



# 运东船闸下游引航道通航条件改善措施

冯玉凯<sup>1</sup>, 申霞<sup>2</sup>

(1. 江苏省扬州市航道管理处, 江苏扬州 225003;

2. 南京水利科学研究院, 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏南京 210029)

**摘要:** 运东船闸位于江苏省干线航道网通扬线起点, 规划将老船闸拆除, 并在原址进行船闸扩容工程建设。通过1:40物理模型研究工程或非工程修复措施对改善通航水流条件的效果。结果显示: 延长泄水阀门开启时间可降低泄流过程中的流量峰值, 使得引航道内最大水面比降、最大流速、水面波动幅度有所减小; 植物护坡能够有效削减泄水波、船行波能量; 空箱结构护岸可以有效降低水流对岸壁的冲击力、削减水波动能, 保护航道护岸及人字门; 空箱护岸长度越长, 水流改善效果越明显。

**关键词:** 运东船闸; 物理模型; 护岸结构; 消波

中图分类号: U 641.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)02-0121-06

## Improvement measures of navigation flow in Yundong ship lock's lower approach channel

FENG Yu-kai<sup>1</sup>, SHEN Xia<sup>2</sup>

(1. Waterway Management Department of Yangzhou City, Yangzhou 225003, China;

2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

**Abstract:** Yundong ship lock is located at the beginning point of Tongyang navigation channel which is one of main channels in Jiangsu province. The old lock is planned to be replaced by a greater new one. A physical model of 1:40 scale ratio is applied to study the effects of some management measures and engineering ones on water wave and flow. The results show that long valve opening time could lower the peak value of flow rate, therefore the water surface slope, water wave and water flow could be reduced. Plants revetment could cut down long wave energy effectively. Hollow caisson structure has positive effect on reducing impact force against the channel walls and the miter gate, and the longer of hollow caisson structure revetment is, the better effects it produces.

**Keywords:** Yundong ship lock; physical model investigation; bank revetment structure; wave absorption

改善引航道通航水流条件的措施通常有: 延长输水时间、加大引航道过水断面; 改进引航道中的输水系统布置; 利用波动传播过程中的变形、反射等特点, 不使其相叠加并抵消波动。根据具体工程的要求, 可采取以上单项改善措施或组合措施。郑宝友<sup>[1]</sup>讨论了惯性超高(降)改善措施、引航道水面波动的利弊及对集中输水系统船闸人字闸门的影响。戈龙仔<sup>[2]</sup>进行了调节池形

式及位置与波浪运动的关系研究, 提出了调节池与上、下船闸错开灌泄水相结合的综合措施。杨文俊<sup>[3]</sup>从调节池、错时充泄水、航道水深、启门历时、隔流堤、进出水口布置等多方面进行了改善措施研究。彭伟<sup>[4]</sup>依托株洲枢纽二线船闸扩建工程, 分析引航道内非恒定流对船舶航行及停泊条件的影响, 确定合理的引航道布置形式及船闸运行方式。李伟等<sup>[5]</sup>对不同引航道宽度、水流流

收稿日期: 2015-06-04

作者简介: 冯玉凯(1972—), 男, 高级工程师, 从事船闸水力学及工程运行管理研究。

速、水深等对引航道口门区回流长度的影响进行分析,研究透空隔流堤对船闸下引航道口门区水流条件影响,得出最佳的隔流堤透空范围和开孔形式以及隔流堤堤头的透空范围。研究结果<sup>[6]</sup>显示:运动船闸下游引航道设计方案、水头差 7.13 m、泄水阀开启时间为 5 min 的条件下,泄水波将影响人字门的安全,系船停泊区水流会对船舶停泊及航行造成隐患。鉴于此,本文从延长泄水时间、植物型护岸、优化护岸结构形式、拓宽引航道等角度研究改善引航道水流条件的工程和非工程措施,为船闸工程的设计施工以及运营管理提供技术支持。

## 1 阀门开启时间的水流效应

### 1.1 模拟工况

延长船闸泄水阀门开启时间,是改善下游引航道通航水流条件常用的运行管理措施。将泄水阀门开启时间从原先的 5 min,延长至 6 min 和 7 min,分析其对引航道内水位、流速、流态的影响。图 1 绘出了闸室与下游引航道水头差 7.13 m、泄水阀门开启时间分别为 5 min (工况 E1)、6 min (工况 E2)、7 min (工况 E3) 条件下下泄流量随时间的变化过程。由图 1 可见:随着泄水阀的开启,流量逐渐增大;随着水头差的逐渐降低,流量由峰值逐渐回落,当闸室内外无水头差时,流量

