

三汊河河口闸泄流特性与整流措施

郎 韵¹,臧英平²,唐洪武¹,曾 诚¹,王玲玲¹,肖 洋¹

(1. 河海大学水利水电学院,江苏 南京 210098; 2. 南京市三汊河河口闸管理处,江苏 南京 210036)

摘要:针对外秦淮河入江口的三汊河河口闸大流量泄洪时过闸水流不均的问题,建立了江-河-水闸大范围水深平均二维数学模型来研究河口闸的泄流特性,并利用河工模型试验结果率定模型参数。对长江不同水位流量组合及河口闸上游河床地形修整工况下河口闸大流量泄流特性模拟计算结果表明,导致过闸水流不均的主要因素是河势及河道深泓位置;河口闸上游阻水建筑物的拆除对过闸偏流的改善作用有限;37 m 墙长结合 5° 偏角的导流墙可有效改善过闸水流不均的现状。

关键词:三汊河河口闸;导流墙;泄流特性;整流措施;秦淮河;长江

中图分类号:TV131.4;TV66 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2014)02-0011-05

Discharge characteristics and flow regulation measures at Sanchahe River Gate//LANG Yun¹, ZANG Yingping², TANG Hongwu¹, ZENG Cheng¹, WANG Lingling¹, XIAO Yang¹ (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Nanjing Sanchahe River Gate Management Office, Nanjing 210036, China)

Abstract: In order to deal with the deflection of flow passing through the Sanchahe River Gate, which is located at the conjunction of the external Qinhuai River and the Yangtze River, under large discharges, a two-dimensional depth-averaged mathematical model was developed to investigate the discharge characteristics. Experimental results from river models were used to calibrate the model parameters. Several typical operating conditions, including different combinations of the water level and the discharge of the Yangtze River and the correction of the upstream riverbed topography, were studied. The numerical simulation results show the following: the main reasons for the serious deflection of flow are the river regime and the location of the river thalweg; removing the water-blocking facilities upstream of the gate has limited influence in improving the pattern of flow passing through the gate; a guide wall with a length of 37 m and a deflection angle of 5° can improve the pattern of flow passing through the gate significantly.

Key words: Sanchahe River Gate; guide wall; discharge characteristics; flow regulation measures; Qinhuai River; Yangtze River

水闸枢纽选址一般要求在河道顺直、河势相对稳定的河段^[1],河口建闸往往会引起闸下河道严重淤积,给上游河道的排洪除涝带来不利影响^[2-3],而某些特殊情况下因城市河道景观需要,须滨江临河兴建水闸工程^[4-5]。三汊河河口闸(以下简称河口闸)位于外秦淮河入江口,是南京市秦淮河环境综合整治工程的重要组成部分。河口闸上游弯道受离心力的作用产生横向比降,使得凹岸(右岸)水面高凸岸(左岸)水面低^[6-7],影响了河口闸泄流能力。工程运行现状表明,河口闸大流量泄洪时,入闸水流偏于右岸,并在左岸形成大范围回流区,导致河口闸上下游、左右岸冲淤不均,进一步恶化了过流条件,甚至危及河口闸的结构稳定与安全运行,因此迫切需要对河口闸泄流过程中的水动力特性进行深入研究,揭示过闸水流不均的原因,并探究整流措施^[8-9]。

过闸水流不均可能与河口闸上下游水位、流量、河势及河床地形等多个因素有关,基于河口闸位于外秦淮河入江口的特殊地理位置,为充分考虑长江水位流量对河口闸泄流特性的影响,开展了包括长江夹江、外秦淮河及河口闸工程在内的大范围水动力特性模拟研究。本文根据 2012 年的实测地形资料和河口闸运行调度的实际工况,建立了江-河-水闸大范围水深平均二维数学模型,模拟了河口闸大流量泄洪时过闸水流流态,分析过闸水流不均的原因,并提出改善流态的措施。

1 数学模型的建立与验证

1.1 控制方程与定解条件

正交曲线坐标系下沿水深平均二维流动的控制方程组:

基金项目:水利部公益性行业科研专项(201201017);国家自然科学基金(51239003,51179058)

作者简介:郎韵(1989—),女,江苏兴化人,硕士研究生,主要从事计算水力学研究。E-mail:mecial@foxmail.com

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{g_{\xi\xi}} \sqrt{g_{\eta\eta}}} \left[\frac{\partial (Hu \sqrt{g_{\eta\eta}})}{\partial \xi} + \frac{\partial (Hv \sqrt{g_{\xi\xi}})}{\partial \eta} \right] = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{g_{\xi\xi}}} \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{g_{\eta\eta}}} \frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{uv}{\sqrt{g_{\xi\xi}} \sqrt{g_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{g_{\xi\xi}}}{\partial \eta} - \frac{v^2}{\sqrt{g_{\xi\xi}} \sqrt{g_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{g_{\eta\eta}}}{\partial \xi} - f_v = -\frac{g}{\sqrt{g_{\xi\xi}}} \frac{\partial \zeta}{\partial \xi} + F_\xi \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{g_{\xi\xi}}} \frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{g_{\eta\eta}}} \frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{uv}{\sqrt{g_{\xi\xi}} \sqrt{g_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{g_{\eta\eta}}}{\partial \xi} - \frac{u^2}{\sqrt{g_{\xi\xi}} \sqrt{g_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{g_{\xi\xi}}}{\partial \eta} + f_u = -\frac{g}{\sqrt{g_{\eta\eta}}} \frac{\partial \zeta}{\partial \eta} + F_\eta \quad (3)$$

其中 $F_\xi = \gamma_H \left(\frac{1}{\sqrt{g_{\xi\xi}} \sqrt{g_{\xi\xi}}} \frac{\partial^2 u}{\partial \xi^2} + \frac{1}{\sqrt{g_{\eta\eta}} \sqrt{g_{\eta\eta}}} \frac{\partial^2 u}{\partial \eta^2} \right)$

$F_\eta = \gamma_H \left(\frac{1}{\sqrt{g_{\xi\xi}} \sqrt{g_{\xi\xi}}} \frac{\partial^2 v}{\partial \xi^2} + \frac{1}{\sqrt{g_{\eta\eta}} \sqrt{g_{\eta\eta}}} \frac{\partial^2 v}{\partial \eta^2} \right)$

$H = d + \zeta$

式中: u 、 v 分别为 ξ 、 η 方向的流速; $g_{\xi\xi}$ 、 $g_{\eta\eta}$ 为坐标变换拉梅系数; f_u 、 f_v 为柯氏力系数; d 为参照面以下水深; ζ 为参照面以上水深; γ_H 为水平向涡黏系数。

水深平均二维模型的底部切应力 τ_b 可用阻力平方公式计算:

$$\tau_b = \frac{\rho g U |U|}{C_{2D}} \quad (4)$$

其中 $C_{2D} = \frac{6\sqrt{H}}{n}$

式中: ρ 为水的密度; g 为重力加速度; U 为水平向平均流速; n 为曼宁糙率系数。

初始条件为 $\zeta|_{t=0}=0$, $u|_{t=0}=0$, $v|_{t=0}=0$ 。出、入流开边界给定水位或流量过程。

1.2 计算区域的选取及网格剖分

为充分考虑潜洲、江心洲对河口闸大流量泄洪的影响,计算区域的选取如图 1 所示。长江上游边界为外秦淮河口上游 1100 m 处,下游边界在河口下游 900 m 处,外秦淮河上游边界根据河势条件,取为河口闸轴线上游 820 m 处。由图 1 可知,长江上游来水被江心洲隔成左右两股,右侧为江心洲右汊,流量占长江来流的 5%,左侧为潜洲右汊,流量占长

