

黄河中卫段复合型滩险整治技术

李家世¹, 刘晓帆¹, 周家俞²

(1. 四川省交通运输厅交通勘察设计研究院, 四川 成都 610017;

2. 重庆交通大学 西南水运工程科学研究所, 重庆 400042)

摘要: 对兼具“浅、急、弯、险”特点的黄河宁夏中卫下滩河段的复合型滩险整治技术进行研究。在深入分析滩险性的基础上, 提出多方案设计, 通过物理模型试验优化比选。试验表明: 挖槽上段采用复式断面、增加滩险进口段宽度和深度, 有利于减小滩段水面比降、减小流速。尽管上段水位降幅较大, 给上游河段带来不利影响, 但整治效果最佳。工程实施后通航水流条件良好, 航道条件得到有效改善, 为类似滩险的整治提供参考。

关键词: 复合型滩险; 航道整治; 物理模型

中图分类号: U 617

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)05-0133-06

Regulation technology of complex rapids in the Yellow River

LI Jia-shi¹, LIU Xiao-fan¹, ZHOU Jia-yu²

(1. Sichuan Communication Surveying & Design Institute, Chengdu 610017, China;

2. Southwest Research Institute of Water Transport Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400042, China)

Abstract: The regulation technology of complex rapids in the Yellow River of Ningxia autonomous region which is shallows, rapid, bending and dangerous is researched. Based on the analysis of the rapids' characteristics, we propose four regulation design schemes which are optimized through comparison by physical model experiments. The results show that the best regulation scheme uses duplex section in the upper segment of dredging to increase the depth and width of the inset segment of rapids, which is conducive to reduce the water surface slope and flow rate. Although it creates an adverse impact on the upper reaches due to the sharply decreased water level, it has the best regulation effect. The navigation condition is improved remarkably after implementation of the project and navigation flow conditions are satisfactory. It may serve as reference for the regulation of similar rapids.

Keywords: complex rapids; channel regulation; physical model

黄河自甘肃进入宁夏, 流经宁夏境内 12 个市县 397 km, 其中黄河流经中卫全市 182 km。黄河甘宁交界处的南长滩至沙坡头段航道全长 56 km, 总落差 38.6 m, 平均比降 0.69‰。该河段可分为两段: 上段南长滩至大柳树段为天然峡谷河段, 长约 44 km, 岸线基本稳定, 枯水期河宽 50~200 m,

河弯、流速急、比降大、流态紊乱, 个别宽浅河段洲滩将水流分成多股水流, 水流复杂, 洪枯水位变幅大、汛期水位陡涨陡落, 河型河势受两岸山谷的控制较稳定; 下段为大柳树至沙坡头段, 属于沙坡头水利枢纽库区河段, 长约 12 km, 库区河段, 水面较宽、水深富足、水流平顺, 大坝修

收稿日期: 2014-09-02

作者简介: 李家世 (1981—), 男, 工程师, 从事港口与航道工程。

建至今库区内冲淤基本达到平衡。中卫下滩河段位于南长滩至大柳树天然峡谷河段,属于峡谷型山区河流,岸线基本稳定,河道单一,分汊较少,但河道形态弯曲多变,边界条件较复杂^[1]。

笔者在深入分析滩性的基础上,提出多方案设计,通过物理模型试验优化比选,对兼具“浅、急、弯、险”特点的黄河宁夏中卫下滩河段的复合型滩险整治技术进行研究,提出最佳整治方案。

1 水文、泥沙

根据1980—2008年水文资料,安宁渡站多年平均流量为 $892\text{ m}^3/\text{s}$,保证率95%流量 $368\text{ m}^3/\text{s}$,实测历年最大流量为 $5\,630\text{ m}^3/\text{s}$ (1981年9月15日),历年最小流量为 $189\text{ m}^3/\text{s}$ (1999年1月9日),年内水量主要集中在汛期,5—10月径流量占全年总径流量的65.9%。

