



# 坝下沙卵石河床河工模型设计及应用

茆长胜, 游强强, 赵德玉

(长江航道规划设计研究院, 湖北 武汉 430011)

**摘要:** 三峡水库蓄水运用后, 坝下河道的水沙条件发生了重大变化, 使坝下游沙卵石河段的河势演变规律发生变化。通过总结、分析实测资料及前人研究成果, 针对坝下河段床沙组成特点, 采用双层铺沙法进行物理模型试验研究, 较好地复演了本河段河势变化, 为开展坝下沙卵石浅滩治理研究提供了支撑。

**关键词:** 河势演变; 沙卵石河段; 双层铺沙; 物理模型

中图分类号: U 612

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)07-0104-06

## Design and application of sand pebble bed river model of downstream of dam

MAO Chang-sheng, YOU Qiang-qiang, ZHAO De-yu

(Changjiang Waterway Planning, Design and Research Institute, Wuhan 430011, China)

**Abstract:** After impoundment of the Three Gorges reservoir, the incoming water and sediment conditions of its downstream river reach are changed. Consequently, changes occur in the riverbed evolution. On the basis of measurements and research findings by predecessors, aiming at the downstream reach of bed sediment composition, in order to study the riverbed evolution, we carry out physical model test by the double sand method to study the variation of river regime of the reach, which provides reference for the the next stage work.

**Key words:** riverbed evolution; gravel bed reach; double sand; physical model

宜昌一大步街河段全长约 112 km, 紧邻三峡工程、葛洲坝水利枢纽下游, 为长江出三峡后经宜昌丘陵过渡到江汉平原的河段, 是连接三峡库区与长江中下游地区的物流通道, 其航运条件的改善对于维持长江“黄金水道”畅通具有重要意义。三峡水库蓄水后, 上游来沙量减少引起的河床冲刷首先体现在近坝的沙卵石河段, 枯水期水位持续下降, 区间内重点碍航水道航道条件持续恶化, 连续几年造成航槽尺度难以满足要求。近年来, 对大量实测资料的分析研究表明<sup>[1-4]</sup>, 三峡水库蓄水后坝下沙卵石河段内航道问题主要表现为: 沙卵石河段内沙质淤沙浅滩航道水深有所提高; 局部河段向宽浅方向发展, 航道水深减小;

随着水位下降, 沙卵石局部浅滩河段将出现水深不足问题。本文根据本河段河床组成及上游来沙特点, 采用双层铺沙法进行物理模型试验研究, 对研究沙卵石河床演变趋势及航道治理提供参考。

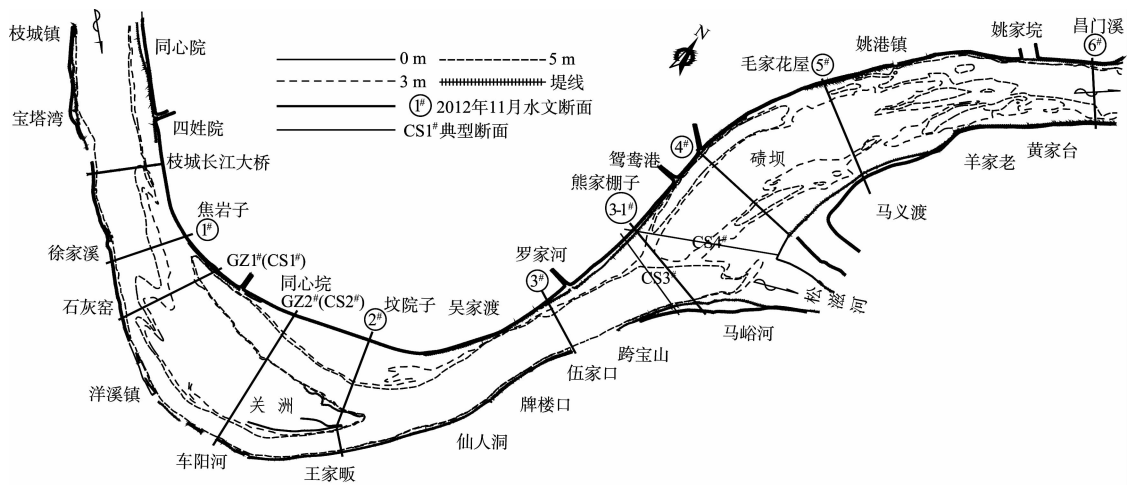
## 1 概况

### 1.1 河段概况

本文研究河段为长江中游枝城—昌门溪河段, 该河段位于上荆江河段上段, 处于山区河流向平原河流过渡地带, 属中游重点沙卵石浅滩河段, 上起枝城水文站, 下止昌门溪, 全长 28 km。本河段包括关洲水道和芦家河水道, 上接枝城水道, 下连枝江水道, 河道形势见图 1。

