

# 分汊河段河中布置船闸水沙碍航特性研究

普晓刚<sup>1</sup>, 宋辉<sup>2</sup>, 金辉<sup>1</sup>, 范婷<sup>2</sup>, 闫涛<sup>1</sup>

(1. 交通运输部天津水运工程科学研究所 工程泥沙交通行业重点实验室, 天津 300456;  
2. 湖南省水运建设投资集团有限公司, 湖南 长沙 410011)

**摘要:** 分汊河段的汇流口水沙条件复杂多变, 为保证航道稳定及船舶航行安全, 分汊河段水利枢纽平面布置时一般将通航建筑物布置于其中一个汉道的靠岸侧。受工程建设条件限制需将通航建筑物布置于分汊河段河中时, 既存在流态碍航问题又存在泥沙淤积碍航问题。针对布置于分汊河段洲尾汇流段的已建桃源枢纽船闸存在的通航条件较差的问题, 采用整体定床水流、定床输沙与遥控自航船模试验相结合的研究手段, 开展了船闸下游口门区水沙碍航特性试验研究。结果表明: 水流条件是导致流态碍航与泥沙淤积碍航的根本因素, 左、右汊不同下泄水流在汇流段形成单边突扩或水流掺混交汇, 致使下游口门区所处的汇流段水流流态差且推移质泥沙淤积碍航, 分汊河段船闸河中布置应慎重考虑。

**关键词:** 分汊河段; 船闸; 河中布置船闸; 水沙碍航特性

中图分类号: TV135.4; U641.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2020)02-0142-05

## Study on the navigation-obstructing characteristics of water and sediment by the ship lock arranged in the middle of the river in a branching river

PU Xiaogang<sup>1</sup>, SONG Hui<sup>2</sup>, JIN Hui<sup>1</sup>, FAN Ting<sup>2</sup>, YAN Tao<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Engineering Sediment, Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, Ministry of Transport, Tianjin 300456, China; 2. Hunan Provincial Water Transportation Construction & Investment Group Co., Ltd., Changsha 410011, China)

**Abstract:** The water and sediment conditions of branching rivers are complex and changeable. In order to ensure the stability of the channel and the navigation safety of ships, navigation structures are usually arranged at the shore side of one of the branches when designing the layout of the water conservancy project of a branching river. Due to the limitation of engineering constructions, it is necessary to arrange the navigation structures in the middle of the branching river, which disturbs the flow patterns and obstruct the navigation from sediment deposition. Based on the poor navigation conditions of the existing locks of Taoyuan Junction, which are arranged in the confluence section of the island end of the branching river section, the experimental study on the characteristics of water and sediment obstruction in the downstream gate area of the lock was carried out by combining the integrated fixed-bed flow, fixed-bed sediment transport and remote control self-propelled ship model tests. The results showed that the flow condition was the underlying cause of flow obstruction and sedimentation obstruction. The left and right branch drainages of water flow in the confluence formed a sudden unilateral enlargement or mixed flows, causing a bad flow regime and bedload sediment silting obstruction at the entrance area of the downstream section. Therefore, branching river lock arrangement should be carefully considered in the river.

**Key words:** branching river; ship lock; ship lock arrangement in the middle of the river; navigation-obstructing characteristics of water and sediment

收稿日期: 2019-07-18; 修回日期: 2019-09-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(51809130); 湖南省交通运输厅科技进步与创新计划项目(201717); 中央公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(TKS190406)

作者简介: 普晓刚(1979-), 男, 河南沈丘人, 本科, 副研究员, 主要从事水利工程及航道工程研究。

通讯作者: 金辉(1983-), 男, 河南开封人, 硕士, 助理研究员, 从事水力学及河流动力学问题研究。

## 1 研究背景

分汉型河道是我国冲积平原河道中的常见河型,分汉河道的水沙特性极为复杂,通常通过分流比、分沙比及分流角来描述<sup>[1]</sup>。分汉河段由洲头分流段、汉道段和洲尾汇流段组成;一般洲头分流段的河床演变对河势控制与稳定作用较强,许多研究者开展了大量的汉道治理及航道整治方案研究<sup>[2-5]</sup>;而洲尾因受到洲体掩护和植被覆盖,其冲淤强度一般小于洲头段<sup>[6]</sup>,针对分汉河段洲尾汇流段水沙特性开展的研究相对较少。