黄河宁夏中卫段的泥沙主要来自于兰州以下干流。安宁渡站多年平均含沙量为 $2.85\text{ kg}/\text{m}^3$,历年最大平均含沙量为 $5.32\text{ kg}/\text{m}^3$ (1999年),历年最小平均含沙量为 $0.77\text{ kg}/\text{m}^3$ (2008年),最大断面含沙量 $343\text{ kg}/\text{m}^3$ (1993年5月1日)。多年平均输沙量为0.812亿t,其中5—10月约占全年的97.7%,7—8月约占全年的64.0%,输沙量基本集中在汛期。年最大输沙量1.441亿t(1999年),年最小输沙量0.202亿t(2008年)。

2 滩险碍航特性

下滩河段平面上为“S”形弯曲河道,河床形态复杂,岸线凹凸不平,右岸有溪沟带出的冲积物,航道内礁石丛生(图1)。枯水期河面狭窄,航道弯浅,枯期河宽140 m,水深 $0.4\sim 1.8\text{ m}$,滩段比降为2.2‰,最大流速 $4.61\text{ m}/\text{s}$,伴有大浪扫弯水等不良流态;中洪水期水陡流急,波高浪大,流态恶劣,碍航严重,下滩为黄河著名的常年“浅、急、弯、险”滩险之一。该滩由于流速、比降大,水流紊乱,功率小、操作性能差的船舶上行过滩十分困难,且滩段礁石密布,流急浪大,扫弯水势强劲,下行船舶若操纵不慎,即有触礁、

搁弯撞岸的危险,该滩整治成功与否是黄河南长滩至沙坡头段航运开发的关键。

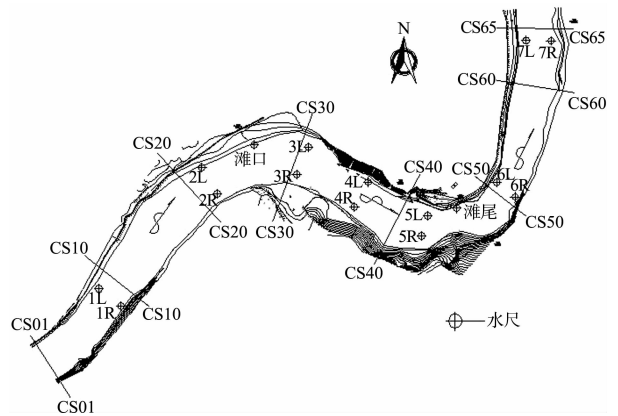


图1 下滩河段河势

3 建设标准与整治参数

3.1 建设标准

按内河V级航道标准建设,航道尺度为 $1.6\text{ m}\times 40\text{ m}\times 270\text{ m}$ (水深 \times 航宽 \times 弯曲半径),通航10、19、40客位客船(旅游船)及300 t单机驳货船。设计最高通航水位标准为3 a一遇,设计最低通航水位标准为多年历时保证率95%^[2-3]。

3.2 整治原则

黄河下滩河道弯曲,岸线曲折,河床窄浅、礁石丛生、水陡流急、波高浪大、流态恶劣,枯、中、洪水期全年碍航,航行十分困难,滩情异常复杂。针对该滩实际,拟定其整治原则为采取炸礁、疏浚、筑坝相结合的措施,扩大过水断面,减小流速,匀缓比降,调整流速分布,改善水流流态。

3.3 整治参数

下滩河段整治水位采用优良河段平滩水位法、多年平均流量法和造床流量法^[4]以及数学模拟等进行比选来确定。根据以往整治经验和优良河段模拟等综合分析,确定整治水位为设计水位以上 $1.0\sim 1.5\text{ m}$,相应流量 $862\sim 1\,260\text{ m}^3/\text{s}$ 。

根据理论计算结果、经验数据和采用优良河段模拟等方法确定本设计河段整治线宽度^[5]在 $100\sim 120\text{ m}$ 之间。但设计河段不可能同一宽度,要根据峡谷河段、开阔河段作适当的缩窄或放宽。