收稿日期: 2013-11-10

作者简介: 茆长胜 (1958—), 男, 高级工程师, 从事航道整治研究工作。



注: 根据2012年11月测图绘制, 绘图基面为当地航行基准面。

图1 枝城—昌门溪河段河势

关洲水道上起石灰窑, 下止陈二口, 长约 10.9 km, 属双股微弯分汊河型, 右岸为凹岸, 临江侧是耸立的陡坡, 多处礁石伸出, 上有青蛙石、洋溪礁, 下有仙人洞石坪, 左岸汛期易形成边滩。水道内江心偏右有关洲将河道分为左右两汊, 左汊为主汊, 依次分布有沙集坪边滩和同心垸边滩。右汊又称关洲夹, 水深良好, 为目前主航道所在。关洲河床组成主要为沙卵石, 左岸边滩均为砂质边滩, 右岸岸坡为基岩石质岸坡。两岸受枝城镇—陈二口基岩节点控制, 以黄黏土为主组成的硬土层普遍发育, 抗冲性较好, 河势较为稳定。近年由于左汊冲刷发展, 对右主航道条件产生不利影响。

芦家河水道自陈二口—昌门溪, 全长 12 km, 属微弯放宽型水道, 进口右侧有松滋河分流入洞庭湖。放宽处河心有砾卵石碛坝, 将河道分为沙泓、石泓, 其中左汊沙泓为常年主航道, 年内中洪水期主流走流石泓, 枯水期走沙泓, 左右摆动。三峡水库蓄水运行以来, 芦家河水道演变规律没有发生根本性的改变, 沙泓进口段在中洪水期仍然处于缓流区, 虽然由于上游来沙大幅减少, 泥沙淤积幅度减弱, 但在汛后熊家棚子边滩淤积外延可以形成碍航沙埂, 另在沙泓中段天发码头附近, 局部比降大、水流急的“坡陡流急”现象依然存在, 对船舶的安全航行构成威胁。

### 1.2 来水来沙概况

研究河段的来水来沙情况主要以宜昌水文站的观测资料统计说明。本河段的径流和泥沙主要来自宜昌以上, 支流清江来水量占宜昌站水量的 3% 左右, 沮漳河的水量更小, 还不及宜昌站的 0.5%, 而松滋口枯期基本处于断流状态。

三峡建库前, 多年平均径流量为  $4\ 382 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 2003 年 6 月蓄水后, 径流量总体变化不大, 但来水过程有较大变化, 主要体现在汛后蓄水下泄流量锐减, 枯水期流量增加。蓄水后, 下泄含沙量、输沙量明显减少, 不及蓄水前约 9% (表 1)。

表 1 宜昌站实测水沙特征

年份	径流量/ 亿 $\text{m}^3$	输沙量/ 亿 t	输沙量占多年 平均比例/%
多年平均 (1950—2002 年)	4 382	4.920	
2003	4 097	0.976	1.98
2004	4 141	0.640	1.30
2005	4 592	1.100	2.24
2006	2 848	0.091	0.18
2007	3 980	0.527	1.07
2008	4 118	0.320	0.65
2009	3 724	0.350	0.71
2010	3 954	0.330	0.67
2011	3 393	0.062	1.26
2012	4 324	0.031	0.69

## 2 模型设计

### 2.1 近期河床粗化情况

枝城—昌门溪河段河床在三峡蓄水后呈现明显冲刷粗化的特点，根据2010年实测河床质资料，与2003年床沙勘测结果对比，床沙明显粗化，原沙质断面部分变为卵石夹沙河床。其中关洲水道固定断面（图2），取样河段内床沙  $D_{50}$  一般为 0.231 ~ 18.4 mm，平均为 2 mm，表层卵石面积约占 26%；芦家河水道床沙  $D_{50}$  一般为 0.257 ~ 28.9 mm，平均为 6 mm， $D_{max}$  一般为 15.8 ~ 94.8 mm<sup>[5]</sup>，卵石