分汉河道洲尾汇流段水沙特性与汇流角较小的对称型干支交汇河道的汇流河段相似,许多学者针对交汇口流场分区、水流结构、水面形态、螺旋流、能量损失及泥沙特性等方面开展了研究<sup>[7-8]</sup>。考虑到分汉河段的汇流口水沙条件复杂多变,受两股水流的剪切运动形成掺混区,发生紊动掺混,流速减小而致使泥沙在汇口处淤积,且随着各汉道的水动力变化,掺混区随之变化<sup>[9-12]</sup>,为保证船舶航行安全及航道稳定,依据《渠化工程枢纽总体布置设计规范》相关规定,水利枢纽平面布置时一般将通航建筑物靠河岸布置,如湘江长沙综合枢纽、株洲航电枢纽等,船闸均在其中一个汉道靠岸侧<sup>[13]</sup>。

然而受工程建设条件限制(如环境保护、文物保护)等原因不得不考虑将船闸布置于河中的可行性,如沅水桃源枢纽即为工程实例,船闸布置于河中,船闸下引航道口门区位于双洲洲尾的河道中间,分汉河段河段的来水、来沙情况极为复杂,既存在流态碍航问题又存在泥沙淤积碍航问题,且两方面相互矛盾又相互关联<sup>[14-15]</sup>。针对分汉河段船闸河中布置时,船闸下游口门区处于分汉河段的洲尾汇流段的水沙碍航特性开展研究具有重要意义。依托沅水桃源枢纽工程,采用1:100正态整体定床水流、定床输沙与遥控自航船模试验相结合的手段开展了试验研究,结果表明水流条件是导致流态碍航与泥沙淤积碍航的根本因素,不同水期左、右汉不同下泄水流在汇流段形成单边突扩或水流掺混交汇,致使下游口门区所处的汇流段水流流态差和推移质泥沙落淤碍航,分汉河段船闸河中布置应慎重考虑。

## 2 枢纽概况

桃源枢纽是沅水干流最下游一个梯级,坝址位于桃源县城,上游梯级为凌津滩枢纽<sup>[16]</sup>。桃源枢纽于2010年11月动工兴建,电站于2013年9月首台

机组并网发电,2014年底9台机组全部投产。桃源枢纽开发任务以发电为主,兼顾航运等综合利用。枢纽主要建筑物从左至右依次为左汉14孔泄水闸、船闸、右汉电站、右汉11孔泄水闸<sup>[17-18]</sup>。

泄水闸坝段布置于河道两侧主槽,左槽布置14孔,右槽布置11孔,孔口净宽20m。电站厂房布置于双洲中的陈家洲,电站厂房装机9台,单机容量22MW。

船闸为500t级,在双洲左侧的小洲中部开挖而成<sup>[16]</sup>,闸室有效尺寸为200.0m×12.0m×2.5m(长×宽×门槛水深)。下游引航道采用直进曲出的方式布置,引航道宽40m,长390m。引航道导航墙为重力式结构,左、右侧分别长557、471m。

桃源枢纽运行调度方式如下:(1)当 $Q \leq 3\ 600\ \text{m}^3/\text{s}$ 时,泄水闸关闭,位于右汉的电站发电。(2) $3\ 600\ \text{m}^3/\text{s} < Q < 8\ 800\ \text{m}^3/\text{s}$ ,为控泄期,右汉电站满发下泄 $3\ 600\ \text{m}^3/\text{s}$ ,其余由左汉泄水闸下泄,两汉总流量达 $8\ 800\ \text{m}^3/\text{s}$ 时敞泄<sup>[19]</sup>。(3) $Q \geq 8\ 800\ \text{m}^3/\text{s}$ ,为敞泄期,电站停机,泄水闸敞泄。

## 3 模型简介

### 3.1 模型设计与验证

图1为桃源枢纽物理模型范围,模拟原型河道长度约为8km,采用1:100正态定床,模拟坝上河段长3.2km、坝址河段长4.8km,宽700~1600m不等。模型对枯水( $300\ \text{m}^3/\text{s}$ )、平水( $2\ 100\ \text{m}^3/\text{s}$ )、丰水( $6\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ )共3级典型流量的水位和流速进行了验证,结果表明各沿程水位和断面流速的误差均在允许范围内,满足规程要求,模型达到了阻力相似与水流运动相似的要求<sup>[20]</sup>。