4 物理模型试验研究^[6]

4.1 模型设计及验证

水流条件相似是本项目研究的基础。由于试验河段河床多为基岩和礁石组成,河床及河岸相对稳定,因此,按定床水流模型进行设计。模型范围从滩段上游 1 150 m 起至滩下 1 100 m 止,全长约 3 000 m (含滩段约 750 m)。试验河段上、下游均为较顺直陡峭的狭窄河段,唯中段河床宽浅,河型弯曲,礁石密布,基岩出露,流态紊乱,水流条件十分复杂。考虑到本模型主要研究整治河段的通航水流条件,为确保水流结构的相似性,并结合场地、供水等条件,模型设计采用几何比尺为 $\lambda_L = 75$, $\lambda_h = 50$ 的小变率定床模型。本模型按重力相似和阻力相似准则进行设计。经计算,模型雷诺数 $Re > 1\ 000$,表明模型水流处于阻力平方区,属紊流状态,与天然水流相同。模型最小水深 > 3 cm,符合模型水流不受表面张力影响的要求。模型对水面线等水力要素进行验证,结果表明模型与原型相似性较好,模型设计合理,制作精细。

4.2 天然状态下的水流特性试验

在模型达到与原型水流条件相似的基础上,为弥补原型观测资料的不足,需要在模型上对天然条件下各级流量的水流特性进行全面观测,以便为分析滩情滩势演变规律、通航条件和研究整治方案提供更充分的资料。为此,在模型上进行了工程前天然情况下 $Q = 368\ \text{m}^3/\text{s}$ (设计流量)、 $862\ \text{m}^3/\text{s}$ (整治流量)、 $1\ 840\ \text{m}^3/\text{s}$ (中洪水流量)和 $3\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ (大洪水流量)共 4 级流量的水位、比降、流速分布及流态观测。试验水面线见图 2,比降、流速特征值见表 1。

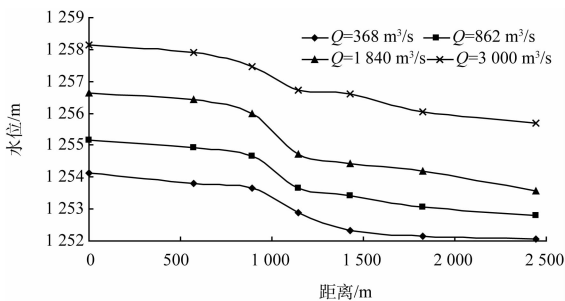


图 2 天然情况下工程河段水面线

表 1 天然情况下流速、比降特征值

流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	最大流速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	最大比降/ $\%$
368	4.17	2.92
862	4.46	3.91
1 840	6.34	5.10
3 000	5.77	2.89

当 $Q = 368\ \text{m}^3/\text{s}$ (设计流量) 时,滩段河面狭窄,航深不足,水流急,流态乱,滩上口河面宽度约 102 m,滩尾河面宽度仅 82 m,滩段最大流速达 4.17 m/s,右岸 3[#]、4[#]、5[#]水尺间水面比降分别为 2.92‰和 2.06‰,滩尾附近水域有弱回流,对面凸嘴附近存在斜流。

当 $Q = 862\ \text{m}^3/\text{s}$ (整治流量) 时,河面有所展宽,滩段流速增大,最大流速 4.46 m/s,右岸 3[#]、4[#]、5[#]水尺间水面比降分别为 3.91‰和 0.89‰,流态紊乱,且波浪增大增高,滩尾右岸凸嘴阻水挑流明显,斜流显现。左岸码头水域回流增强,且伴有较强泡漩。

当 $Q = 1\ 840\ \text{m}^3/\text{s}$ 时,全河段流速普遍增大,大部分在 2.5 m/s 以上,其中滩段流速普遍超过 4.0 m/s,最大流速达 6.34 m/s,最大水面比降为 5.10‰,水陡流急,波高浪大,流态恶劣。

