



# 山区大型河流弯曲分汊河段航道 整治思路与措施

何传金<sup>1</sup>, 杨祥飞<sup>2</sup>, 陈庆<sup>2</sup>

(1. 长江航道局, 湖北武汉 430010; 2. 长江重庆航运工程勘察设计院, 重庆 401147)

**摘要:** 铜鼓滩为弯曲分汊浅险滩, 弯槽为枯水航槽, 上口水浅, 不满足尺度要求, 中段航槽落湾, 弯曲半径小, 下口流速大, 流态乱, 上下水船舶航行危险。通过叙泸段工程整治, 该滩碍航问题得到解决。基于模型试验成果和工程实际效果, 通过研究该滩水沙特点和碍航特性, 对治理思路与整治措施进行剖析。该类滩险主流洪水趋直, 枯水落湾, 洪水面流与底流分离, 面流趋直, 底流携带泥沙落湾; 可开辟窄深型直汊通航, 辅以江中整治建筑物束水维持航槽稳定; 考虑到水沙分离的规律, 应合理确定分流点, 使水流归直槽, 泥沙仍走弯槽。

**关键词:** 航道整治; 长江; 铜鼓滩; 措施

中图分类号: U 617

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2012)07-0140-06

## Channel regulation idea and measures of curved branch of mountainous river

HE Chuan-jin<sup>1</sup>, YANG Xiang-fei<sup>2</sup>, CHEN Qing<sup>2</sup>

(1. Changjiang River Waterway Bureau, Wuhan 430010, China;

2. Survey & Design Institute of Yangtze River Harbor & Waterway Engineering, Chongqing 401147, China)

**Abstract:** Tonggu rapids is a curved branch shoal-rapids which is characterized by dangerous navigation. The regulation of Xu-Lu section has solved the problem of navigation obstruction of Tonggu rapids. Based on the model test result and according to the engineering effect, we research the water-sediment characteristics of navigation-obstruction features, and probe into the regulation idea and measures for the rapids. The main flow of the rapids tends straight at the flood and falls in the bay in the dry season. In the flood season the upper flow and lower flow are separated and the upper flow tends straight, the lower flow brings mud and turns to the bending area. We can dig narrow deep straight channel assisted with regulation buildings in river to guarantee the channel stability; Considering the separation law of water and sand, we should determine proper diversion point to make water run through the straight channel while sand goes through the bending channel.

**Key words:** channel regulation; the Yangtze River; Tonggu rapids; measure

近年来, 随着西部地区经济的快速发展, 对外贸易量迅猛增加, 对水路交通运输的需求十分强烈。长江、西江、澜沧江等水系的航道畅通, 对完善西部交通运输体系、促进区域经济发展至关重要。这些水系的上游主要为山区河流, 属卵石河床, 多急滩、浅滩、险滩等碍航滩险。

自20世纪50年代开始, 长江上游航道200多个滩险得到整治<sup>[1]</sup>, 不仅改善了“川江”的通航条件, 而且获得了许多山区航道治理的成功经验和有重要参考价值的科技文献。一般说来, 对于边界固定(河床边界为基岩或礁石)的滩险, 已有较为成熟的整治技术, 如: 流速分布的简化计算、丁

收稿日期: 2012-03-21

作者简介: 何传金(1969—), 男, 教授级高级工程师, 从事航道整治工程建设管理与技术研究工作。

坝和顺坝的水力计算、水面线的计算、锁坝的水力计算、急滩整治的水力计算等<sup>[2]</sup>。这些整治技术为保证滩险的整治成功提供了关键技术支持。但是,对于边界可动的卵石浅滩来说,目前的整治技术仍不够成熟,在很大程度上仍要结合专家的实践经验。由于前期研究对水沙运动规律认识不足,对滩性认识不够,因此常常影响工程实施效果,大多卵石浅滩常常要经过多次整治才能成功。山区河流不同河段的岩性差异或局部构造不同,在水流的长期作用下,河道时常形成宽窄相间、顺直与弯曲汊道并存的形态。一般直槽顺直水浅,弯槽通航,但流急水乱,同时在上下深槽之间还常常形成过渡段卵石浅滩,碍航问题突出。

本文以典型滩险——著名的“川江滩王”铜鼓滩为例,结合前期模型试验成果和工程实际效果,通过剖析该滩水沙特点、碍航特性、治理思路、整治措施等,对山区河流弯曲分汊类卵石浅滩的水沙运动规律及碍航特性、疏浚开槽要点、整治建筑物布置和结构型式等整治技术进行归纳,为今后同类滩险的治理提供借鉴。