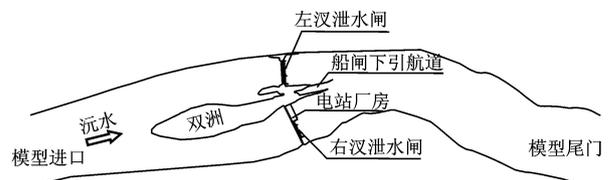


图1 桃源枢纽物理模型范围

定床输沙试验除满足水流运动相似外,还必须满足泥沙起动相似,采用重力相似准则。实测原型沙中值粒径为30mm,模型沙选用无烟煤加工制作,选用长江实测起动流速经验公式和天津水运工程科学研究所水槽试验起动流速公式分别计算原型沙和模型沙的起动流速,结果表明,当粒径比尺为20时满足泥沙起动相似,故模型沙中值粒径为1.5

mm<sup>[20]</sup>。船模比尺亦为 1: 100, 试验船型为 1 000 t 级船舶。在进行船模航行试验前, 对船模的静水性能和运动性能进行了校准。

### 3.2 通航标准

按照《内河通航标准》要求, IV 级船闸的引航道口门区水流表面最大流速限值为: 平行于航线的纵向流速不大于 2.0 m/s, 垂直于航线的横向流速不大于 0.3 m/s, 回流流速不大于 0.4 m/s, 另外在引航道口门区应避免出现影响船舶、船队航行和停泊的泄水波、泡漩和乱流等不良水流。

### 3.3 试验典型流量及口门区范围

根据研究河段特点, 结合枢纽运行调度方式, 选取表 1 中 6 级代表流量开展分汊河段船闸河中布置水沙碍航特性试验研究。依据《船闸总体设计规范》, 取距左侧导堤末端 0 ~ 400 m 范围为现状条件下桃源船闸下引航道口门区。

## 4 河中布置船闸下游水流碍航特性

分汊河段河中布置船闸时, 受枢纽左、右两汉泄水建筑物不同调度运行方式的影响, 边界条件复杂, 造成各时期下游口门区碍航特性有所不同。表 2 为各级典型流量下船闸下游口门区水流特性参数。

表 1 试验典型流量级  $m^3/s$

流量	左汊泄水 水闸过 流流量	右汊泄水 水闸过 流流量	电站 引流量	电站运 行机组 台数	备注
400			400	1	
1200			1200	3	
3600			3600	9	电站满发
5000	1400		3600	9	左汊泄水 + 电站满发
7000	3400		3600	9	左汊泄水 + 电站满发
10000	5000	5000		0	设计最大通航流量

表 2 典型流量下船闸下游口门区水流特性参数

流量/ ( $m^3 \cdot s^{-1}$ )	横流超标范围/m	最大横向流速/ ( $m \cdot s^{-1}$ )	出现位置/ m	回流范围/ m	最大回流流速/ ( $m \cdot s^{-1}$ )
400	0 ~ 200	0.52	100	-30 ~ 70	0.43
1200	50 ~ 300	0.69	210	-50 ~ 100	0.38
3600	100 ~ 200 航左, 200 ~ 530 航右	0.92	250	0 ~ 200	0.42
5000	180 ~ 250 航左, 70 ~ 210 航右	0.61	200	0 ~ 200	0.20
7000	160 ~ 600 航左	0.53	400	0 ~ 150	0.23
10000	160 ~ 400 航左	0.52	350	0 ~ 150	0.33

(1) 仅电站泄流期 ( $Q \leq 3\ 600\ m^3/s$ )。图 2 为最小通航流量  $Q = 400\ m^3/s$  时船闸下游航道附近模型流态与原型流态。电站下泄水流归槽, 坝下左汊河道及右汊河中心滩均不过流, 电站尾水出尾水渠后, 一股水流沿船闸右导堤外侧与心滩之间深槽进入船闸下游口门区, 另一股水流出尾水渠后向右岸偏转, 沿心滩右侧深槽下泄。进入口门区的水流较为集中, 流速较大, 在口门区形成自右向左的斜流。距左导墙堤头 0 ~ 200 m 范围内横向流速超出规范要求, 最大横向流速达 0.52 m/s, 发生在 0 + 100 m 处。距左侧导墙末端 -30 ~ 70 m 范围内为回流区, 回流流速 0.43 m/s。