面积约占 70%。

枝城—昌门溪河段两岸主要为丘陵阶地，河岸难以变形，冲刷主要发生于枯水河槽。因此河道的平面形态，特别是两岸的岸线变化不大，但深泓纵剖面、横断面形态变化较大。从深泓纵剖面的变化来看，三峡水库蓄水以来全河段内深泓总体冲刷下降，但下降幅度沿程变化很大：总体上深泓高程较低的部位下降幅度大，深泓高程较高的部位下降幅度小；深泓高程的不均匀下降使得纵剖面的起伏程度加大<sup>[6]</sup>。

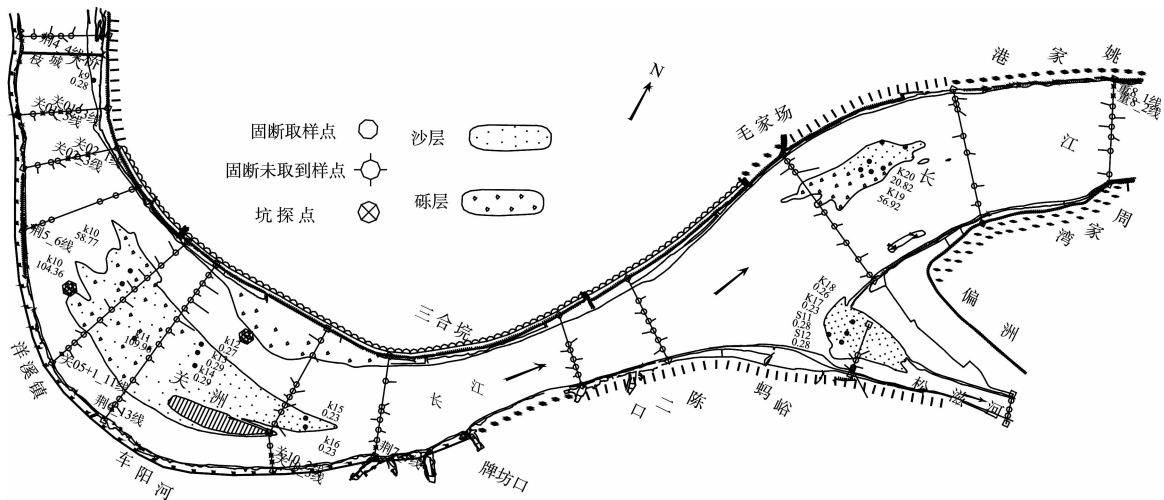


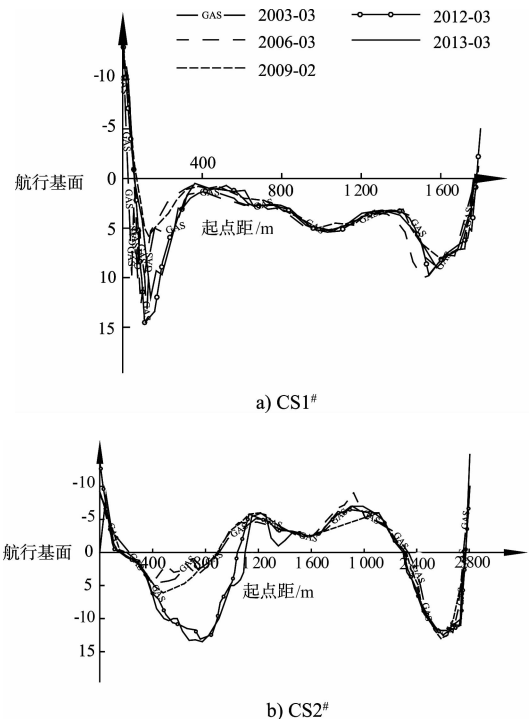
图2 枝城至昌门溪河段现场取样点平面位置分布

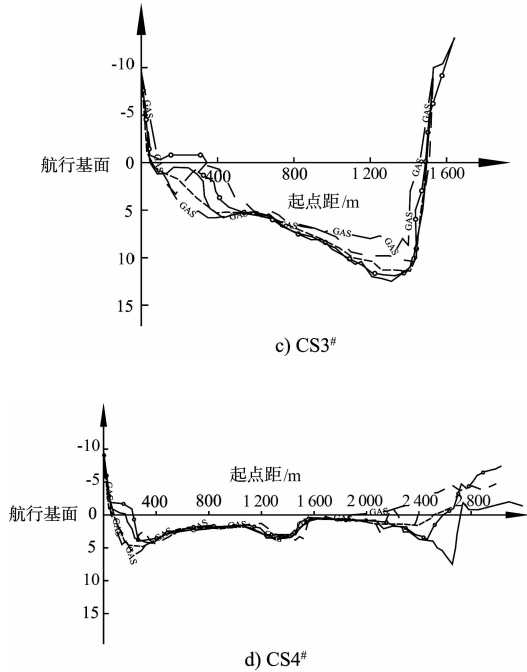
从横断面形态变化来看（图3），关洲水道断面变化以边滩、支汊的大幅冲刷为主，枝城附近边滩严重萎缩，关洲左汊明显冲刷，而深泓所在位置却变化甚小；断面冲淤变化在2008年之前较为缓慢，2008年后呈现出迅猛发展态势，2011—2012年仍冲刷剧烈。芦家河水道段：沙泓内2002—2003年发生的冲刷主要为卵石层上的细沙覆盖层，2003年以来沙泓进出口变形甚小，石泓进出口冲刷虽然速度较慢，但因冲刷持续发生，因此石泓进出口处的变化相对较大。

### 2.2 模型设计

#### 2.2.1 模型沙选取

根据本河段上游来水来沙（表1）以及采样分析成果资料统计，悬移质中粒径  $d = 0.05 \sim 0.5$  mm 的泥沙约占 27%，这部分泥沙正是芦家河浅滩汛





注: 断面位置见图1

图 3 三峡水库蓄水后枝城—昌门溪河段典型断面冲淤变化

期淤积物的主要成分, 汛后淤沙被冲起, 以近底悬移运动方式被输往下游, 对于  $d < 0.05 \text{ mm}$  的冲泻质可以不予考虑。因此, 模型沙应满足悬移相似、起动相似、挟沙相似和河床变形相似。根据试验要求, 选用苯乙烯二乙烯苯聚合物 ( $\rho_s = 1.15 \text{ t/m}^3$ ) 模拟悬移质中的床沙质和推移质, 模拟砾卵石用的无烟煤 ( $\rho_s = 1.40 \text{ t/m}^3$ ), 产自宁夏银川, 原用于制作活性炭的滤料, 品质统一含杂质少, 颗粒为无规则的多棱角状, 不易破碎。

