

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2015.06.006

新洋港入海港口冲淤保港需水量研究

鞠彬^{1,2}, 杭庆丰³, 李琼芳^{1,2}, 李迷⁴, 李煜⁵

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学国际河流研究所, 江苏 南京 210098;
3. 江苏省水文水资源勘测局盐城分局, 江苏 盐城 224002;
4. 上海市浦东新区水文水资源管理署, 上海 200129; 5. 河海大学力学与材料学院, 江苏 南京 210098)

摘要:为解决入海港口修建挡潮闸后对涵闸排涝效率以及入海港口通航能力产生较大影响的闸下淤积问题,基于 MIKE11 模型中的 CST 模块对盐城市入海港口——新洋港冲淤保港需水量进行研究。MIKE11 模型中的 CST 模块由水动力学模型与泥沙输移模型耦合而成,根据闸下 60 m、970 m、3 030 m 三处断面的实测水位、流量和河床淤积高度资料,进行水动力学模型和泥沙输移模型参数率定,最终在设定闸下淤积高度不超过 0.1 m 的条件下,由 MIKE11 CST 模型确定出的新洋港冲淤保港生态流量为 80 m³/s,接近于 2006 年 12 月新洋港引江冲淤实验中得出的不冲不淤情况下的保港流量 85 m³/s。
关键词:入海港口; 闸下淤积; 潮汐运动; MIKE11 模型; 冲淤保港需水量; 新洋港; 盐城市
中图分类号:TV213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2015)06-0537-05

Study of water requirement for silt scouring in seaward channels at Xinyang Port

JU Bin^{1,2}, HANG Qingfeng³, LI Qiongfang^{1,2}, LI Mi⁴, LI Yu⁵

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Center for International River Research, Hohai University, Nanjing 210098, China;
3. Yancheng Branch, Jiangsu Province Hydrology and Water Resources Investigation Bureau, Yancheng 224002, China;
4. Hydrology and Water Resources Management Agency of Pudong New Area, Shanghai 200129, China;
5. College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to reduce the siltation downstream of tide gates constructed in a seaward channel that has a significant impact on the efficiency of the drainage culvert and navigation capability of the seaward channel, the CST module in the MIKE11 model was used to study the water requirement for silt scouring in the seaward channel at the Xinyang Port in Yancheng City. The CST module was developed by coupling a hydrodynamic model and sediment transport model, with the model parameters calibrated using the measured data of water level, flow rate, and siltation height at three sections, located, respectively, 60 m, 970 m and 3 030 m downstream of the gate. The calculated ecological flow rate for silt scouring and port protection with the MIKE11 CST model was 80 m³/s under a siltation height of no more than 0.1 m. This value was close to the flow rate of 85 m³/s obtained from experiments on silt scouring by water diversion from the Yangtze River at the Xinyang Port in December 2006, under the conditions of no silting and no scouring.

Key words: seaward channel; siltation downstream of gate; tidal movement; MIKE11 model; water requirement for silt scouring and port protection; Xinyang Port; Yancheng City

收稿日期: 2015-01-30

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41171220);“十二五”国家科技支撑计划(2012BAB03B03);水利部公益性行业科研专项(201001069,201101052)

作者简介: 鞠彬(1991—),男,江苏泰州人,硕士研究生,主要从事水文学及水资源研究。E-mail: hhu_09jubin@163.com

通信作者: 李琼芳,教授。E-mail: qfli@hhu.edu.cn

沿海港口的潮汐运动,是造成入海港口淤积的基本要素^[1]。建闸后挡潮闸截断了涨潮流向上游河道的传输,改变了潮汐的运动规律,加重了闸下港道的淤积程度^[2]。河道回淤使得河道过水断面面积变小,排水能力下降,对涵闸排涝效率以及入海港口通航能力有很大的影响^[3],因此,研究沿海港口冲淤保港需水量既具有理论意义又具有实用价值。近年来对于入海港口冲淤保港需水量的研究逐步增多,朱建英等^[4]对里下河地区引江冲淤保港的联合调度方式进行研究,提出了地区最小有效冲淤总流量;丁玉前^[5]对大丰王港闸下游河道淤积成因进行了分析,并提出了相应的冲淤保港对策;朱明成^[6]对江苏淤涨型海岸闸下淤积问题进行分析。应用耦合水动力学模型和泥沙输移模型计算冲淤保港需水量的相关研究,特别是针对江苏沿海地区的研究鲜见报道。