当 $Q = 3\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 时,黄河宁夏段已进入主汛期,水位升高河面增宽,流速加大,滩段水流湍急,流速普遍超过 4.0 m/s,最大流速达 5.77 m/s,最大水面比降为 2.89‰ (右岸),波浪翻滚,流态恶劣,船舶航行十分困难。

4.3 整治方案试验

4.3.1 整治方案工程布置

物理模型试验先后对 4 个方案^[1]进行整治效果研究,各方案工程布置情况见图 3。

1) 方案 1。

沿设计航线布置了一处 60 m 宽挖槽 (炸礁),设计水深 1.6 m,底坡同设计水面线;滩下深沱布置 2 座潜坝,以期壅水,改善该滩的通航条件,潜坝坝顶高程均为设计水位以下 4 m;在右岸布置 1 座丁顺坝,坝长 317 m,坝高与整治水位齐平,坝顶纵坡同水面比降;切除滩尾右岸凸嘴,

切嘴底高程 1 252.18 m (同设计水位) 以期调顺下段水流, 增大主流的曲率半径。

2) 方案 2。

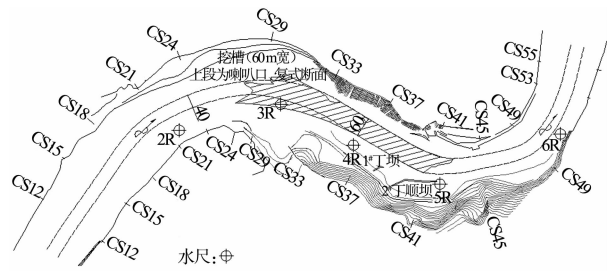
方案 2 在方案 1 的基础上, 综合考虑整治效果、工程投资及施工难易等, 将右岸丁顺坝调整为“丁坝+丁顺坝”组合, 其中丁坝长 33.5 m, 丁顺坝长 140 m。坝头向河心左移 13 m, 同时将方案 1 疏浚航槽中心线向右岸平移 10 m, 取消潜坝和切嘴。

3) 方案 3。

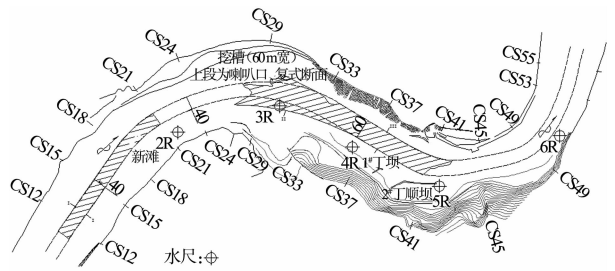
该方案在方案 2 的基础上, 加大炸礁深度, 增加上段航道开挖宽度, 研究扩大炸礁的整治效果及对上、下游河段的影响。挖槽上段采用复式断面, 下段仍采用梯形断面, 最小航宽 60 m; 炸礁深度从上至下由设计水位下 3.0 m 渐变至 2.0 m, 底坡为 0.5‰。

4) 方案 4。

虽然方案 3 显著改善了下滩的通航条件, 但由于方案 3 扩大炸礁范围和炸礁深度, 滩上水位降落过大, 造成上游航道出浅, 在距滩头约 0.5 km 附近形成新的碍航浅滩 (新滩)。本方案为有效改善新滩的通航条件, 按下滩设计水位下 2.6 m 深度进行开挖。



c) 方案3(挖槽60m+1#丁坝+2#丁顺坝)



d) 方案4(挖槽60m+1#丁坝+2#丁顺坝,新滩挖槽40m宽度)