### 2.2.2 模型设计

#### 2.2.2.1 悬移质运动相似

由于模拟的是河床冲淤特别是深槽部位的冲淤问题, 只考虑悬移质的床沙质部分是合理的。为满足悬浮相似和沉降相似, 并结合本河段实际情况, 确定粒径比尺及塑料沙的级配:

$$\alpha_d = \left( \frac{\alpha_\omega}{\alpha_{\rho_s - \rho}} \right)^{\frac{1}{2}} = 0.32 \quad (1)$$

起动相似条件可由公式 (2) 导出, 选定塑料沙的级配以后, 根据长江科学院、清华大学和武

汉水利电力大学等单位水槽试验资料, 确定起动流速比尺  $\alpha_{u_0} = 10$ 。

$$U_c = K \sqrt{\frac{\rho_s - \rho}{\rho}} g d \left( \frac{h}{d} \right)^m \quad (2)$$

由悬沙输移方程可知, 模型悬沙运动相似要求含沙量比尺  $\alpha_s$  等于挟沙能力比尺  $\alpha_{s^*}$ , 通过水流挟沙力公式转换确定:

$$\alpha_s = \alpha_{s^*} = \alpha_C \frac{\alpha_{\rho_s}}{\alpha_{\rho_s - \rho}} = 0.076 \alpha_C \quad (3)$$

由包括悬移质和推移质的河床变形方程式, 导出河床变形的时间比尺:

$$\alpha_{t_2} = \frac{\alpha_{\rho'} \alpha_L \alpha_H}{\alpha_{q_s}} = 826 \text{ (只考虑悬移质床沙质)} \quad (4)$$

#### 2.2.2.2 推移质运动相似

沙质推移质: 实测资料分析, 沙质推移质的数量极少。因此, 对于沙质推移质在模型中可以不单独列入, 放在悬移质中的床沙质中一并考虑。仅在制模时, 床面沙质覆盖层按河床地形和组成铺放。