本文选取盐城市入海港口——新洋港作为研究对象。新洋港于 1957 年建成,是里下河地区涝水自排入海的主要通道之一,闸下港道长 17.5 km,因港口滩面较低,在潮流和风浪作用下,建闸后平面变形,至 20 世纪 60 年代后期港口曾增长到 29 km。1971 年春进行闸下港口裁剪,涨潮流调节库容量达 600 万 m³,落潮流可增加流量约 200 m³/s,使闸下港道的淤积状况得到改善。但随后几年弯道段逐渐淤积,调节库容逐步减少,闸下港口发生迅速回淤。1991 年和 2003 年的洪水使得闸下河段淤积有所改善,但之后几年淤积量加大,已达到洪水发生前的状况。近几年来,闸下港口淤积情况总体上仍呈增加趋势。研究其冲淤保港需水量对于保障港口排水能力很有必要。本文基于 MIKE11 模型中的 CST 模块计算了新洋港冲淤保港需水量,并与冲淤实验所得到的不冲不淤流量进行比较,成果可为沿海入海港口的管理维护提供参考。

1 水动力-泥沙耦合模型的构建

1.1 水动力-泥沙耦合模型的选择

潮汐河道淤积的泥沙主要来源于两方面^[7]:一是下泄径流从上游地区挟运来的泥沙;二是涨潮流从河口以外区域挟运来的泥沙。河口以外区域的泥沙来源只有 2 种可能,一种是来自该地区广阔的潮滩,另一种是潮流从外海带入的。

闵凤阳等^[8]研究发现,里下河地区河流长度均较短(最长的射阳河仅 210 km),属弱潮海相型河口,河口以上的径流多受河网或湖沼的调节,下泄入海径流少,流域内产沙量也少,因此可认为闸下河道内的泥沙基本来自河口以外的区域即黄海。

分析邻近河流灌河入海口的燕尾港站的泥沙数据发现,泥沙的平均粒径为 0.0076~0.0147 mm。根据泥沙颗粒分类标准可知,新洋港入海港口内的泥沙属于粉沙,故可选用 MIKE11 软件中的 CST 模块进行模拟。MIKE11 模型中的 CST 模块由水动力学模型与泥沙输移模型两部分耦合组成。

1.2 水动力学模型

水动力学模型的基本控制方程为圣维南方程组,圣维南方程组是由法国学者在 1871 年提出的一维明渠非恒定流方程组,包括连续方程和动量守恒方程^[9]。圣维南方程组可以用来描述工程应用中的水流运动形式,如河道内的洪水运动、感潮河段中的水流运动等,其具体形式如式(1)和式(2)所示。

∂A/∂t + ∂Q/∂x = q

∂Q/∂t + ∂(αQ^2/A)/∂x + gA ∂h/∂x + gQ|Q|/C^2AR = 0

式中:A——断面过流面积,m²;t——时间坐标,s;Q——断面流量,m³/s;x——空间坐标,m;q——单位河长的旁侧入流流量,m²/s;α——垂向速度分布系数;g——重力加速度,m²/s;h——水位,m;C——谢才系数;R——水力半径,m。

圣维南方程组属于一阶拟线性双曲型的微分方程组,难以求出其解析解,目前多用数值离散的方法进行近似解的求解。其中具备格式简单、求解方便等优点的有限差分法在计算水力学中最为常用。本文采用 Abbott-Ionescu 六点隐式格式离散方程组,其可无条件稳定,即使在相当大的克朗数下,计算依然稳定,不会出现弥散现象^[10],故而可以在模型计算时选取较长的时间步长,来节省计算的时间和存储空间。

连续方程、动量方程采用 Abbott-Ionescu 六点隐式格式离散后的形式,如式(3)和式(4)所示。

α_j Q_{j-1}ⁿ⁺¹ + β_j h_jⁿ⁺¹ + γ_j Q_{j+1}ⁿ⁺¹ = δ_j

$$\alpha_j h_j^{n+1} + \beta_j Q_j^{n+1} + \gamma_j h_{j+1}^{n+1} = \delta_j$$

(4)