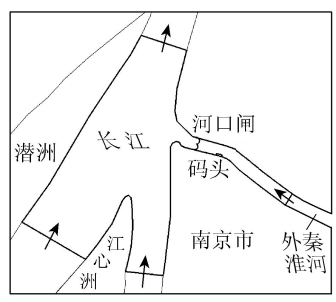


图 1 计算区域示意图

江来流的 14.25%。采用正交曲线网格剖分计算区域,并对河口闸周围网格进行局部加密。网格尺寸在 3~35 m 之间,共 182×92 个网格单元。河口闸闸室顺水流方向长 37 m,垂直水流方向长 97 m,闸室共两孔,单孔净宽 40 m,中闸墩宽 8 m,边闸墩宽 4.5 m。河口闸采用露顶式圆拱形钢闸门(又称护镜门)结构,闸门为半圆形的三铰拱钢结构,闸门圆弧凸向外秦淮河上游侧,如图 2 所示。

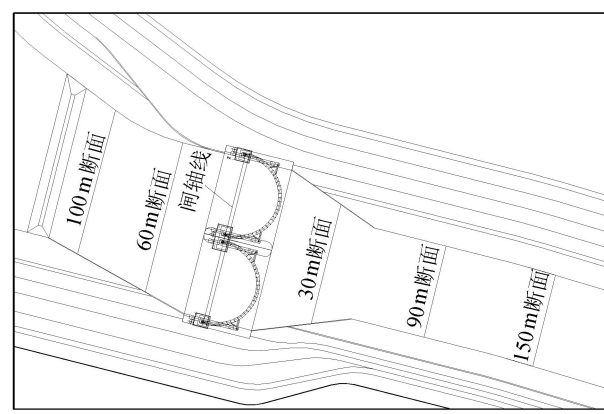


图 2 河口闸布置

1.3 模型参数选取与率定

采用河工模型试验结果对模型参数进行率定^[10],糙率分别取 0.021、0.023、0.025,以闸轴线上游 150 m、280 m、450 m 处 3 个断面流速分布作为率定目标。结果表明糙率取 0.023 时,模型计算结果与实测值吻合良好,各断面流速分布对比结果如图 3 所示(起点距零点设在左岸,见图 2)。

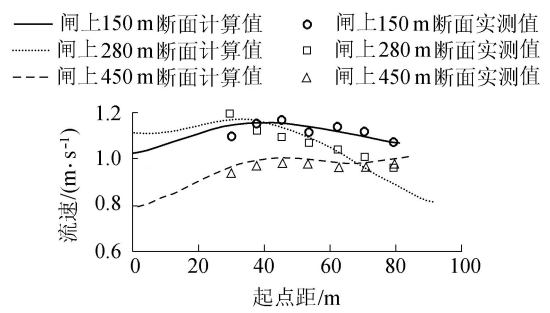


图 3 断面流速分布实测值与计算值对比

2 三汊河河口闸泄流特性数值模拟

2.1 长江水位流量对河口闸泄流特性的影响

当外秦淮河上游来流量为设计流量 600 m³/s 时,长江来流量分别取多年平均流量 2.87 万 m³/s(工况 1)、多年平均洪峰流量 5.75 万 m³/s(工况 2)、1998 年特大洪水流量 7.8 万 m³/s(工况 3),外秦淮河河口水位由河口长江断面的水位流量关系确定,以研究长江不同水情对河口闸大流量泄洪的影响。数值模拟结果表明,工况 1~3 的整体流场形态基本相似,长江段流态平稳,但工况 1 河口闸局部流

态平稳性相对较差,该工况的局部流场如图 4 所示。由图 4 可知,河口闸上游码头处的左岸绕流区长约 80 m,且因断面缩窄使得中泓流速急剧增大,断面流速分布极不均匀;进闸水流明显偏向右岸,并在左孔闸室上游形成跨度约 120 m 的大面积回流区,导致河口闸上下游、左右岸冲淤不均,严重危及河口闸的结构稳定与安全运行。