也归为零。E1、E2、E3 三种泄水过程的最大流量分别为 141.53、131.48、122.72 m<sup>3</sup>/s,泄水时间分别为 7.65、8.12、8.60 min,最大流量约出现在泄水过程的中间时刻。

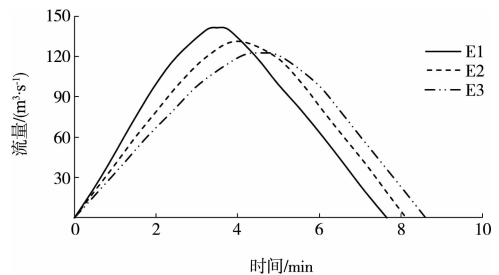


图 1 不同泄水阀门开启时间工况下的流量随时间变化过程

### 1.2 对水位、流速的影响

文献 [6] 分析了泄水阀门开启时间为 5 min 时,引航道内水位、流速特征。泄水阀门开启时间为 6 min (E2)、7 min (E3) 两种泄水工况下,航道内各点水位波动过程、流速变化过程以及流态与工况 E1 类似,但量值存在差异。表 1 统计了 3 种工况下航道内水位 (波动) 特征值,可见,随着泄水阀门开启时间增加,引航道内水面比降趋缓,水位变化速率降低,水面波幅也有所减小:人字门处水位超高从 0.39 m 降至 0.30 m,下游的远调码头和停泊锚地处波高没有随输水时间延长而出现明显变化,即引航道下游的波高与上游泄水流量的相关性不显著。

表 1 不同泄水阀门开启时间情况下引航道内水位特征值

工况	水面最大正比降/‰	水面最大负比降/‰	最大水位变率/(cm·min <sup>-1</sup> )	人字门处水位超高/m	系船墩处波高/m	远调码头处波高/m	停泊锚地处波高/m
E1	1.0	0.9	26.5	0.39	0.36	0.23	0.28
E2	0.8	0.7	24.4	0.35	0.35	0.25	0.30
E3	0.7	0.6	22.8	0.30	0.35	0.28	0.25

3 种泄水工况下,引航道内各特征点的最大流速统计于表 2,泄水时间的延长对于降低航道内的纵向流速和横向流速有益。总体上看,与工况 E1 相比,工况 E3 (阀门开启时间为 7 min) 能够改善船闸泄水时下游引航道内的水流条件,但该工况下的系船停泊区纵向流速和人字门处水位超高仍不能满足规范要求<sup>[7-8]</sup>。

引航道内水位、流速对泄水阀门开启时间的响应规律显示:延长泄水阀门开启时间可以有效改善通航水流条件,但是如果一味地延长泄水时间,势必导致船闸运行效率的大幅下降。因此必须在保证船舶过闸等候时间合理的前提下,寻求一些工程措施以确保工程的运行安全。以下探讨的改善工程措施均基于泄水工况 E3。

表2 不同工况下引航道内最大纵向流速和最大横向流速

m/s

工况	I-2(最大流速区)		III-4(系船停泊区)		VII-1(远调码头)		VIII-1(停泊锚地)	
	纵向	横向	纵向	横向	纵向	横向	纵向	横向
E1	1.73	0.11	0.62	0.17	0.41	0.07	0.43	
E2	1.61	0.09	0.58	0.14	0.40	0.06	0.33	
E3	1.52	0.07	0.56	0.11	0.36		0.35	

## 2 柔性植物护岸

### 2.1 植物布置方案

拟在运东船闸下游引航道弯段两岸进行植物护岸。模型试验中采用塑料草模拟天然植物, 塑料草高2 cm、间距8 cm, 每颗草6~8瓣叶片、每瓣叶片长约4 cm。植物护岸高程为-2.1~3.5 m。两岸植物护岸长度各350 m, 范围见图2。