卵石推移质: 卵石运动及其冲淤相似主要取决于起动相似, 所以, 仅以起动相似作为控制选沙条件。砾卵石的起动流速仍以公式 (2) 表达, 将起动流速系数比尺加大 1.15 倍。按满足卵石起动相似的粒径比尺计算, 可使模型沙加粗 1.55 倍, 以反映卵石运动的特征。

$$\alpha_{d_2} = \frac{\alpha_n}{\alpha_k^{14.5} \alpha_{\rho_s - \rho}^{7.5}} = 9.63 \quad (5)$$

卵砾石推移质输沙率采用成都勘测设计院公式:

$$\alpha_{G_b} = \alpha_{\rho_s} \alpha_d \alpha_{U-U_0} \left( \frac{\alpha_U}{\alpha_{U_0}} \right)^3 \left( \frac{\alpha_d}{\alpha_h} \right)^{1/4} \alpha_L \quad (6)$$

卵砾石推移质运动时间比尺:  $\alpha_{t_3} = \alpha_H \alpha_L \alpha_{\gamma_s} / \alpha_{g_b} = 582$ 。

#### 2.2.3 模型制作

根据本河段的地质钻探资料和最新的河道地形资料来看, 河床中卵石出露面积较大, 沙质河床部

分卵石层上面沙质覆盖层厚度也有限。三峡水库“清水”下泄不会导致该河段无限制的冲刷，在沙卵石层冲刷粗化后，便形成冲刷极限地形。因此，本次物理模型试验中，将冲刷极限地形作为重要的边界控制条件，有利于研究河道的演变趋势。

本河段卵石层面的确定和绘制主要是基于钎孔、钻孔资料以及多年的河道地形图来完成的。按照枝城—昌门溪河段历年来钻孔44个、钎孔57个，布置了18个横断面（图2）。首先读取18个横断面历年来实测地形图形态和钎、钻点历年来的河床高程，获取每个断面取地形的下包线，点绘成卵石层面高程图<sup>[7]</sup>。按实测地形及河床组成分层铺设模型沙，以较好地实现冲刷相似。

### 3 模型试验分析

#### 3.1 模型主要比尺

由于模型中使用了2种重率不同的模型沙做试验，致使悬移质和卵砾石推移质引起的河床变形速度均不同，无法避免时间变态问题，由于本河段河床变形主要是悬移质和沙质推移质运动引起，卵石推移质运动对河床变形影响处于次要地位，故以悬移质运动时间比尺控制。

通过验证试验，对含沙量比尺、河床冲淤变形时间比尺进行了适当调整，模型主要比尺情况见表2。

表2 模型主要比尺

比尺类别	比尺名称	设计值	试验选用值
几何相似	平面比尺 $\alpha_L$	300	300
	垂直比尺 $\alpha_H$	100	100
悬移质及沙质推移质运动相似	沉速比尺 $\alpha_\omega$	4.39	4.39
	粒径比尺 $\alpha_{d_i}$	0.632	0.632
	干密度比尺 $\alpha_p$	2.0	2.0
	含沙量比尺 $\alpha_s$	0.209 5	0.210 0
卵砾石推移质运动相似	变形时间比尺 $\alpha_{T_i}$	286	300
	粒径比尺 $\alpha_{d_s}$	9.63	9.63
	输沙率比尺 $\alpha_G$	101	101
	变形时间比尺 $\alpha_{T_s}$	582	582

#### 3.2 模型验证试验

##### 1) 试验资料。

本次验证试验初始地形采用2010年4月，施放2010年4月—2012年11月实测来水来沙量，水文资料主要有：2010年8月、2010年12月、2011年4月、2012年12月，实测断面流速、水面线、分流比、比降、地形等。

##### 2) 验证成果分析。

①水面线验证：在三级验证流量下，模型水面线与原型观测值基本接近，最大差值未超过 $\pm 0.05$  m，各个水文断面（图1）横比降与原型亦较接近，说明模型综合阻力与原型基本相似。

②流速分布及分流比验证：从模型试验结果可知，洪水期，关洲左汊为主汊，芦家河主流位于沙泓；枯水期，关洲右汊为主汊，芦家河主流位于沙泓。模型与原型各水文断面垂线平均流速大小及横向分布较为吻合，最大值未超过 $\pm 0.12$  m，说明模型基本满足水流运动相似要求；关洲两汊、芦家河两泓分流比与原型基本接近，最大差值未超过 $\pm 2\%$ 。