随电站下泄流量增加, 坝下左汊河床滩地逐渐淹没, 右汊心滩逐渐漫水过流。船闸下游口门区形成自右向左的单边扩散水流, 水流斜穿口门区向左汊及下游河道扩散, 且随右汊电站出流的增加, 口门区斜流范围及流速逐渐增加, 最大横流位置亦相应

下移。仅电站发电期 ( $Q = 3\ 600\ m^3/s$ ) 汇流段流场见图 3。

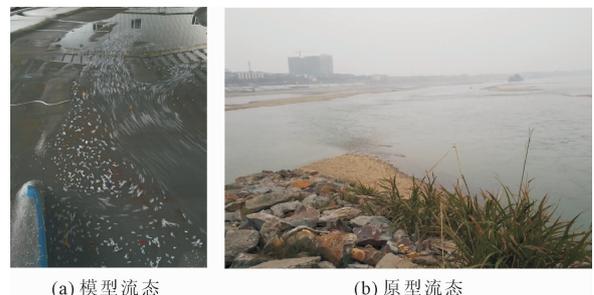


图 2  $Q = 400\ m^3/s$  时船闸下游航道附近模型流态与原型流态

由图 3 可以看出, 电站满发流量  $Q = 3\ 600\ m^3/s$  时, 电站尾水在 100 ~ 470 m 范围内从右侧进入航道, 并在 250 ~ 500 m 范围内左侧冲出航道, 并在左侧滩地形成大尺度回流, 回流一部分侵占 0 ~ 200 m 范围航道中心线左侧区域。距左导墙末端 100 ~

200 m 范围中心线右侧航道横向流速大于 0.3 m/s, 200 ~ 530 m 范围内航道横向流速均大于 0.3 m/s。口门区最大横向流速为 0.92 m/s, 发生在 250 m 处。口门区 0 ~ 200 m 范围内存在 3 个回流区, 流态较乱, 回流流速 0.42 m/s。

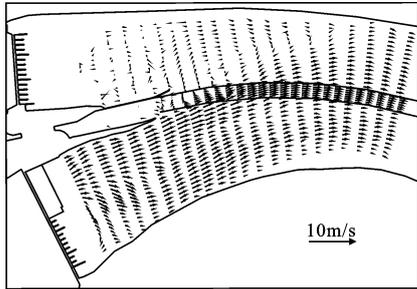


图3 仅电站发电期( $Q = 3\ 600\ \text{m}^3/\text{s}$ )汇流段流场

(2)控泄期( $3\ 600\ \text{m}^3/\text{s} < Q < 8\ 800\ \text{m}^3/\text{s}$ )。控泄期电站满发、左汉泄水闸部分开启后,由于左汉和右汉同时泄水,口门区左向斜流与右向斜流交叉分布,主要为斜流碍航,影响船舶安全进出引航道。

$Q = 5\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$  时,左汉泄流对右侧电站尾水形成一定的对冲,口门区横向流速较小,但流态较乱。右侧航道 70 ~ 210 m 范围内横向流速大于 0.3 m/s,最大横流流速为 0.53 m/s。左侧航道 180 ~ 250 m 范围内横向流速大于 0.3 m/s,最大横流流速为 0.61 m/s。口门区存在多个回流,回流流速均小于 0.2 m/s。控泄期( $Q = 7\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ )汇流段流场见图4,由图4可以看出, $Q = 7\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$  时,左汉水流强于右汉水流。口门区中心线左侧航道范围内横向流速大于 0.3 m/s,最大横向流速 0.53 m/s,发生在 400 m 处。口门区内 0 ~ 150 m 范围内为回流区,回流流速 0.23 m/s。

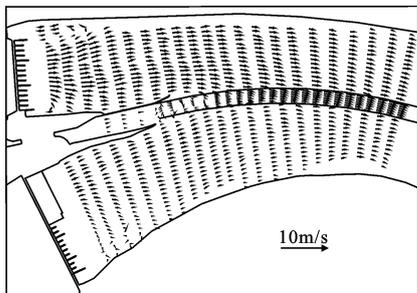


图4 控泄期( $Q = 7\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ )汇流段流场

(3)敞泄期( $Q \geq 8\ 800\ \text{m}^3/\text{s}$ )。敞泄期电站停机、左右两汉泄水闸全部开启,左导墙挑流作用导致口门区中心线左侧航道横流稍大; $Q = 10\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$  时,口门区中心线左侧航道内横向流速大于 0.3