其中

$$\alpha_j = f(A) \qquad \beta_j = f(Q_j^n, \Delta t, C, A, R) \qquad \gamma_j = f(A)$$

1.3 泥沙输移模型

河道泥沙输移模型主要包括沉降和冲刷两部分^[11]。当河床切应力 τ 小于等于沉降临界切应力 τ_{ed} 时, 沉降为主; 当河床切应力 τ 大于等于冲刷临界切应力 τ_{ce} 时, 冲刷为主。

其中沉降率 D 、冲刷率 E 计算公式如下:

$$D = \frac{\omega c}{h^*} \left(1 - \frac{\tau}{\tau_{ed}} \right) \qquad E = \frac{M^*}{H} \left(\frac{\tau}{\tau_{ce}} - 1 \right)^f$$

(5)

式中: ω ——平均悬移质泥沙沉速, m/s; c ——悬移质泥沙浓度, kg/m³; h^* ——沉降超出平均水深, m; M^* ——河床侵蚀系数, g/(m² · s⁻¹); H ——水深, m; f ——侵蚀指数。

2 水动力-泥沙耦合模型在新洋港的应用

2.1 应用思路

盐城新洋港的感潮河段由于潮汐带入的大量泥沙沉积导致过水断面面积变小, 排水能力下降, 因而本次研究的冲淤积保港需水量为保障河段维持一定的河槽容积和排水能力的需水量。计算思路是: 在一定的河道水沙条件下, 以河床淤积高度为控制对象, 调节新洋港闸的下泄水量, 使得控制断面河床淤积高度处于给定范围内, 得到的下泄水量即为河段的冲淤保港需水量^[8]。

2.2 步长的选择

一般来说, 时间和空间步长越小, 模型的计算结果精度越高。但是时间和空间步长越小要求的计算时间、存储空间和计算量就越大。工程应用经验也表明, 过大的时间步长容易使得计算结果过分坦化而失真, 过小的时间步长容易使某些非线性的小扰动导致计算失稳^[12]。鉴于这些考虑, 此次模型计算的时间步长取 1 min, 存储时间步长取 60 min, 而空间步长选用 200~500 m。

2.3 边界条件设定

在非恒定流计算中, 边界条件的设定对模型计算的影响往往是至关重要的, 边界条件的设定必须符合水流的物理特性以及控制方程组的定解性质。水动力学模型边界组合类型如表 1 所示。研究表明, 采用第 2 种组合下的模型计算结果容易收敛, 数据的稳定性也比较好^[13]。

本次研究选取新洋港闸下段为研究河段。因此在水动力学模型率定、检验和计算过程中, 上边界条件采用流量过程线, 下边界条件采用感潮河流的潮水位过程线。而在泥沙输移模型率定、检验和计算过程中, 上边界为新洋港闸下, 认为其含沙量为零; 下边界选取距离入海口最近的有含沙量实测资料的监测断面。

2.4 参数率定

2.4.1 水动力学模型参数率定

水动力学模型率定的基本参数为河床糙率系数 n 。天然河道的糙率系数与很多因素有关, 不仅沿河道长度方向会发生变化, 而且在同一断面也随水位的变化而不同。在有实测资料的情况下, 河床糙率系数可分段率定。本文采用试错法进行率定, 即根据闸下 60 m、970 m、3 030 m 断面实测的水位资料或流量资料, 调试河道的糙率系数, 使得计算水位流量过程与实测水位流量过程相吻合。

选用新洋港 2006 年 12 月的实测流量资料进行模型参数率定, 发现河床糙率系数沿空间分布介于 0.02~0.03 之间。选取新洋港的大、中、小潮的潮位过程作为下边界, 结合其他实测资料进行模型的检验, 水动力模型参数率定与检验结果分别见图 1 和图 2。

从图 1 可以看出, 水动力学模型模拟的新洋港流量过程与实测的流量过程拟合度总体较好, 其确定性系数为 0.63, 峰值模拟总体较好, 在 20 h 和 80 h 左右计算的峰值比实测的峰值要大, 这是由于新洋港闸下断面