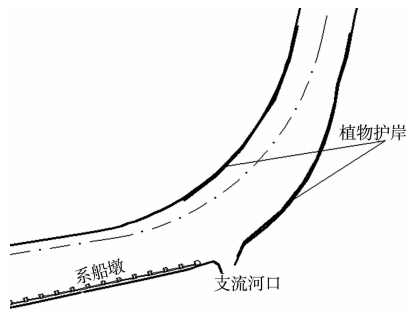


图2 植物护岸范围

### 2.2 消波效果

前人对植物护岸及其消波效果开展了一些研究, 如浙江海塘沿线生长的鸡干草、洞庭湖临湖堤前的垂柳和鸡婆柳、江苏洪泽湖大堤堤坡上的放浪林等, 都在当地起到了良好的消浪护堤作用, 但对消浪效果及消浪机理的研究不多<sup>[9-10]</sup>。傅宗甫<sup>[11]</sup>在实验室水槽中对堆石潜坝和互花米草的消浪效果进行对比模拟试验, 分析了不同堆石潜坝高度和种植不同宽度互花米草的消波效果。杨建明<sup>[12]</sup>建立波浪在斜坡上传播的控制方程及边界条件, 在控制方程中加入反映植物拖曳力作用的水流阻力系数, 模拟波浪经过植物区域, 并在水槽中开展物理模型实验。Mei C C<sup>[13]</sup>利用数值方法对长波作用下植被的消波效果进行了分析。冯卫兵等<sup>[14]</sup>根据室内波浪槽试验, 分析了柔性植物的消波特性, 认为柔性植物的种植密度、高度、宽度、以及波浪本身的要素, 对消浪效果的

影响显著。

本文采用物理模型试验对比研究了无植物护坡和有植物护坡两种情况下, 船闸人字门处的水位波动。运东船闸在E3泄水工况条件下, 有、无植物2个方案人字门处水位变化过程见图3。可知, 植物护坡对削减引航道内水面波动效果较好, 人字门处水位惯性超高由无植物护坡情况下的0.30 m降至0.25 m, 基本能够满足规范要求<sup>[7-8]</sup>。

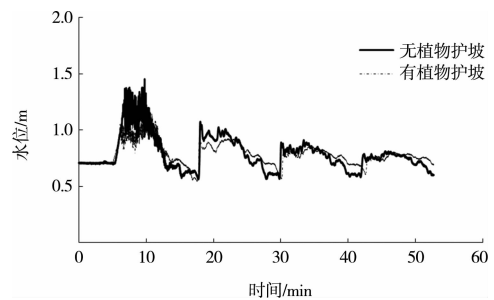


图3 工况E3有无植物护岸人字门处水位变化过程

## 3 引航道结构改善措施

### 3.1 改善方案

方案S1在原设计方案的基础上将左岸后退5 m, 拓宽段长度为1.1 km, 左岸新岸线见图4中的虚线, 该段岸线采用重力式护岸形式。右侧岸线位置及护坡形式保持不变。

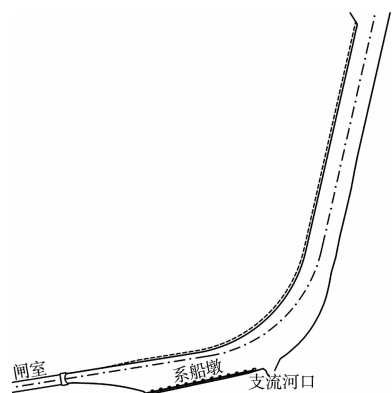


图4 下游引航道左岸拓宽

方案 S2 和 S3 与方案 S1 的不同之处在于，其在左岸后退岸线上采用钢护木结构护岸，方案 S2 钢护木护岸段长度为 0.59 km（以航道拓宽的上游起点算），方案 S3 钢护木护岸长度为 1.1 km，涵盖整个左岸后退岸线。左岸护坡除特别注明外，

其余航段均采用重力式护坡。钢护木护岸结构见图 5。由图 5 a) 可见，每 9.98 m 的岸线上布置 4 个钢护木，每个宽 0.39 m，形状为弧形凸出（图 5 b)），最大凸出尺寸为 0.1 m，钢护木所在高程为 0.4 ~ 3.4 m。