图 3 方案布置

4.3.2 试验成果及分析

模型对各方案进行了 $Q = 368 \text{ m}^3/\text{s}$ (设计流量)、 $Q = 862 \text{ m}^3/\text{s}$ (整治流量)、 $Q = 1 840 \text{ m}^3/\text{s}$ (中洪水流量) 及 $Q = 3 000 \text{ m}^3/\text{s}$ (大洪水流量) 4 级流量的试验研究。设计流量 $Q = 368 \text{ m}^3/\text{s}$ 下各方案水面线如图 4 所示, 河段比降、断面最大流速在整治前后变化如表 2 和表 3 所示。

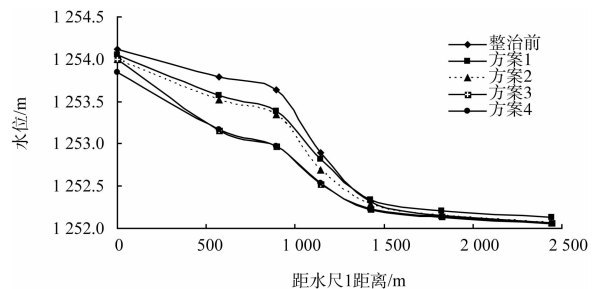
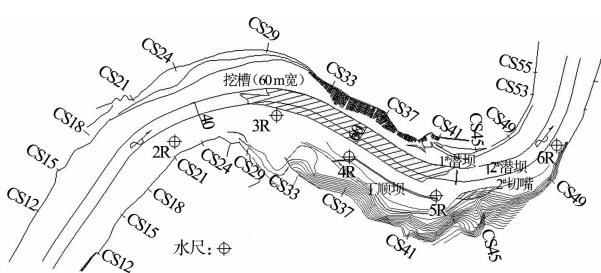


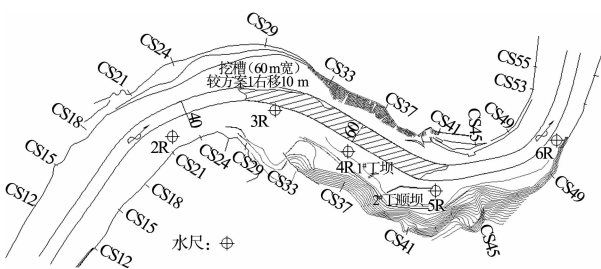
图 4 整治前后水面线变化

表 2 整治前后比降变化

水尺编号	间距/m	比降/‰				
		整治前	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4
1~2	571	0.578	0.841	0.841	1.471	1.173
2~3	321	0.467	0.561	0.561	0.592	0.623
3~4	253	2.925	2.253	2.569	1.779	1.739
4~5	281	2.064	1.708	1.459	1.032	1.103
5~6	400	0.425	0.325	0.325	0.225	0.225
6~7	615	0.130	0.130	0.130	0.114	0.114



a) 方案1(挖槽60m+1#、2#潜坝+丁顺坝+切嘴)



b) 方案2(挖槽60m+1#丁坝+2#丁顺坝)

表3 整治前后断面最大流速变化

断面号	距水尺 1/m	断面最大流速/(m·s ⁻¹)				
		整治前	方案1	方案2	方案3	方案4
CS12	159	1.84	1.55	1.53	1.47	1.59
CS15	294	2.19	1.92	1.75	1.83	1.84
CS18	416	2.62	2.01	2.03	2.15	1.90
CS21	565	2.05	2.07	1.96	2.08	2.03
CS24	689	1.84	2.01	1.85	2.07	2.03
CS27	805	2.19	1.94	1.90	2.11	2.10
CS29	896	1.84	1.68	1.59	1.74	1.78
CS31	994	2.69	2.36	2.03	2.19	1.63
CS33	1 088	2.90	2.73	2.64	2.75	2.18
CS35	1 178	3.18	3.00	2.72	2.77	2.71
CS37	1 268	3.25	2.97	2.92	2.92	2.81
CS39	1 358	4.17	3.39	2.60	2.76	2.60
CS41	1 464	3.46	3.31	2.78	3.37	2.60
CS43	1 562	2.12	1.87	1.94	2.14	1.99
CS45	1 618	1.27	2.23	2.10	2.52	1.91
CS47	1 675	2.39	1.95	1.52	1.98	1.98
CS49	1 779	1.70	1.50	1.31	1.50	1.39
CS51	1 879	1.41	1.48	1.43	1.64	1.32
CS53	1 972	1.27	1.21	1.25	1.40	1.22
CS55	2 052	1.48	1.46	1.48	1.51	1.46