表 1 水动力模型边界条件组合方案

Table 1 Combined schemes of boundary conditions for hydrodynamic model

组合方案	上边界条件	下边界条件
1	$Z(t)$	$Z(t)$
2	$Q(t)$	$Z(t)$
3	$Z(t)$	$Q(t)$
4	$Q(t)$	$Q(t)$
5	$Z(t)$	$Q(Z)$
6	$Q(t)$	$Q(Z)$

注: $Z(t)$ 代表水位过程, $Q(t)$ 代表流量过程, $Q(Z)$ 代表水位-流量关系。

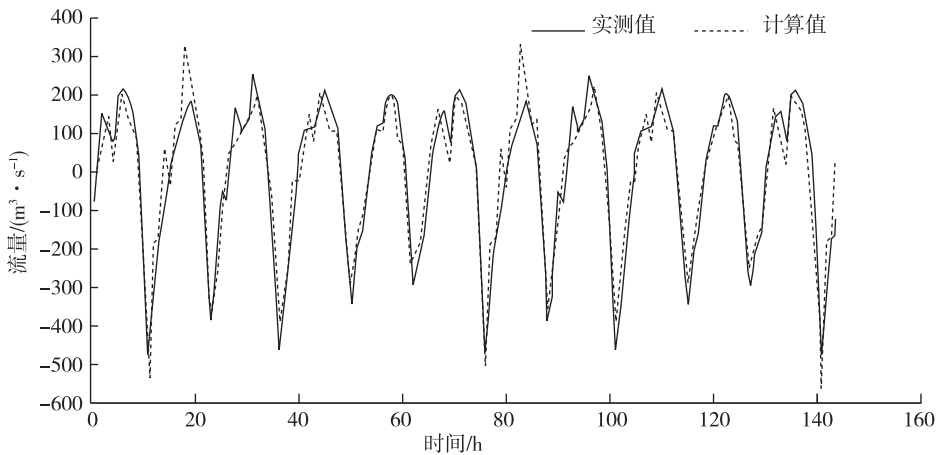


图1 新洋港率定期计算流量和实测流量比较

Fig. 1 Comparison of calculated and measured flow rates during calibration period at Xinyang Port

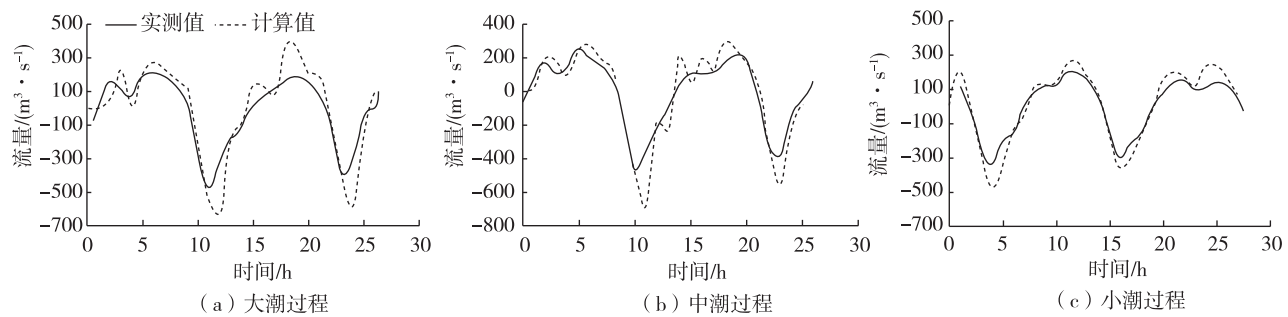


图2 新洋港大、中、小潮过程计算流量和实测流量比较

Fig. 2 Comparison of calculated and measured flow rates during great tide, moderate tide, and neap tide processes at Xinyang Port

宽度沿程变化较大而实测断面资料较少所导致的。图2给出了新洋港大、中、小潮潮位过程计算流量与实测流量。计算流量过程和实测流量过程整体拟合度较好,其确定性系数分别为0.8、0.83和0.88,流量过程的峰值模拟也很好。

2.4.2 泥沙输移模型参数率定

选取距离新洋港闸60 m、970 m和3 030 m处的2006年12月的监测资料对模型进行率定,泥沙模型的率定结果如图3所示。闸下泥沙淤积量较小是目前数值模拟和物理模型实验中普遍存在的问题,但实测的河床淤积高度均匀分布在计算的闸下沿程河床淤积高度曲线两侧,河床淤积高度平均误差为27.58%,实测点模拟情况较好,表明该模型中参数选取是合理的,在现有资料的基础上,所建立的模型能够模拟新洋港闸下河床淤积高度变化。