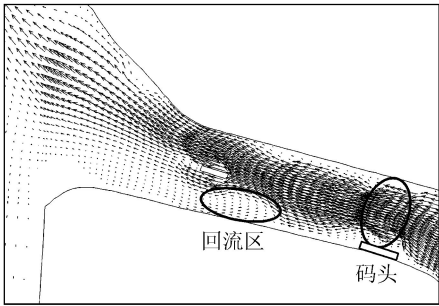


图 4 工况 1 河口闸局部流场

2.1.1 典型断面水动力特性

选取闸轴线上游 150 m、90 m、30 m 处 3 个断面和闸轴线下游 60 m、100 m 处 2 个断面进行水动力特性分析,各断面位置如图 2 所示,绘制不同工况下各断面的水位分布如图 5 所示。

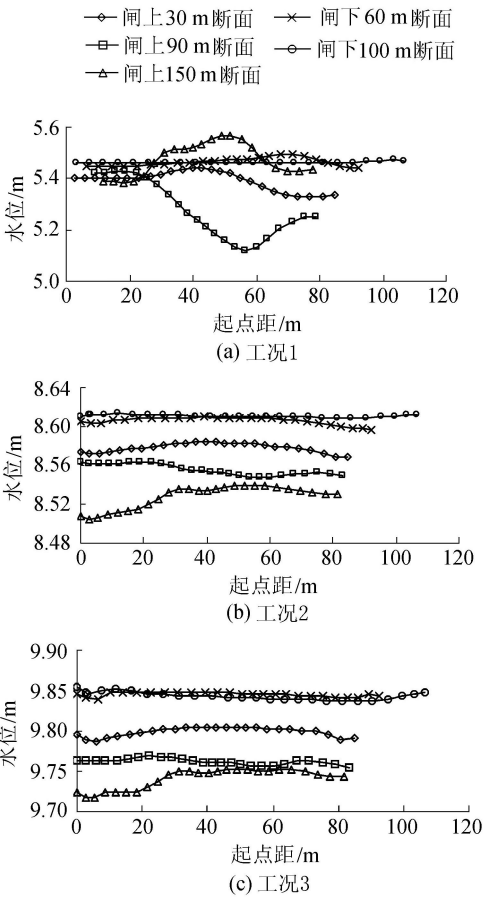


图 5 不同工况下各断面的水位分布

由图 5 可知:长江大流量时闸上各断面水面线

趋于平坦,沿流向水位略有抬升;长江小流量时闸上各断面水位呈左高右低分布,断面最大水位差可达 25 cm,偏流现象显著;受左岸码头及上游弯道的影响,闸上 150 m 断面的左岸水位反而低于右岸水位;闸下各断面水面线较为平滑,沿流向水位趋于一致。

2.1.2 左右两闸孔过流量

表 1 为长江上游不同来流条件下,河口闸左右两闸孔过流量情况。由表 1 可知,长江上游来流量越小,水位越低,河口闸左右两闸孔过流量分配越不均匀,工况 1 的右闸孔过流量约为左闸孔过流量的 4.5 倍,此时左右两闸孔局部水位差可达 16 cm。由此可见,在河口闸上下游河势及河床地形等因素的共同作用下,长江上游来流量越小,水位越低,则过闸水流流态越差,偏流越严重。

表 1 不同来流条件下左右两闸孔的过流量

工况	过流量/(m ³ ·s ⁻¹)		占总流量百分比/%	
	左孔	右孔	左孔	右孔
1	110	490	18.33	81.67
2	260	340	43.33	56.67
3	270	330	45.00	55.00

2.2 河床地形对河口闸泄流特性的影响

为研究河床地形对河口闸泄流的影响,在外秦淮河设计流量、长江低水位组合工况下,拆除河口闸上游右岸围堰、左岸码头等阻水建筑物以修整地形。河口闸下游流态平稳,受河床地形的影响较小,故此处不做修整。地形修整后的河口闸局部流场见图 6。由图 6 可知,拆除河口闸上游围堰、码头等阻水建筑物后,原先码头处的绕流及水流束窄现象消失,使得局部水流较为平顺,但对过闸水流偏流现象并无根本改善,左岸仍存在较大范围的回流区。受河道长期左淤右冲的影响,河道深泓右移,更加剧了水流的右偏态势。据此说明阻水建筑物并不是引起过闸水流不均的主要因素,河口闸过闸流态应当是由河势、河道深泓位置决定的,且外秦淮河设计流量与长江低水位的组合工况将显著放大河口闸过流不均的程度。在此不利工况条件下,必须依靠工程导流措施人为改变入流条件,以获得安全、稳定的过闸流态。