## 1 河道特征及水沙运动规律

### 1.1 河道特点

位处长江上游的铜鼓滩,紧邻四川省宜宾市南溪县城,为枯水期“弯、浅、险”特征并存的川江著名碍航滩险<sup>[3]</sup>。

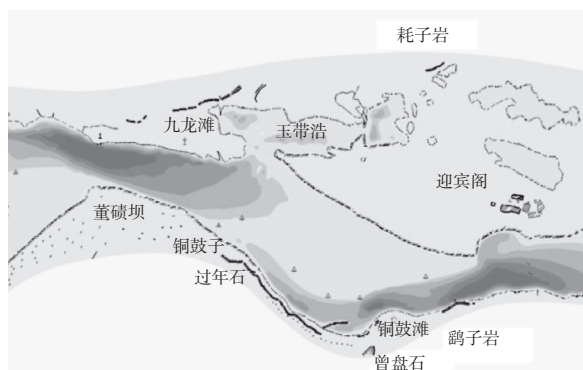


图1 铜鼓滩河势

该滩河势上位于两反向河湾之间的过渡段。上游河道顺直,河宽近700 m,航道条件较好。滩段上口为右转弯道,有董坝与九龙滩对峙,河

宽缩窄至350 m。中段放宽,江中卵石碛坝—迎宾阁挤压河道。迎宾阁左侧有玉带浩在航行基面3.0 m以上水位开始过流。右侧河床宽阔,但江中迎宾阁碛翘潜伸江中,形成暗碛挤压河床,造成右槽水深但狭窄弯曲。右槽入口铜鼓子一带水深时有不足,一般在1.8~2.4 m;中段水流经迎宾阁碛翘向右深槽落湾;过曾盘石后,主流受上游左岸九龙滩石梁和下游右岸曾盘石石梁的挑流影响,形成强烈的回流和泡漩,流速大、流态坏。

### 1.2 水沙运动规律

分析实测资料和模型成果,铜鼓滩的水沙运动规律主要有3点:1)水流动力轴线枯水弯曲、洪水趋直,弯道环流强烈。枯水期水流动力轴线在进口经铜鼓子浅区,向右深槽而下;随着水位抬升,水流动力轴线逐渐趋直,靠向河心;中水期,水流动力轴线位于河心潜碛附近,高水期,位于潜碛左侧顺直的左槽,并进一步左偏。观测中高水期,表流流向线和底流流向线,上段的面流和底流分离明显,具体表现在:面流靠左取直,底流靠右落湾进入右槽。右槽中下段的面流和底流走向逐渐相同。说明滩段有很强弯道环流,对水流结构和泥沙输移有很大影响<sup>[4]</sup>。2)枯水期,左槽的流量沿程递减,流速变小;右槽的入口有横流漫滩,水流分散;中水期,铜鼓子浅区横向流速分布逐渐均匀;洪水期,水流取直,右弯槽沿岸成为缓流区。3)枯水期铜鼓滩上下游深槽水流平缓,铜鼓子浅滩处水深不足,因下段铜鼓滩深槽吸流和迎宾阁潜碛阻水的共同作用,铜鼓子一带有强烈横流,过年石以下有强烈扫弯水,流速高达4 m/s,比降2‰,到下段受曾盘石阻流影响,流态非常紊乱,航行条件很差<sup>[5]</sup>。随着水位上涨,滩势逐渐改善,横流和扫弯水减弱,左槽分流增加。到中水,左槽水深较大,主流趋直,流向平顺,船舶开始沿左槽上下,滩段不再碍航。泥沙运动方面,受弯道河势的影响,主流通过进口弯道右转后,面流取直走左汊,底流落湾指向右汊,卵石推移质在底流携带下,沿铜鼓子浅区向右汊输移。洪水期,受下口束窄壅水作用,右槽铜鼓滩一带弯槽形成回流区,泥沙大量