2.5 新洋港冲淤保港需水量计算

沿海地区径流年内分配不均,各挡潮闸排水量集中在汛期,汛期4个月排水量占全年排水量的60%~70%,非汛期8个月排水量只占全年排水量的30%~40%,而建闸后水流发生潮波变形,以及涨潮输沙量大于落潮输沙量的不平衡输沙现象,造成非汛期闸下港道的普遍回淤。因此保持航道不淤或少淤的关键,在于增加枯水期落潮阶段排水量。本次计算冲淤保港需水量设定河床的淤积高度保持在0.1 m以下^[14]。

图4为新洋港在落潮阶段上边界流量分别取40 m³/s和80 m³/s时计算的闸下河床淤积高度。当上

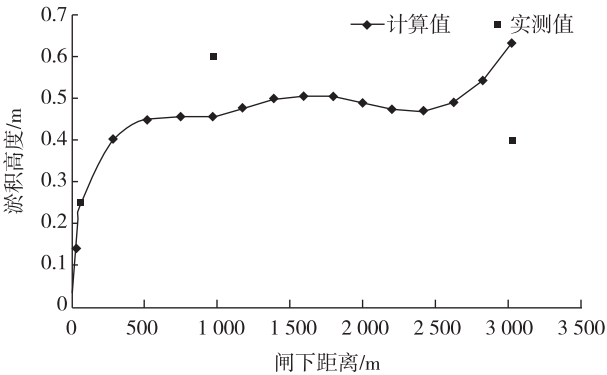


图3 新洋港闸下河床计算淤积高度和实测淤积高度比较

Fig. 3 Comparison of calculated and measured siltation heights on riverbed downstream of gate at Xinyang Port

边界流量为 $40\text{ m}^3/\text{s}$ 时,闸下河床淤积高度在 0.15 m 左右;当流量为 $80\text{ m}^3/\text{s}$ 时,闸下河床淤积高度为 $0.02\sim 0.08\text{ m}$ 。故认为新洋港冲淤保港需水量为 $80\text{ m}^3/\text{s}$ 以上。该结果与新洋港引江冲淤实验得出的新洋港不冲不淤所需流量 $85\text{ m}^3/\text{s}$ 很接近,表明由水动力-泥沙耦合模型计算得到的冲淤保港需水量 $80\text{ m}^3/\text{s}$ 是可靠的。

3 结 语

选取盐城市五大入海通道中的新洋港作为研究对象,基于 MIKE11 模型 CST 模块计算其冲淤保港需水量。在设定闸下淤积高度不超过 0.1 m 的条件下,由模型计算得到冲淤保港需水量为 $80\text{ m}^3/\text{s}$,并由新洋港引江冲淤实验结果验证了其可靠性。研究成果为沿海港口冲淤保港需水量的计算提供了一条既经济又可行的途径,也为沿海入海港道的管理维护提供科学依据。

参考文献:

[1] 马小雪,杨军,曾春芬,等.江苏沿海四港感潮河段非汛期水沙运动特点初探[J].人民长江,2014,45(19):9-12.(MA Xiaoxue, YANG Jun, ZENG Chunfen, et al. Preliminary study on flow and sediment transport characteristic of tidal reaches of four coastal channels in Jiangsu Province in non-flood period[J].Yangtze River, 2014, 45(19):9-12.(in Chinese))

[2] 施春香.挡潮闸下游河道淤积原因分析及冲淤保港措施研究;以王港闸为例[D].南京:河海大学,2006.