方案1实施后,航深、航宽增大,流速、比降减小,航道条件较整治前有所改善。 $Q = 368 \text{ m}^3/\text{s}$ (设计流量)时,滩口(CS31[#])断面最大流速由工程前的2.69 m/s减小到2.36 m/s,滩尾(CS41[#])断面最大流速由工程前的3.46 m/s减小到3.31 m/s;滩上段右岸(3[#]~4[#]水尺)水面比降由整治前的2.93‰减小到2.25‰,下段(4[#]~5[#]水尺)水面比降由整治前的2.06‰减小到1.71‰。受潜坝壅水的影响,滩尾5[#]水尺水位升高0.02 m,CS41[#]断面流速减小0.04 m/s,可见潜坝作用有限。同时潜坝的阻水作用造成底流上升,泡漩强度增大,且流量越大泡水越强,此处正处于码头区,不良流态影响船舶停靠作业。丁顺坝的修建使得主流曲率半径增大,扫弯水势减弱,减少了下行船舶碰撞滩尾右岸凸嘴的危险。

方案2实施后,滩段的航深、航宽满足航道尺度要求,航槽水流平顺,流速、比降减小,通

航条件明显改善。当 $Q = 368 \text{ m}^3/\text{s}$ (设计流量)时,滩口(CS31[#])断面最大流速由工程前2.69 m/s减小到2.03 m/s,滩尾(CS41[#])断面最大流速由工程前3.46 m/s减小到2.78 m/s;上段水面比降由2.925‰减小到2.569‰,下段由2.064‰减小到1.459‰。设计流量时滩上水位最大降落0.3 m(3[#]水尺)。过滩船舶可充分利用航槽右侧缓水区上行,当 $Q = 368 \text{ m}^3/\text{s}$ (设计流量)时,上水航线流速在1.5~2.8 m/s之间。由于“丁坝+丁顺坝”组合整治建筑物的导流作用,进一步削弱了扫弯水势,减小了下行船舶碰撞滩尾右岸凸嘴的危险。取消潜坝,滩下深沱泡漩强度减弱,流态改善,行船安全度提高。

方案3实施后,该滩段的通航条件进一步改善,当 $Q = 368 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,航道水深2.0~1.6 m,航宽60 m,航道尺度满足设计要求,水面比降明显减小。上段为1.779‰,较方案2减少31%;下段为1.032‰,减少29%。另外,滩段流速相应调整,总趋势为上段流速与方案2接近,下段流速较方案2增大0.2~0.4 m/s。其原因是上段开挖深度和宽度增加较多,过水断面增加幅度与整治后水位降落引起的减小幅度基本相当,故上段流速值变化不大。而下段则因航槽开挖断面未变,受水位降低影响较显著,故流速有所增大。但由于实施后该滩水位降幅较大,对上游河段带来不利影响。当 $Q = 368 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,滩头(3[#]水尺)水位降落0.67 m,造成该滩上游航深不足,流速、比降增大,产生新的碍航险滩(新滩),出浅部位距下滩滩头约0.5 km。

方案4实施后,该滩的航道尺度满足设计要求,当 $Q = 368 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,滩段比降为0.623‰,航槽流速1.5~2.0 m/s,水流平顺,流态良好,通航水流条件较好。新滩挖槽疏浚后对下滩水流条件影响不大。方案4整治效果总体上好于方案2,但工程量增加较大。从航道条件改善,船舶航行安全的角度,确定方案4作为下滩河段的推荐整治方案。