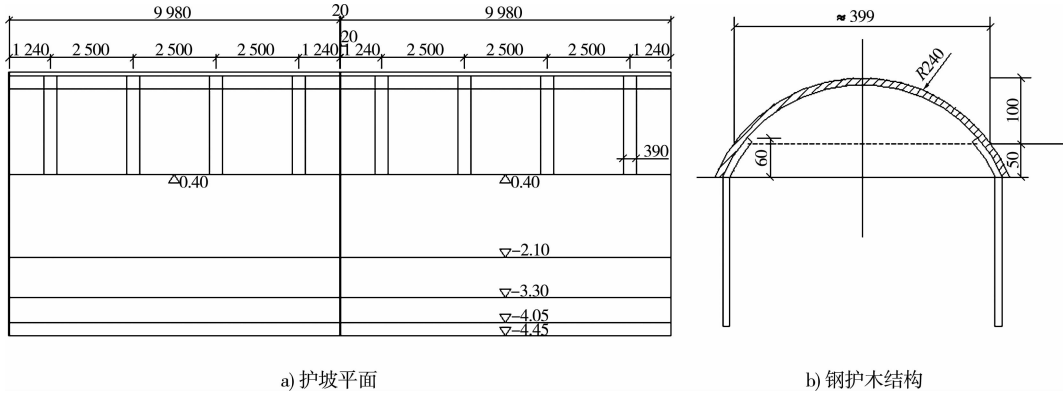


图 5 钢护木护岸结构（高程：m；尺寸：mm。下同）

方案 S4 和 S5 在左岸后退岸线上采用空箱结构护岸，长度分别为 0.59 km 和 1.1 km。左岸护坡除特别注明外，其余航段均采用重力式护坡。空箱护岸结构见图 6，每 9.98 m 岸线为一个结构

单元，每个单元有 6 个立柱，立柱宽 0.5 m，间隔 0.85 m。立柱后方水域连通，深度为 1.5 m，所在高程为 0.4 ~ 3.4 m。5 种方案下游引航道结构调整见表 3。

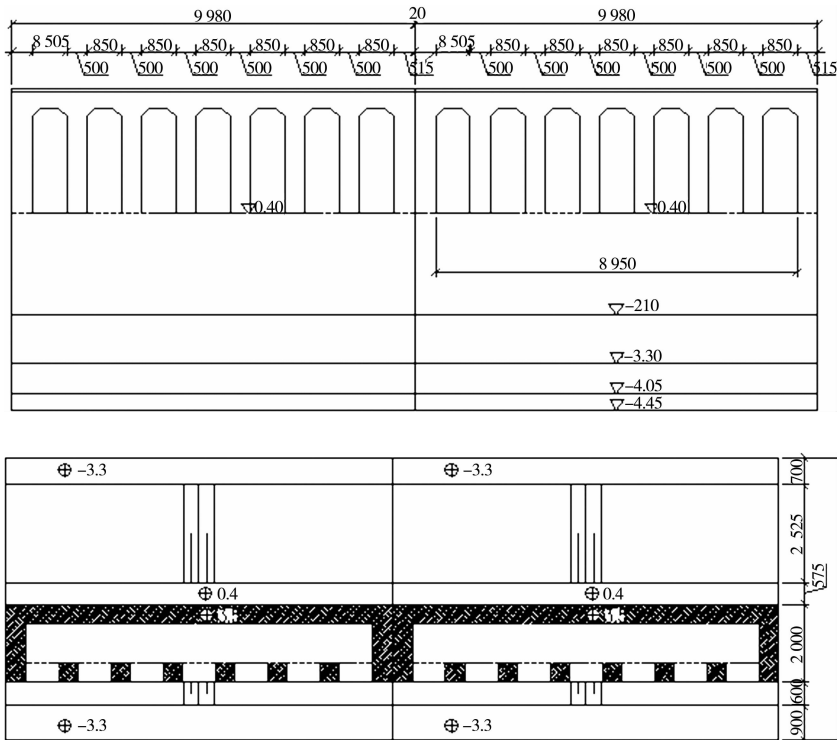


图 6 空箱护岸结构

表3 下游引航道结构调整方案

方案	航道断面		结构	护坡范围	备注
	尺寸	范围			
S1	拓宽5 m	左侧岸线1.1 km	重力式护坡结构	左岸全部岸线	
S2	拓宽5 m	左侧岸线1.1 km	钢护木结构	左岸后退岸线的弯段0.59 km	其余为重力式结构
S3	拓宽5 m	左侧岸线1.1 km	钢护木结构	左岸后退岸线1.1 km	其余为重力式结构
S4	拓宽5 m	左侧岸线1.1 km	空箱结构	左岸后退岸线的弯段0.59 km	其余为重力式结构
S5	拓宽5 m	左侧岸线1.1 km	空箱结构	左岸后退岸线1.1 km	其余为重力式结构