[3] 万正松,闵凤阳,张志林,等.长江口南支分流分沙比观测与分析[J].南京大学学报:自然科学版,2009,45(3):416-423.(WAN Zhengsong, MIN Fengyang, ZHANG Zhilin, et al. Observations and analyses of the water and sediment discharge ratios in the southern branch, Changjiang Estuary[J].Journal of Nanjing University: Natural Sciences, 2009, 45(3):416-423.(in Chinese))

[4] 朱建英,季红飞,陆体成,等.试论里下河地区引江冲淤保港之联合调度[J].水文,2009(4):44-47.(ZHU Jianying, JI Hongfei, LU Ticheng, et al. Discussion on joint operation of diverting water from the Yangtze River and reducing sedimentation in channels of Lixiahe region[J].Journal of China Hydrology, 2009(4):44-47.(in Chinese))

[5] 丁玉前.王港闸下游河道淤积成因分析与冲淤保港对策[J].江苏水利,2009(8):27-28.(DING Yuqian. Analysis of the course of sedimentation in lower approach of the floodgate and research of the project of bring into the tidewater and eroding the Sedimentation of the WangGang Floodgate[J].Jiangsu Water Conservation, 2009(8):27-28.(in Chinese))

[6] 朱明成.江苏淤涨型海岸闸下淤积问题初探[J].江苏水利,2014(6):10-12.(ZHU Mingcheng. The study of gates siltation problem in Jiangsu silting coastal[J]. Jiangsu Water Conservation, 2014(6):10-12.(in Chinese))

[7] 高祥宇,窦希萍,朱明成.入海河口闸下河道泥沙淤积危害评估研究[J].海洋工程,2013,31(5):55-61.(GAO Xiangyu, DOU Xiping, ZHU Mingcheng. Research of hazard evaluation on sediment deposition downstream of the sluice in estuaries[J]. The Ocean Engineering, 2013, 31(5):55-61.(in Chinese))

[8] 闵凤阳,汪亚平.江苏淤泥质海岸入海河道闸下淤积研究[J].海洋科学,2008,32(12):87-91.(MIN Fengyang, WANG Yaping. Study on the sediment siltation downstream tidal barriers in the North of Jiangsu Province[J]. Marine Sciences, 2008, 32(12):87-91.(in Chinese))

[9] 汪德燿.计算水力学理论与应用[M].南京:河海大学出版社,1989.

[10] SEO I W,CHEONG T S.Predicting longitudinal dispersion coefficient in natural streams [J].Journal of Hydraulic Engineering, 1998,124(1):25-32.

[11] 武亚菊,崔树彬,刘俊勇,等.MIKE11 AD 模型在平原感潮河网水环境治理研究中的应用[J].人民珠江,2012(6):68-70.(WU Yaju, CUI Shubin, LIU Junyong, et al. Study on water environment of Plain tidal river based on MIKE11 AD model[J]. Pearl River, 2012(6):68-70.(in Chinese))

[12] 文礼,德意.计算水力学理论及应用[M].西安:陕西科学技术出版社,2001.

[13] 袁雄燕,徐德龙,丹麦 MIKE21 模型在桥渡壅水计算中的应用研究[J].人民长江,2006,37(4):31-32.(YUAN Xiongyan, XU Delong. Study on calculating water discharge crossing the bridge based on MIKE21 model[J].Yangtze River, 2006, 37(4):31-32.(in Chinese))

[14] 龚政,靳闯,张长宽,等.江苏淤泥质潮滩剖面演变现场观测[J].水科学进展,2014,25(6):880-887.(GONG Zheng, JIN Chuang, ZHANG Changkuan, et al. Surface elevation variation of the Jiangsu mudflats: field observation[J].Advances in Water Science, 2014,25(6):880-887.(in Chinese))

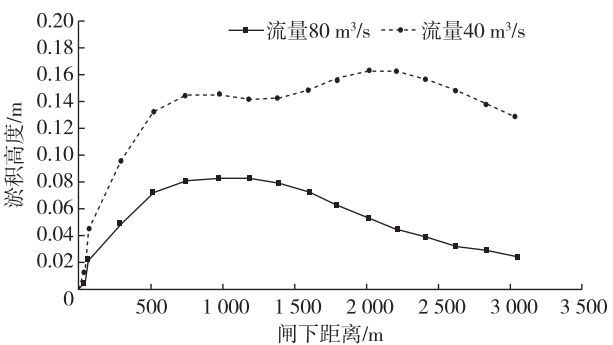


图 4 新洋港上边界流量分别取 $40\text{ m}^3/\text{s}$ 和 $80\text{ m}^3/\text{s}$ 时闸下河床淤积高度

Fig. 4 Siltation height on riverbed downstream of gate at Xinyang Port with upper boundary flow rates of $40\text{ m}^3/\text{s}$ and $80\text{ m}^3/\text{s}$