m/s,最大横向流速为 0.52 m/s,发生在 350 m 处。

由上可见,①仅电站泄流期,河中布置船闸枯水期扩展比大,与一般靠岸布置的船闸相差较大。主流斜穿下游口门区航道,左向斜流较大的区域可覆盖整个航宽,且横向流速大,这种大范围的斜流水域非常不利于船舶的航行安全。②控泄期斜流碍航成因较为复杂,左汉河床高于右汉 0.8 ~ 1.5 m、航道深槽低于两侧河床,随左汉过流增加并逐渐大于右汉,左汉主流横穿航道形成右斜流碍航。此外,两侧导墙左长右短的布局,以及右岸采砂坑对流场的影响也是导致口门区流态碍航的成因之一。③敞泄期碍航流态主要是因为左导墙外挑导致,与控泄期相比流速虽有所增加,但横流流速超标范围有所减小。

## 5 河中布置船闸下游泥沙淤积碍航特性

桃源枢纽为已建枢纽,受清水下泄影响,坝下河床剧烈调整。同时,桃源枢纽坝下河段河床质在施工期即开始迅速粗化,以推移质运动为主,整体呈“冲滩淤槽”的单向演变趋势,同时坝下河段冲刷在时间和空间上具有不断减弱的变形特征。图5为各级典型流量下定床输沙试验结果,可以看出河中布置船闸下游泥沙淤积碍航特性如下:

(1)仅电站泄流的枯水期,水流归槽,电站尾水流速较大,水流挟沙能力沿程衰减,各级流量输沙带前坡止动于距口门下约 760 ~ 980 m 范围内,随流量增加止动位置略有下移。口门区泥沙淤积主要来自电站尾水渠下游深槽河床冲刷。坝下右汉滩槽格局形成于施工期,在运行期受电站尾水冲刷固化,形成 V 型深槽。电站尾水被深槽束缚,出尾水渠后不能有效扩散,导致水流强度过大,进而促使右汉河床质持续补充推移质沙源,推移质泥沙进入船闸口门区形成持续淤积。电站尾水水流强度较大是导致航槽回淤的主要成因。

(2)控泄期两汉同时泄流,右汉为电站泄流,左汉为泄水闸泄流。 $Q = 5\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$  时左汉输沙带前坡止动于支汉内,未进入航道。右汉输沙带前坡止动于口门下游 430 m 处;航道泥沙淤积碍航成因与枯水期一致(电站尾水水流强度较大)。 $Q = 7\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$  时,左汉动力条件较强,输沙带可一直延伸至下游主航槽,主流带内泥沙呈跃移模式。坝下河床以短期推移质泥沙运动为主,推移质泥沙具有沿主流运动,并在掺混区与主流交界处形成泥沙堆积带的特征。因此,输沙带前坡下移后,因掺混区与主流带交界面斜穿航道,导致大量泥沙淤积在航道内。

(3) 敞泄期水流横向流速梯度较小, 河床推移质泥沙普遍进入滚动输移状态, 此时航槽内水深大于航槽外水深, 同时掺混区与主流交界面水流紊乱, 造成局部挟沙力下降, 形成泥沙淤积。

综上泥沙淤积碍航特性可以看出, 坝下河床输沙带呈右汊电站尾水强度大以及掺混区与主流带斜穿航道是导致泥沙淤积碍航的主要原因。

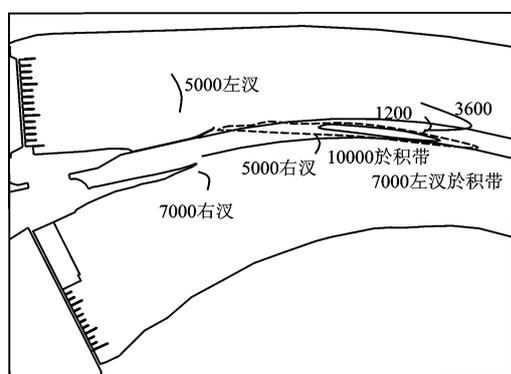


图5 各级典型流量下淤积体前坡止动位置(单位:  $\text{m}^3/\text{s}$ )

## 6 结论

(1) 建于分汊河段河中的枢纽船闸工程, 受枢纽左、右两汊泄水建筑物不同调度运行方式的影响, 船闸下游口门区位于汇流区, 水流运动流态复杂, 可分为单边突扩水流、交汇水流两种典型流态。