落淤。枯水期水流向右槽落湾，冲刷汛期淤积泥沙。该深槽年内泥沙冲淤变化较大，年际间基本保持稳定。

## 2 碍航特点及治理思路

### 2.1 碍航特征与成因分析

枯水期上段铜鼓子一带水深不足，中段航槽弯曲，下段主流受曾盘石的挑流影响，流速大，流态乱。“上浅、中弯、下险”是主要碍航特征。

1993年曾经对铜鼓子浅区疏浚(图2)，加宽加深航槽，同时在中下段弯槽右岸建一丁顺坝归顺水流，减弱扫湾水和泡漩。工程后航道尺度达到要求，下段流态也有改善。但经一段时间自然演变后，上段铜鼓子和中段碛翅回淤严重，枯水期上段铜鼓子出浅，中段弯曲，下段流态恶化，碍航依然严重。

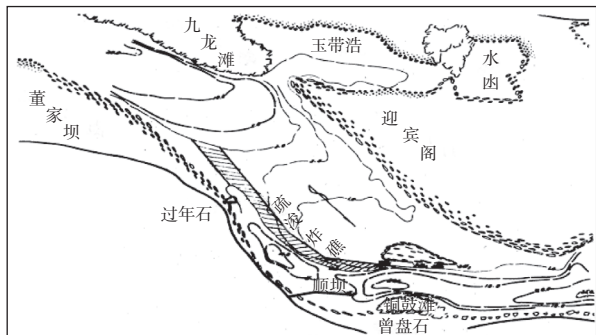


图2 1993年整治方案

原因为：中洪水期，水流淹没入口董碛坝边滩，下泄比枯水期顺直，水流过九龙滩后河道迅速放宽，但出口下游河道弯曲以及出口有大中坝阻水作用，流速迅速降低，挟沙力减小，大量推移质泥沙在江中淤积，形成迎宾阁碛坝。汛后随着水位下降，上段水流向左落弯，受左岸九龙滩阻挑后右转，对迎宾阁伸向江中的碛翅进行冲刷，由于枯水期水流的动能不够，不能冲深碛翅，从而造成“上浅、中弯、下险”的复杂碍航特征。

### 2.2 治理思路

治理思路有两类：1) 在1993年治理思路基础上，对入口铜鼓子浅区和中段迎宾阁碛翅进行

疏浚，同时右岸抛筑建筑物维持疏浚区稳定。船舶沿历史航槽通行的“右槽方案”。2) 摒弃以往的治理思路，对迎宾阁与江中潜碛之间的碛槽进行疏浚，新劈新航槽，并配以建筑物束水攻沙维持新开航槽的稳定。船舶通行新槽的“左槽方案”。两相比较，右槽方案可解决入口水深不足的问题。但从以往整治效果看，滩口容易回淤，今后需维护疏浚。此外，受河势制约，中下段弯曲半径小的问题得不到解决，加上该位置流速大、流态坏，船舶航行仍然危险。而“左槽方案”将上、下游深槽平顺连接，顺应河势，航道避弯取直，能根本上解决航道弯曲半径小的问题。当然，新开航槽长达1 100多m，宽达80~95 m。如何确保新开航槽的稳定是关键所在。

为遴选最佳方案，从根本上解决铜鼓滩的碍航问题，进行了大量细致的研究论证工作。包括原型观测、地质勘察、数学模型研究、定床试验、定床输沙试验、动床实验、疏浚弃渣区稳定性试验等<sup>[6]</sup>。

### 2.3 模型试验成果

数模首先对铜鼓滩在洪中枯不同水位下的水沙运动特点、河床演变规律、滩险碍航原因，以及整治方案等进行了试验研究。成果认为“右槽方案”实施后，局部位置的流速比降较大，同时铜鼓子浅区今后存在回淤的可能，投资较小；“左槽方案”实施后新开航槽顺直，水流平顺，流速流态较好，但新开航槽稳定性较差，对河势的改变相对较大，投资较大；建议对2个方案作进一步的研究<sup>[7]</sup>。

物模定床在数模基础上对洪中枯不同水位下的水沙运动规律、6个右槽类方案和9个左槽类方案进行了试验研究。在研究了不同水位下水沙运动规律的基础上着重研究了“右槽方案”如何布置整治建筑物维持疏浚后，铜鼓子浅区与迎宾阁碛翅的稳定问题；着重研究了“左槽方案”新开航槽的水流流速问题，以及如何合理的确定开槽尺度，减少新开航槽中的泥沙淤积，维持新槽稳定的问题<sup>[8]</sup>。