③地形冲淤验证：从原型资料可知，由于2010年4月—2011年4月上游来沙量相对较大，关洲洲体、坟垵子边滩、熊家棚子边滩、磙坝以及羊家老边滩有所淤积，其它部位变化较小，模型在淤积部位和范围上与天然基本相同。关洲左汊下段—吴家渡有所冲刷，陈二口深槽展宽下延，在沿陈二口右侧到松滋口门前也有冲刷，模型上也基本反映了这个现象，松滋口门前冲刷略少；2011年4月—2012年12月，河床主要表现为冲刷，主要冲刷部位有：枝城水道的焦岩子边滩、关洲左汊、关洲中部及左缘有较大范围冲刷、坟垵子边滩以及淞滋口门前。主要淤积在芦家河水道沙泓进口段和中段，幅度在2 m左右。模型上地形变化与天然河床变化过程基本相同。模型与原型冲淤量对比见表3。

表3 原型与模型河床冲淤量对比

万 m<sup>3</sup>

时段	类型	关洲水道				芦家河水道	
		左汊	右汊	总量	差值/%	总量	差值/%
2010-04—2011-04	原型	-144.2	-10.2	-154.6	3.49	+693.7	5.84
	模型	-140.1	-9.1	-149.2		+653.2	
2011-04—2012-12	原型	-1 880.1	-21	-1 901.1	9.57	-758.9	12.28
	模型	-1 703.2	-16	-1 719.2		-852.1	

注：“+”表示淤积，“-”表示冲刷。

#### 4 结语

1) 在坝下沙卵石河床动床河工模型试验中,使用双层铺沙法分别模拟卵石层、沙质床沙层,从试验验证效果来讲,能够比较准确的模拟坝下河段水沙运动,相对于传统铺沙方法,双层铺沙对沙卵石河床更有针对性,能更好把握坝下沙卵石河段的河势演变趋势,从而为沙卵石河床航道整治思路的形成提供科学依据。

2) 河工模型试验在模拟沙质推移质为主方面还存在很多不足,特别在同时考虑卵石运动时,在时间比尺方面难以做到统一。三峡水库蓄水以后,本河段冲刷后期,不可避免遇到同时模拟沙质和卵石推移运动情况,有待进一步深入研究。

3) 经模型验证相似后,进行了多年水文年河势演变趋势试验,工程方案研究试验,为本河段航道整工程前期研究工作提供技术支撑。

#### 参考文献:

- [1] 薛俊,茆长胜.长江中游芦家河水道维护及治理探讨[J].水运工程,2010(6):95-99.
- [2] 方春明,董耀华.三峡工程水库泥沙淤积及其影响与对策研究[M].武汉:长江出版社,2011.
- [3] 长江航道局.江口镇上下浅滩演变与整治研究总报告[M]//长江三峡工程泥沙问题研究6卷.北京:知识产权出版社,2002:378-421.
- [4] 陈飞,付中敏,刘怀汉,等.三峡蓄水初期坝下沙卵石河段航道条件分析[J].水力发电学报,2012(5):127-131.
- [5] 刘东生.2010年长江三峡工程坝下游宜昌至杨家脑河段河床组成勘测调查分析报告[R].武汉:长江水利委员会水文局,2010.
- [6] 黄成涛,李明.长江中游宜昌至昌门溪河段航道整治一期工程可行性研究报告[R].武汉:长江航道规划设计研究院,2013.
- [7] 茆长胜,游强强.长江中游宜昌至昌门溪河段航道整治一期工程动床模型试验研究报告[R].武汉:长江航道规划设计研究院,2013.

(本文编辑 郭雪珍)

(上接第89页)

#### 参考文献:

- [1] 王杰,范文博.基于中欧航线的北极航道经济性分析[J].太平洋学报,2011,19(4):72-77.
- [2] 曹玉墀.北冰洋通航可行性的初步研究[D].大连:大连海事大学,2010.
- [3] 夏立平.北极环境变化对全球安全和中国国家安全的影响[J].世界经济与政治,2011(1):122-159.
- [4] 尚文琦.“东北航道”全年通航的影响[J].中国国情国力,2012(5):36-37.
- [5] 王宇强.北极“东北航道”通航对中国航运业的影响[J].国际商贸,2012(10):180-182.
- [6] 张侠.北极航线的海运经济潜力评估及其对我国经济发展的战略意义[J].中国软科学,2009(S2):86-93.
- [7] 今参.关于北极航道的开发前景[J].港口经济,2011(11):21.

(本文编辑 郭雪珍)