4 结语

对兼具“浅、急、弯、险”特点的复合型滩险整治的关键在于调整滩段比降、减缓流速、改善河道水流条件。通过物理模型试验研究分析可知:

- 1) 下滩槽窄水浅,采取炸礁疏浚航槽满足航道尺度要求是必要的。
- 2) 在下滩下段修筑丁坝+丁顺坝调整水流,有利于削弱扫弯水势、提高下行船舶的安全度。
- 3) 滩尾右岸凸嘴位于弯道凹岸顶点附近,对控制滩型滩势至关重要,不宜切除。
- 4) 急流滩下修建潜坝,受坝顶水深的限制,水位壅高不多,滩段流速、比降改善不大,反而造成流态恶化。
- 5) 适当加大炸礁范围、炸礁深度,对减小滩段流速、比降,改善航行条件十分有利。尽管上段水位降落给上游河段带来不利影响,但整治

效果最佳。

参考文献:

- [1] 四川省交通运输厅交通勘察设计研究院. 黄河宁夏中卫市南长滩至沙坡头段航运建设工程初步设计[R]. 成都: 四川省交通运输厅交通勘察设计研究院, 2012.
- [2] GB 50139—2004 内河通航标准[S].
- [3] 李顺超, 刘晓帆. 金沙江(水富至宜宾)航道整治工程设计最低通航水位的推求[J]. 水道港口, 2010, 31(5): 483-487.
- [4] 周冠伦, 荣天富, 刘书伦, 等. 航道工程手册[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004: 361-362.
- [5] JTJ 312—2003 航道整治工程技术规范[S].
- [6] 重庆西南水运工程科学研究所. 黄河宁夏中卫市南长滩至沙坡头段航运建设工程下滩河段航道整治模型试验研究报告[R]. 重庆: 重庆西南水运工程科学研究所, 2012.

(本文编辑 郭雪珍)

(上接第 132 页)

4 结语

- 1) “航运中心”这个词在实践中的意义已经扩大,其形成需要 5 个基本要素,可以分为 3 种模式和 2 大类,基于此长江上游航运中心需要重新定位。
- 2) 运用 SWOT 分析模型对重庆航运中心发展的分析结果表明,重庆的优势、劣势、机遇和挑战并存,但是重庆的优势明显,机遇突出,应采用 SO 策略。
- 3) 长江上游航运中心应抓住战略机遇,充分发挥自身优势,进一步加强和完善硬软件设施的建设,通过开发“无水港”、加强港口合作、发展综合运输、建立航运物流信息平台等措施快速发展。

参考文献:

- [1] 田小勇. 航运中心自身能力涌现研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013.

- [2] 王杰. 国际航运中心形成与发展的若干理论研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2007.
- [3] 唐兵, 刘建国, 岳顺. 长江上游航运中心概念和功能定位[J]. 水运工程, 2009(11): 113-115.
- [4] 李上康. 重庆国际航运中心建设的现状分析与方案设计[J]. 港口经济, 2010(9): 18-20.
- [5] 李绪斌. 深化机构改革过渡参照管理——试析港航管理机构参照公务员法管理的可行性[J]. 中国港口, 2009(3): 42-43.
- [6] 王学军, 陈莹, 秦磊. 基于 SWOT 分析的重庆港发展策略[J]. 水运工程, 2011(3): 59-62.
- [7] 伍文俊, 余新明. 三峡水库运行后库区航道条件变化及趋势[J]. 武汉理工大学学报: 工学版, 2010, 43(3): 343-347.
- [8] 袁象. 上海自贸区为我国航运业带来的机遇与挑战[J]. 交通企业管理, 2013(12): 7-8.
- [9] 李志, 周愉峰. 重庆内河航运物流发展的战略选择研究[J]. 中国流通经济, 2010, 24(1): 29-32.

(本文编辑 郭雪珍)