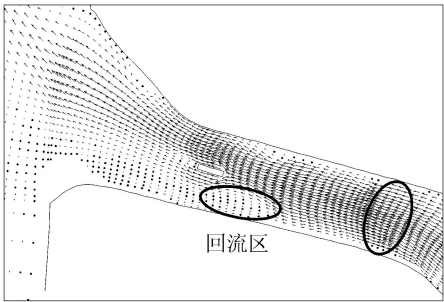


图 6 地形修整后河口闸局部流场

3 河口闸整流措施

导流墙可人为提高局部水流的纵向流速分量,达到调整并改善流态的目的。在河口闸上游侧设置导流墙,迫使原来偏向右闸孔的部分水体顺着墙体进入左闸孔,以使两闸孔水位趋于平衡。在外秦淮河设计流量、长江低水位组合工况下,根据地形地势特征以及过闸水流偏斜特性,在闸轴线法线方向上、闸室上游 50 m 处设计 4 种导流墙的布置方案:①方案 1,导流墙为 1/2 闸室长(即 18.5 m);②方案 2,导流墙长 18.5 m 且与闸轴线法向有 5°夹角;③方案 3,导流墙与闸室等长(即 37 m);④方案 4,导流墙长 37 m 且与闸轴线法向有 5°夹角。其中,5°夹角是根据未设导流墙之前,进闸水流的最大偏转角度确定的。

3.1 不同方案水动力特征

不同导流墙布置方案下闸上各典型断面的水位分布如图 7 所示。由图 7 可知,各方案均可使闸上各断面水位平均下降 2.5 ~ 3.0 cm 以上。闸上 150 m 断面上方案 2 和方案 3 的水面线几乎重合,方案 4 的水面线低于上述两方案约 7 cm。闸上 90 m 断面位于墙体上游,当导流墙长度一定时,有偏角方案对平抑左右岸水位差有明显效果,方案 4 可使得左右岸水位差由原来的 25 cm 减至 12 cm。闸上 30 m 断面

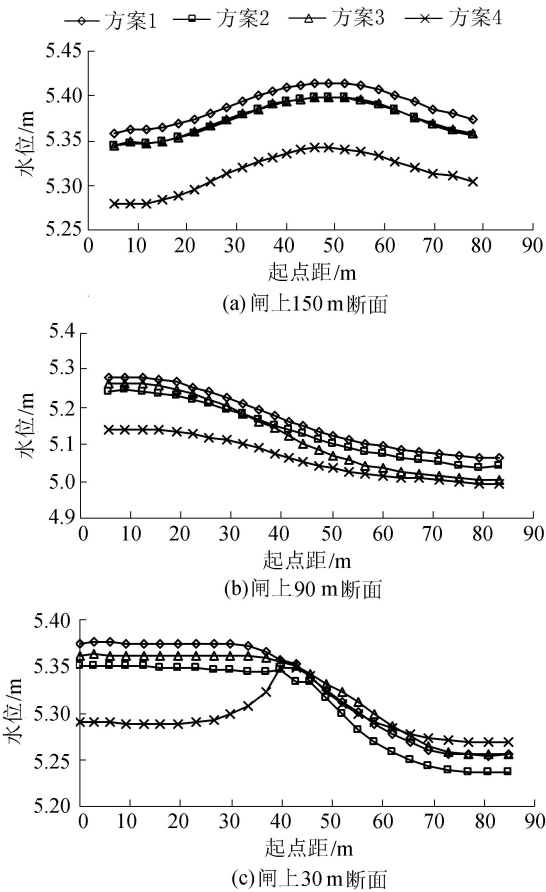


图7 不同导流墙布置方案闸上典型断面的水位分布

位于墙体下游,受导流墙作用,左右岸水位均有下降,方案 4 更可使左岸水位降至 5.3 m 以下,同时右岸水位稍有抬升,使入闸水流左右岸水位基本持平,近似于对称分布。