(2) 仅电站泄流的枯水期, 船闸下游口门区为单边突扩水流流态, 电站尾水从右导墙外侧进入口门区, 水流集中, 流速较大, 在口门区形成从右至左的斜流, 并伴有回流; 水流归槽, 电站尾水流速较大, 泥沙大量起动, 将电站下游河床的推移质输送至航道内, 造成下游口门区大范围淤积。

(3) 控泄期及敞泄期, 左、右两汊均下泄水流, 船闸下游口门区为分汊河段水流交汇区, 左向斜流与右向斜流交叉分布, 回流丛生, 通航水流条件较差。航道内淤积物主要来源于左、右汊坝下河床的推移质泥沙, 由于推移质泥沙具有沿主流运动, 并在掺混区与主流交界处形成泥沙堆积带的特征, 而掺混区与主流带斜穿船闸下游航道, 导致大量泥沙淤积在航道内。

(4) 分汊河段船闸布置于河中时应慎重考虑, 当船闸位置受限必须布置于河中时, 应充分考虑过水建筑物泄流、坝下冲刷等对船闸通航的影响, 船闸下游口门区应远离掺混区, 在工程河段水沙特性的基础上, 通过模型试验研究选取较优的布置方案。

## 参考文献:

- [1] 徐启航. 宽浅分汊河道航电枢纽布置及水力学研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2017.
- [2] 洪思远, 王建中, 范红霞, 等. 长江下游新生洲洲头分流段演变特征及洲头守护措施[J]. 水利水运工程学报, 2017(2): 91-99.
- [3] 陈立, 黄杰, 徐敏, 等. 影响界牌河段江心洲洲头低滩演变的因素分析[J]. 中国农村水利水电, 2015(6): 25-28.
- [4] 付中敏, 郑惊涛, 王平义, 等. 弯曲分汊河段江心洲稳定性试验研究[J]. 水运工程, 2010(12): 109-114.
- [5] 韩剑桥, 孙昭华, 冯秋芬. 江心洲头部冲淤动力临界特性[J]. 水科学进展, 2013, 24(6): 842-848.
- [6] 李志威, 李艳富, 王兆印, 等. 分汊河流江心洲洲头冲淤概化模型[J]. 水科学进展, 2016, 27(1): 1-10.
- [7] 周翠英, 邓金运. 干支流交汇河段水流泥沙特性研究综述[J]. 水利科技与经济, 2012, 18(8): 42-45.
- [8] 刘同宦, 郭炜, 詹磊. 主支流汇流比对交汇区域水流脉动特性影响试验[J]. 水科学进展, 2009, 29(3): 6-8+40.
- [9] 喻涛. 心滩守护前后水力特性研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2009.
- [10] 邬志红. 长江嘉陵江交汇口水力特性数值模拟研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2012.
- [11] 李福建, 黄胜, 谢玉妹, 等. 顺直型展宽航槽沿程水沙运动规律试验研究[J]. 工程科学与技术, 2018, 50(4): 96-103.
- [12] 顾莉, 华祖林, 褚克坚, 等. 分汊型河道水流运动特性和污染物输移规律研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2011, 31(5): 89-94.
- [13] 胡旭跃, 许晓琳, 沈小雄, 等. 江心洲型船闸通航安全问题及改善措施研究[J]. 安全与环境学报, 2015, 15(1): 94-97.
- [14] 普晓刚, 王能, 彭伟. 新型桩基导流屏改善船闸下游口门区通航条件效果分析[J]. 水运工程, 2018(1): 147-151+170.
- [15] 路莅枫, 乾东岳, 宋辉. 顺直分汊河段枢纽施工及运行初期河床变形规律分析[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(6): 151-156.
- [16] 刘会遵. 桃源水电站施工期船闸运行管理[J]. 水力发电, 2014, 40(6): 22-24.
- [17] 虞东亮. 桃源水电站施工导流及临时通航方案研究[J]. 水利水电工程设计, 2011, 30(1): 4-8+56.
- [18] 虞东亮, 陈钰, 周洁, 等. 桃源水电站施工导流设计与实践[J]. 水力发电, 2014, 40(6): 30-34.
- [19] 乾东岳, 普晓刚, 王能, 等. 桃源枢纽坝下汇流区推移质运动特性试验研究[J]. 水运工程, 2019(5): 118-124.
- [20] 彭伟, 冯小香, 普晓刚. 船闸下游引航道口门区急流碍航改善措施比选[J]. 中国港湾建设, 2017, 37(10): 47-52.