### 3.2 改善效果

#### 1) 方案 S1。

方案 S1 在原航道设计方案基础上, 将左岸后退 5 m, 增加航道过水断面。拓宽后, 左侧岸线仍采用重力式结构护坡, 岸坡表面平坦无凹凸。E3 泄水工况条件下, 即上下游水位落差 7.13 m, 阀门开启时间 7 min 时, 下闸首人字门处的水位超高为 29 cm, 不能满足规范要求的 25 cm。

#### 2) 方案 S2、S3。

方案 S2、S3 在左岸后退岸线上进行长度分别 0.59 km 和 1.1 km 的钢护木结构护岸, 其余岸段为重力式结构。E3 泄水工况下, 人字门处水位惯性超高为 29、28 cm, 不能满足规范要求。

#### 3) 方案 S4、S5。

方案 S4、S5 在左岸后退岸线上进行长度分别 0.59 km 和 1.1 km 的空箱结构护岸, 其余岸段为重力式结构。E3 泄水工况下, 改善方案 S4、S5 引航道内水位、流速特征值见表 4。可知, 方案 S4 人字门处水位惯性超高为 25 cm, 能够满足规范要求。空箱结构护岸长度由 0.59 km 增加至 1.1 km, 引航道内水流条件进一步改善, 方案 S5 人字门处水位惯性超高降至 22 cm。空箱结构护岸长度的增加对降低水面比降、减少流速均有一定效果。

对比空箱结构护岸和钢护木结构护岸试验结果可知, 空箱结构护岸能够更好地削减泄水波能量, 对航行条件更有利。

表4 改善方案 S4、S5 在 E3 泄水工况下引航道内水位、流速特征值

方案	水面最大 正比降/ ‰	水面最大 负比降/ ‰	人字门处 水位超高/ m	流速/(m·s <sup>-1</sup> )					
				III-4(系船停泊区)		VII-1(远调码头)		VIII-1(停泊锚地)	
				纵向	横向	纵向	纵向	横向	纵向
S4	0.8	0.6	0.25	0.48	0.11	0.34		0.31	
S5	0.7	0.4	0.22	0.43	0.09	0.29		0.28	

### 4 改善措施的可行性分析

延长泄水阀的开启时间, 对于降低人字门处的水位超高及航道内的流速具有明显效果。但是, 泄水阀门开启时间的延长势必导致船舶待闸时间增加, 降低船闸运行效率。根据运东船闸设计文件, 船闸泄水阀门开启时间最长为 7 min。如果在最长开启时间条件下, 航道内水流条件仍不能满足通航要求, 则需进行其它改善措施的研究。

采用植物护岸可以有效削减船闸泄水波的能量, 同时改善河道水质, 提升航道及周边区域的生态质量。但是, 引航道内的各种波浪传播、反射、叠加产生的影响将使得水生植物生存环境受

到破坏。另外, 引航道内船舶停靠及其产生的岸壁擦碰, 对护岸带植物的破坏不容忽视, 掉落的植物枝叶有可能缠绕船舶螺旋桨, 给航行安全带来隐患。运东船闸下游引航道两岸岸坡采用植物或其它柔性织物防护, 运行和维护成本极高, 可行性较小。

空箱结构是我国南方航道常用的护岸结构形式, 其表面凹式箱体具有显著的削减泄水波、船行波波动能的作用。空箱结构为钢筋混凝土材质, 能够满足航道护岸的抗冲刷性、稳定性等方面的要求。再者, 箱体的内部空间和水流特性使其成为水生动物优良的栖息地和避难所。但是, 相对

于重力式直立墙结构，空箱结构护岸施工较为复杂，导致工程成本增加。由于空箱的施工工艺非常成熟，其增加的成本在可控范围内。结合运东船闸的实际情况，空箱结构护岸具有较高的可行性。

### 5 结论

1) 在闸室上下游水位落差一定的条件下，延长泄水阀门开启时间可降低泄流过程中的流量峰值，从而使得引航道内最大水面比降、最大流速、水面波动幅度有所减小，改善通航水流条件。但是泄水时间的加长会导致船闸运行效率降低，船闸工程设计中应寻求两者间的平衡。