3.2 左右两闸孔过流量

表 2 为不同导流墙布置方案下河口闸左右两闸孔过流量。由表 2 可知,较长的墙长结合墙体偏角的导流墙布置方案可以显著改善过闸流态,方案 4 可使右孔分流比降到 50.83%,表明此时左右两闸孔过流量几乎相同。

表 2 不同导流墙布置方案下左右两闸孔的过流量

方案	过流量/(m³·s⁻¹)		占总流量百分比/%		左右闸孔平均水位差/cm
	左孔	右孔	左孔	右孔	
1	165	435	27.50	72.50	11
2	210	390	35.00	65.00	7
3	190	410	31.67	68.33	10
4	295	305	49.17	50.83	1

综上所述,墙长和墙体偏角是影响导流墙导流效果的两个重要因素。“有墙长无偏角”或者“有偏角无墙长”方案均不能起到良好的导流作用。数值模拟计算结果表明,与闸室等长(即 37 m)有 5°偏角方案的导流效果最优。图 8 是该方案的河口闸局部流速云图,表明该方案可以给出平稳、对称的入闸流态。

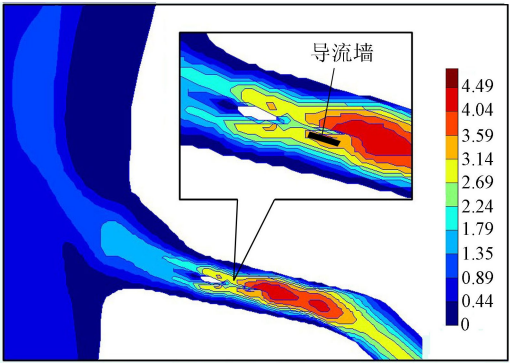


图 8 方案 4 河口闸局部流速云图(单位:m/s)

4 结 论

- a. 河口闸大流量泄洪时,过闸流态普遍存在主流偏右的现象,外秦淮河大流量与长江低水位组合工况将显著放大河口闸过流不均的程度。
- b. 致使河口闸大流量泄洪偏流的主要因素是河势及河道深泓位置,河口闸上游阻水建筑物的拆除对过闸流态的改善作用较小。
- c. 导流墙墙长 37 m、偏角 5°时,过闸流态平稳、对称,整流效果最好。

参考文献:

[1] SL265—2001 水闸设计规范[S].

