华,叶兰华,曹宝华. 淮阴闸上游引河淤积问题浅析[J]. 江苏水利, 2012(9): 24-25. (YANG Hua, YE Lanhua, CAO Baohua. Analysis of Huaiyin River siltation in the upstream of the gate[J]. Jiangsu Water Resources, 2012(9): 24-25. (in Chinese))
- [4] 杨纪伟,李静,王志国,等. 无坝引水工程闸前泥沙淤积分析[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(2): 290-293. (YANG Jiwei, LI Jing, WANG Zhiguo, et al. Study on sedimentation upstream from the intake sluice of diversion water project without dam[J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(2): 290-293. (in Chinese))
- [5] 刘雅萍,黄保国,熊敬东. 盘山闸对上下游河道冲淤的影响及防淤措施[J]. 东北水利水电, 2003, 21(6): 30-31. (LIU Yaping, HUANG Baoguo, XIONG Jingdong. Effect of Panshan sluice on upper and lower reaches of rivers and siltation prevention measures[J]. Water Resource & Hydropower of Northeast China, 2003, 21(6): 30-31. (in Chinese))
- [6] 王世昭,唐洪武,俞扬,等. 外秦淮河武定门闸上游偏流淤积成因及流态改善措施[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2018, 46(3): 219-226. (WANG Shizhao, TANG Hongwu, YU Yang, et al. Study on the causes of sediment deposition and the improvement of flow pattern in the upper part of Wudingmen Sluice in the outer Qinhuai River[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2018, 46(3): 219-226. (in Chinese))
- [7] 哈岸英,刘磊. 明渠弯道水流运动规律研究现状[J]. 水利学报, 2011, 42(6): 1462-1469. (HA Anying, LIU Lei. Research situation of water flow in bend open channel[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(6): 1462-1469. (in Chinese))
- [8] 顾杰,李梦玲. 丁坝对弯道水流特性影响的试验研究[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2018, 33(6):

- 786-793. (GU Jie, LI Mengling. Experimental study on the influence of a spur dike on flow characteristics in bend channel[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2018, 33(6): 786-793. (in Chinese))
- [9] 赵苗苗,贾君德,秦景洪,等. 闸站结合泵站前池导流墩整流模拟[J]. 中国农村水利水电, 2018(4): 125-130. (ZHAO Miaomiao, JIA Junde, ZHAO Jinghong, et al. Numerical simulation of division pier rectifying flow in forebay of combined sluice-pump station[J]. China Rural Water and Hydropower, 2018(4): 125-130. (in Chinese))
- [10] 夏臣智,成立,赵国锋,等. 泵站前池单排方柱整流措施数值模拟[J]. 水利水电科技进展, 2017, 37(4): 53-58. (XIA Chenzhi, CHENG Li, ZHAO Guofeng, et al. Numerical simulation of flow pattern in forebay of pump station with single row of square columns[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37(4): 53-58. (in Chinese))
- [11] 白音包力皋,孙东坡,李国庆. 导流栅对弯道水流动量调整的研究[J]. 水利学报, 2001, 32(1): 1-6. (BAIYINBAOLIGAO, SUN Dongpo, LI Guoqing. Adjustment of flow momentum in curved channel by using diversion grid[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, 32(1): 1-6. (in Chinese))
- [12] 刘涛,孙洪滨,唐洪武,等. 六垛南闸闸下淤积现状分析[J]. 水利水电科技进展, 2008, 28(1): 54-57. (LIU Tao, SUN Hongbin, TANG Hongwu, et al. Analysis of current situation of sediment deposition in downstream area of Southern Liuduo Gate[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2008, 28(1): 54-57. (in Chinese))
- [13] 狄帆. 导流板长度与放置角度对导流板效果的影响分析[J]. 山西水利科技, 2015(2): 79-82. (DI Fan. Analysis of length and placement angle of movable diversion vanes on diversion effect[J]. Shanxi Hydrotechnics, 2015(2): 79-82. (in Chinese))
- [14] 冯民权,范术芳,郑邦民,等. 导流板的布置方式及其导流效果[J]. 武汉大学学报(工学版), 2009, 42(1): 87-91. (FENG Minquan, FAN Shufang, ZHENG Bangmin, et al. Research on way to arrange vanes and efficiency of diversion[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2009, 42(1): 87-91. (in Chinese))
- [15] 傅宗甫,顾美娟,严忠民. 闸站合建枢纽导流墙体型及适宜长度[J]. 水利水电技术, 2011, 42(10): 128-131. (FU Zongfu, GU Meijuan, YAN Zhongmin. Shape and suitable length for guide wall of combined sluice-pump station project[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2011, 42(10): 128-131. (in Chinese))

(收稿日期:2019-09-11 编辑:雷燕)