物模动床着重验证了“左槽方案”新开航



槽的尺寸问题、开挖后的通航水流条件,以及航槽的稳定问题;验证了右槽方案如何抛筑整治建筑物,保持疏浚区域稳定的问题。试验成果认为“左槽方案”实施后流速流向流态能够满足通航要求,航槽稳定性能够得到保证。选“左槽方案”为工程推荐方案;“右槽方案”航道弯曲,总体通航条件改善不如“左槽方案”,作为比选方案<sup>[9]</sup>。

### 3 整治方案及工程措施

根据试验成果,确定基本治理思路为拓深左汊,限制右汊发展,同时根据铜鼓滩的水沙运动特征,合理布置整治建筑物调整水沙运动,充分利用湾道水流特点,使表层清水进入左汊,冲刷左汊航道;而将底层推移质泥沙带入右汊,达到水沙分离,正面取清水,侧面排底沙的效果。

另外,两汊分流点附近存在由左向右的横流,对船舶安全进入左汊通行,以及保证左汊水流流量不利,这需要通过合理布置整治建筑物,特别是精准确定顺坝头部的位置予以解决。

#### 3.1 工程布置

在左汊开挖新航槽。即通过疏浚手段开挖江中潜碛与迎宾阁之间的碛槽。开槽长度1100 m,开槽深度3.5 m,开槽宽度上段80 m,下段逐步加宽到95 m。开槽纵坡结合水面比降采用变坡。上段坡陡,下段坡缓(图3)。

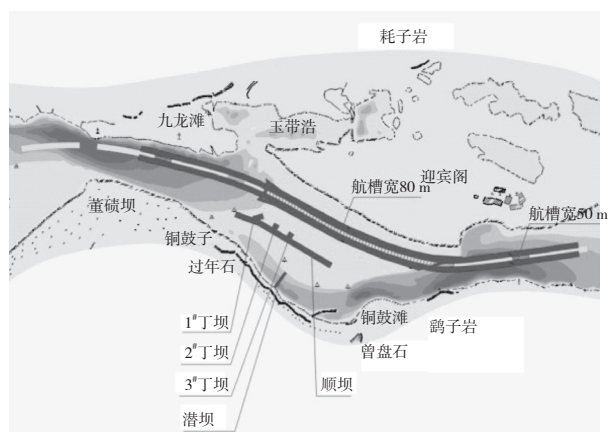


图3 铜鼓滩整治方案

左槽的开挖使得铜鼓滩上下深槽得以平顺连接,通行船舶彻底避开弯曲狭窄流态紊乱的右槽,彻底解决了该滩“弯、浅、险”的问题。

新开航槽平面微弯,上窄下宽,纵坡上陡下缓,可以适当增大上段流速,减少上段回淤,同时使下段水流逐渐分散,流速减缓,避免下段流速过大,船舶上行困难。

在江中潜碛滩脊上构建1道顺坝和3道丁坝,并在右槽中段建1道潜坝。滩脊顺坝调整左右两槽分流比,减少中枯水横流对船舶航行的影响,即增大新开的左槽流量,归顺水流流态;依托顺坝而建的3道齿丁坝进一步缩窄左槽中上段的宽度,达到集水攻沙,稳定新开航槽的目的;利用右槽的潜坝来适度壅高右槽水位,减少右槽流量。工程的布置有几个重要的关键点:

1) 顺坝坝头与右岸之间的右槽进口口门宽度问题。根据铜鼓滩的水沙运动特点,主流经过上弯道后,到铜鼓子分汊点附近,水沙分离,面层水流趋直,走左汊,推移质泥沙随底流落湾,走右汊。研究表明:右槽进口口门留宽了,更多的水流会进入右汊,左汊航道流量不足,不利于左槽稳定;而口门留窄了,又会将泥沙拦截在左汊中造成左槽上段航槽淤积。

模型试验显示,左槽开挖后航槽上段流速相对较小,但泥沙易回淤;下段流速大,航槽稳定,但可能引起船舶上滩困难。既要维持新槽稳定,防止泥沙回淤,又要避免新槽下段流速过大,这是该滩整治的关键点和难点。模型试验进行的多方案对比分析成果显示:上延顺坝,将左右两槽分流点上提,将导致左槽流量大,泥沙量也大,此时,右槽上段回淤概率增大,船舶上滩困难。如将左右两槽分流点下移,则左槽泥沙量较少,但流量也减少,同样不利于左槽稳定。这就形成一对难以解决的矛盾。如何解决这一矛盾,工程建设者受都江堰工程飞沙堰溢洪道原理的启迪。通过研究,首先确定出特征流量下的水沙分离点,并以此作为左右两槽的分流点,亦即顺坝坝头的位置,实现水沙分流;同时,在右弯槽中抛筑一道潜坝,通过潜坝的壅水作用,降低