- [2] 曲红玲, 窦希萍, 赵晓冬, 等. 不同类型建闸河口闸下淤积模拟计算[J]. 海洋工程, 2011(2): 59-67. (QU Hongling, DOU Xiping, ZHAO Xiaodong, et al. Simulation of siltation downstream of floodgate in estuaries[J]. The Ocean Engineering, 2011(2): 59-67. (in Chinese))
- [3] 徐雪松, 窦希萍, 陈星, 等. 建闸河口闸下淤积问题研究综述[J]. 水运工程, 2012(1): 116-121. (XU Xuesong, DOU Xiping, ZHANG Xinzhou, et al. Overview of siltation downstream estuarine floodgates[J]. Port & Waterway Engineering, 2012(1): 116-121. (in Chinese))
- [4] 汪朗峰. 大沙河河口水闸工程方案设计[J]. 中国农村水利水电, 2007(6): 110-111. (WANG Langfeng. The design of Dasha River Estuarine Sluice[J]. China Rural Water and Hydropower, 2007(6): 110-111. (in Chinese))
- [5] 吴卫, 季永兴, 王瑟澜, 等. 苏州河河口水闸平面二维水流数值模拟[J]. 水利水电科技进展, 2007, 27(增刊1): 52-55. (WU Wei, JI Yongxing, WANG Selan, et al. A two-dimensional numerical simulation of Suzhou River Estuarine Lock Project[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2007, 27(Sup1): 52-55. (in Chinese))
- [6] 王珍, 邱静, 王丽雯, 等. 弯曲河道水力特性对枢纽运行的影响及改善措施的试验研究[J]. 广东水利电力职业技术学院学报, 2010(2): 1-5. (WANG Zhen, QIU Jing, WANG Liwen, et al. Experimental research on the impact of bend channel hydraulic characteristics on the operation of hydro-junction and the improve measures[J]. Journal of Guangdong Technical College of Water Resources and Electric Engineering, 2010(2): 1-5. (in Chinese))
- [7] 张瑞瑾, 谢鉴衡, 陈文彪. 河流动力学[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2007: 154-168.
- [8] 胡孜军, 王玲玲, 成高峰, 等. 三河闸泄流流态与进流纠偏数值研究[J]. 水利学报, 2011, 42(11): 1349-1354. (HU Zijun, WANG Lingling, CHENG Gaofeng, et al. Numerical study on the inflow and rectification measures of the Sanhe Sluice[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(11): 1349-1354. (in Chinese))
- [9] 黄章羽, 马晓忠, 王玲玲, 等. 复杂嵌套网格模型及其在三河闸大修工况泄流流态模拟中的应用[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2012, 40(6): 61-66. (HUANG Zhangyu, MA Xiaozhong, WANG Lingling, et al. Application of a nested grid hydrodynamic model to discharge pattern simulation overhaul conditions of Sanhe Sluice[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2012, 40(6): 61-66. (in Chinese))
- [10] 河海大学水利水电学院. 南京秦淮河三汊河闸工程(移位方案)水工模型试验研究报告[R]. 南京: 河海大学, 2004.

(收稿日期: 2013-04-02 编辑: 熊水斌)

(上接第 10 页)

- [4] 王辛石. 陕西省病险水库降等与报废工作纪实[J]. 中国水利, 2003(19): 36-37. (WANG Xinshi. The scrap and deduction documentary work of Shaanxi dilapidated reservoirs[J]. China Water Resources, 2003(19): 36-37. (in Chinese))
- [5] 李雷, 盛金保. 中国小型水库安全现状调查及对策研究报告[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2002.
- [6] 韩其为, 杨小庆. 我国水库泥沙淤积研究综述[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2003, 1(3): 169-178. (HAN Qiwei, YANG Xiaoqin. A review of the research work of reservoir sedimentation in China[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2003, 1(3): 169-178. (in Chinese))
- [7] 蔡守华. 小型水库科学管理理论及应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.
- [8] 李雷, 王仁钟, 盛金保, 等. 大坝风险评价与风险管理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.
- [9] 王志涛, 江超, 姜晓琳, 等. 基于模糊理论的土石坝风险综合评价方法[J]. 水利与建筑工程学报, 2011, 9(2): 27-30. (WANG Zhitao, JIANG Chao, JIANG Xiaolin, et al. Research on comprehensive evaluation method for risk of earth-rock dam based on fuzzy[J]. Logic Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2011, 9(2): 27-30. (in Chinese))
- [10] 王艳艳, 李欣, 刘祥锋, 等. 基于模糊数学的小水电站状态评估[J]. 水力发电, 2008, 34(1): 95-97. (WANG Yanyan, LI Xin, LIU Xiangfeng, et al. Condition assessment of small hydropower station based on fuzzy mathematics[J]. Water Power, 2008, 34(1): 95-97. (in Chinese))
- [11] 青海省都兰县沙柳河四队水库大坝安全鉴定评价报告[R]. 西宁: 青海禹兴水利水电设计有限公司, 2009.
- [12] 都兰县沙柳河四队水库除险加固工程初步设计报告[R]. 西宁: 青海禹兴水利水电设计有限公司, 2010.
- [13] 青海省都兰县沙柳河四队水库报废论证报告[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2012.

(收稿日期: 2013-04-03 编辑: 熊水斌)