2) 在引航道两岸采用植物护坡，能够有效削减泄水波、船行波，而且还能起到改善水质、提高区域生态质量的效果。但是，布置于近闸航道两岸的植物，会受到船舶停靠擦碰的影响。鉴于此，在航道宽度条件允许的前提下，可在植物护岸前方布置竖桩，减轻船舶对植物的破坏。

3) 采用表面有凹凸感的护岸结构形式，是削减引航道内泄水波的有效途径。与钢护木结构相比，空箱结构的深度大，在立柱后方水域连通，能够更加有效地减少水流对岸壁的冲击力、削减水波能量，保护航道护岸及人字门。

### 参考文献:

[1] 郑宝友,周华兴,李炎. 船闸引航道长波波动对人字闸门的影响[J]. 水运工程, 2008 (2): 82-85.

[2] 戈龙仔,曹玉芬,孟祥玮,等. 船闸中间渠道非恒定流特性与调节池改善措施探讨[J]. 水道港口, 2006, 27(6): 378-383.

[3] 杨文俊,孙尔雨,杨伟,等. 三峡水利枢纽工程非恒定流通航影响研究 I: 上、下引航道[J]. 水力发电学报, 2006, 25(1): 45-49.

[4] 彭伟,李君涛. 株洲枢纽双线船闸灌泄水引航道非恒定流水力特性研究[J]. 水道港口, 2014, 35(3): 239-246.

[5] 李伟,张宝航. 船闸下引航道口门区回流特性及改善措施[J]. 水运工程, 2013 (8): 160-164.

[6] 步晓斌,王龙,申霞. 运东船闸下游引航道非恒定流模型试验[J]. 水运工程, 2015(12): 118-122.

[7] JTJ 306—2001 船闸输水系统设计规范[S].

[8] JTJ 305—2001 船闸总体设计规范[S].

[9] 吉红香,黄本胜,邱秀云. 植物消波消浪研究综述[J]. 水利水运工程学报, 2005(1): 75-78.

[10] 赵辉,蔡树伯,刘金来. 植物护岸工程技术应用研究[J]. 现代农业科技, 2010(17): 248-250.

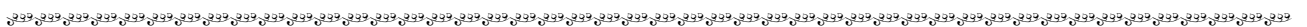
[11] 傅宗甫. 互花米草消浪效果试验研究[J]. 水利水电科技进展, 1997(5): 45-47.

[12] 杨建明. 植物消浪护岸动力机制理论分析与模型试验研究[D]. 天津: 天津大学, 2003.

[13] MeiChiang C, Chan I-Chi, Liu Philip L-F, et al. Long wave through emergent coastal vegetation [J]. J Fluid Mech, 2011, 687: 461-491.

[14] 冯卫兵,汪涛,邓伟. 柔性植物消波特性试验研究[J]. 科学技术与工程, 2012, 12(26): 6 687-6 690.

( 本文编辑 郭雪珍 )



( 上接第 120 页 )

### 参考文献:

[1] Zhang W, Xu Y, Hoitink A J F, et al. Morphological change in the Pearl River Delta, China [J]. Marine Geology, 2015, 363: 202-219.

[2] 潘玉敏,李静. 珠江三角洲近二十年来河床演变浅析[J]. 广东水利水电, 2006 (S1): 62-64.

[3] 唐造造,江涌,侯玉. 东江河床下切原因探讨[J]. 人民长江, 2007, 38(8): 136-138.

[4] 张明,冯小香,郝品正. 长洲枢纽坝下河段水沙变化及河床变形分析[J]. 水运工程, 2013 (4): 134-138.

[5] 张明,冯小香,郝品正. 多因素作用下的西江梧州河段枯水水位下落[J]. 泥沙研究, 2013 (5): 69-74.

[6] 欧诚,庾筱葭,舒丹,等. 长洲枢纽下游河床下切水位下降原因分析[J]. 水运工程, 2014(4): 138-142.

[7] 吴绪权,严桂强,李卓妮. 长洲水利枢纽坝下至界首河床下切现象分析[J]. 西部交通科技, 2008 (4): 77-80.

[8] 李俊娜. 水沙数学模型在西江航道整治中的应用研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2008.

[9] 李俊娜,邹炳生,林超明,等. 西江三滩河床演变分析[J]. 水道港口, 2008, 29(5): 338-344.

( 本文编辑 郭雪珍 )