右槽纵比降,达到降低右槽的分流比,减少顺坝上延长度的目的。实现了水流走左槽,放泥沙入右槽,左槽既不回淤,流速也满足要求。实现了“正面走水,侧面排沙”。

2) 3道齿丁坝的平面位置很关键。顺坝和潜坝的抛筑实现了水沙分离,保证了左汉航槽的流量。但是左汉航宽仍较大,要保证左汉航槽的稳定还需要进一步束窄左汉宽度。这就需要在顺坝左侧抛筑一定长度的短丁坝群,通过束水攻沙,保证航槽的稳定。考虑到新槽上段流速小,容易回淤,下段流速大,航槽会相对稳定,故3道齿丁坝以顺坝为依托布置在左槽的中上段,其长度和间距通过水力计算和试验论证综合确定,且第一道短丁坝布置为下挑,以减小不良流态对航行的影响。

### 3.2 建筑物结构的选型

合适的整治建筑物结构是保证整治功能持久发挥的关键。川江传统的整治建筑物主要采用堆石坝芯与干砌块石坝面结构。由于结构松散,受大流量高速水流的冲击,块石逐渐流失,进而引起坝体局部或整体失稳破坏,导致整治功能丧失。

对于川江铜鼓滩这样一种水沙条件,不仅流速大,而且推移质运动活跃,特别是顺坝的头部,正处于推移质输沙带上,水流的顶冲淘刷、卵石推移质的撞击磨损,都会是损毁整治建筑物的“头号杀手”。为此,工程在顺坝头部以及丁坝的迎流顶冲等关键部位,采取了钢丝石笼抛筑坝芯、扭王字块压顶护面等新的结构形式。扭王字块是海港防波堤常用建筑物结构材料,一般质量在10 t以上,用以抵御海浪往复流的冲击。川江的水流特点是单向的,水流冲击力也没有海浪大,采用扭王字块的原因主要是借用该块体单块质量大,块体之间能相互咬合,整体性好,并且对河床变形的适应性也很好。另外,扭王字块彼此之间支脚密布,对水流的消能作用强,能够促使泥沙在块体之间淤积,进一步增强坝体的整体稳定性。铜鼓滩顺坝坝头流速一般4 m/s左右,通过测算,将扭王字块尺寸改进优化,设计为

0.8 t规格。实践证明,该结构非常适合川江的特点。

钢丝石笼个体质量大,稳定性好,造价低,有利于提高坝体的整体稳定性。但是川江流速大,钢丝石笼在高速推移质卵石的强烈磨蚀下,会很快损坏,采用扭王字块护面后,起到了保护钢丝石笼的作用。从工程实施后的观测情况看,坝头非常稳定。

## 4 工程效果

铜鼓滩号称“川江滩王”,是川江最著名、最复杂的碍航滩险之一,也是当时长江上游单滩治理投资规模最大的滩险。该工程从2007年12月初开工,2009年6月底完工。为了解实际治理效果,施工前对该滩进行了水深、流速流向、河心比降等观测,完工后在经历1个洪水期后,于2010年1月进行了上述内容的工程效果观测。此外,在主体工程完工后,为了解和掌握整治建筑物汛前汛后的变化情况,还进行了工程区域重点部位的汛期观测。观测成果显示,工程实施后取得显著效果。具体表现在以下几个方面:

1) 航道尺度大幅提高,“上浅中弯下险”恶劣通航条件得到根本解决。整治前原右汉航槽入口铜鼓子浅区水深在1.8~2.4 m,达不到2.7 m水深的航线长达160 m,中段航道弯曲半径刚满足560 m的要求。整治后,经过一个水文年,新航槽内水深在3.8~6.0 m,大部分水深在4.5 m左右;满足2.7 m水深的航槽宽度近100 m左右;新航槽顺直,弯曲半径达2 000 m以上。

2) 水流条件得到很大改善。整治前原右汉航槽水流经迎宾阁潜碛向弯曲的右槽落弯;到曾盘石以下,水流受上游左岸九龙滩石梁和下游右岸弯顶曾盘石一左一右的挑流影响,有形成强烈的回流泡漩,流态紊乱。航槽内最大流速3.56 m/s,最大纵比降达2.9‰,船舶过往此处非常危险。通过整治,新开左槽将滩段上下游深槽平顺连接,航道顺直,水流平顺,流速流态较好。航槽内最大流速比降组合为流速3.02 m/s,对应比降1.4‰,流速比降等水流条件满足设计要求,航道“弯、

浅、险”的碍航特征均得到解决。

3) 优化工程布置,科学确定分流点,实现了既维持新开航槽稳定,又保证船舶平稳上滩。铜鼓滩左槽开槽范围大,开槽入口流速小,容易回淤,出口流速较大,容易造成船舶上滩困难。科学确定分流点位置是关键。分流多会造成船舶上滩困难,分流少会造成滩口回淤。前期通过数模、定床和动床物模对滩段的水沙运动条件、数十个不同整治建筑物布置方案进行分析和研究,在掌握水沙运动规律基础上,对工程布置进行优化,最后科学合理地确定了铜鼓滩左右汉的分流点。设计流量时,左汉口门宽度300 m,左汉分流比48.4%,右汉口门宽度150 m,右汉分流比51.6%。科学合理的分流点使得清水归直槽,泥沙在底流的携带下进入右弯槽。即保证了新开航槽的稳定,同时也使新航槽水流平顺,避免了航槽下段流速过大,船舶上滩困难的情况。

3.4) 新型坝体结构的应用,适应了川江恶劣的水沙条件,建筑物的耐久性明显提高。川江水流暴涨暴落,流急水乱,尤其是大粒径卵石推移质在高速水流带动下,对整治建筑物的冲刷力特别强。以前川江整治建筑物采用块石坝体,整体稳定性相对较差,在恶劣水沙条件的冲刷下,块石很快流失,引起坝体渐进式的局部和整体破坏,完工后的维护量很大。铜鼓滩整治建筑物采用钢丝石笼坝头配以扭王字块护面等新型结构,坝体的整体稳定性、耐久性得到很大提高。工程实施后,已经过多个水文年,坝体依然稳定。图4为整治建筑物现场照片。



图4 整治建筑物现场效果

## 5 结语

铜鼓滩通过开辟碛槽,配以整治建筑物维持新槽稳定的措施,彻底解决了该滩“弯、浅、险”的碍航问题,保障了枯水期该段航道的畅通,工程效果良好。

通过剖析该滩水沙规律及治理措施,认为该类山区河流弯曲分汉滩险主流洪水趋直,枯水落湾,高水时面流与底流分离,面流趋直,底流携带泥沙落弯;可开辟窄深型直汉通航,辅以江中整治建筑物束水维持航槽稳定;考虑到水沙分离的规律,应合理确定分流点,使水流归直槽,泥沙仍走弯槽。

总的来看,铜鼓滩整治工程在治理思路、整治建筑物结构材料等方面获得一定突破,在整治措施研究、挖槽设计等方面取得一定经验,可为长江上游以及其他山区河流类似滩险的治理提供参考。

## 参考文献:

- [1] 长江航道局. 川江航道整治[M]. 北京: 人民交通出版社, 1997: 36-39.
- [2] 李青云. 疏浚工程[M]. 北京: 人民交通出版社, 2000: 50-55, 95-97.
- [3] JTJ 312-2003 航道整治工程技术规范[S].
- [4] 长江重庆航运工程勘察设计院. 长江干线叙泸段航道建设二期工程工可报告[R]. 重庆: 长江重庆航运工程勘察设计院, 2006: 12-19.
- [5] 长江重庆航运工程勘察设计院. 长江干线叙泸段航道建设二期工程初步设计[R]. 重庆: 长江重庆航运工程勘察设计院, 2007: 40-49.
- [6] 重庆交通大学. 长江叙渝段典型卵石浅险滩的整治技术研究报告[R]. 重庆: 重庆交通大学, 2007: 81.
- [7] 重庆交通大学. 长江上游铜鼓滩航道整治数值模型研究报告[R]. 重庆: 重庆交通大学, 2005: 43-57.
- [8] 重庆西南水运工程科学研究所. 长江干线叙泸段二期工程铜鼓滩定床模型试验研究报告[R]. 重庆: 重庆西南水运工程科学研究所, 2006: 25-35.
- [9] 重庆西南水运工程科学研究所. 长江干线叙泸段二期工程铜鼓滩动床模型试验研究报告[R]. 重庆: 重庆西南水运工程科学研究所, 2006: 21-23.

(本文编辑 郭雪珍)