



苏南运河船行波现场观测及物理模型试验研究

何超勇¹, 琚烈红², 冯卫兵¹

(1. 河海大学, 江苏 南京 210098; 2. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210024)

摘要: 对现场观测的苏南运河镇江段船行波相关资料采用物理模型试验进行了验证, 并分析比较了500 t和1000 t货船在不同载重、不同航行线路情况下在直立岸壁附近产生的船行波最大波高与航行速度的关系, 相关数据可供设计参考。

关键词: 苏南运河; 船行波; 现场观测; 模型试验

中图分类号: U 661.32

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2012)08-0130-06

Field observation and model test on ship waves of Sunan canal

HE Chao-yong¹, JU Lie-hong², FENG Wei-bing¹

(1. Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: This paper adopts physical model to verify the situ observation data of ship waves of Zhenjiang segment in Sunan canal. The relationship of the maximum ship waves' height nearby the vertical bank protection and the ship's speed is also discussed in some different situations. These situations include the different loads and navigation lines of 500 and 1 000 ton ships. The data and conclusion may serve as a reference for the design of bank protection.

Key words: Sunan canal; ship wave; field observation; model test

船行波是船舶航行时对水体产生的压力使水体产生波动的现象。船行波的基本要素是波峰尖点处的最大波高值、扩散波波周期和波浪传播角。美国的Sorensen和Weggel、荷兰的Verhey和Pilarczyk以及国际航运协会常设技术委员会(PIANC)等都对船行波做过深入研究和总结^[1]。

设计河岸护坡工程, 必须计算岸坡处船行波要素, 它的大小取决于运河尺寸和船舶船型、吃水深度、航行速度和航行方向及其行迹。船行波在岸壁附近产生的波高对护岸形式的选择和顶高程确定都有重要的参考意义。苏南运河中大多采用直立式护岸结构, 因此, 获取不同运营船型

的船行波资料对护岸顶高程的确定以及判断船舶泊稳都有重要作用。本文选取了苏南运河镇江段作为实测资料的观测点, 获取了苏南运河中500 t和1 000 t货船以及航政艇在不同载重情况下在岸壁前最大波高的资料, 并通过物理模型试验对两种货船船行波在直立式岸壁附近产生的最大波高进行了比较分析。

1 船行波现场观测

1.1 观测条件

观测地点为苏南运河镇江段航道, 该航道岸线间水面宽90 m, 观测时水位2.3 m, 观测点处的运河断面见图1。

收稿日期: 2012-02-21

作者简介: 何超勇(1985—), 男, 硕士, 主要从事波浪与建筑物相互作用研究。

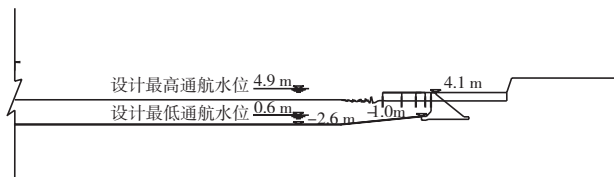


图1 苏南运河镇江段观测断面

1.2 现场观测船型

苏南运河镇江段主要运营船型为500吨级和1 000吨级两种, 船型尺寸见表1。

表1 苏南运河镇江段现场观测船型

船型	长/m	宽/m	满载吃水/m
500吨级货船	46	8.7	2.05
1000吨级货船	57	9.8	2.80

1.3 测量仪器及波高仪布置

现场波高测量采用北京水利水电科学研究院

研制的DJ800xp监测系统, 观测波高仪10套, 分2排布置, 两排间距2.0 m, 波高仪断面布置见图2。船只与岸线距离采用Bushnell Sport 450型红外测距仪进行测量。

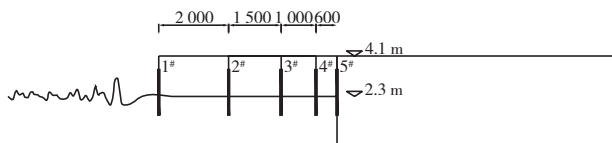


图2 现场波高仪布置

1.4 测量方法及结果

现场观测时, 首先测量单条货船以中速和全速通过观测点时护岸前船行波波高, 然后观测航政艇通过观测点时的船行波波高, 最后测量正常通航状态下运河内的船行波波高。测量结果见表2~4。

表2 单条货船现场观测波高

船型	离岸距离/m	平均速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	最大波高 $H_{\max}/\text{m}$					周期/s
			1#	2#	3#	4#	5#	
500吨级空载	25	4.0	0.47	0.40	0.58	0.52	0.68	2.58
500吨级空载	30	3.0	0.27	0.19	0.26	0.30	0.34	1.88
500吨级重载	23	2.0	0.29	0.23	0.24	0.24	0.30	1.49
500吨级重载	26	3.5	0.43	0.29	0.47	0.48	0.51	2.77
1000吨级空载	25	4.1	0.52	0.49	0.47	0.61	0.71	2.54
1000吨级空载	28	3.1	0.28	0.18	0.23	0.33	0.35	1.88
1000吨级重载	27	1.9	0.25	0.21	0.23	0.25	0.32	1.37
1000吨级重载	36	3.5	0.37	0.24	0.27	0.38	0.48	1.95

表3 航政艇现场观测波高

船型	离岸距离/m	平均速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	最大波高 $H_{\max}/\text{m}$					周期/s
			1#	2#	3#	4#	5#	
航政艇	15	4.0	0.65	0.60	0.67	0.64	0.71	2.85
航政艇	15	4.6	0.89	1.01	1.11	1.14	1.27	3.02
航政艇	15	5.3	0.84	0.53	1.11	1.61	1.73	3.60
航政艇	17	3.8	0.35	0.41	0.46	0.50	0.57	2.00

表4 正常通航情况下观测波高

装载情况	最大波高 $H_{\max}/\text{m}$					周期/s
	1#	2#	3#	4#	5#	
满载情况1	0.33	0.28	0.25	0.29	0.34	1.36
满载情况2	0.54	0.54	0.68	0.70	0.72	1.52
满载情况3	0.32	0.26	0.33	0.40	0.44	1.88
满载情况4	0.32	0.31	0.27	0.35	0.38	1.72
空载情况1	0.32	0.24	0.25	0.31	0.43	1.54
空载情况2	0.27	0.26	0.22	0.29	0.36	2.00
空载情况3	0.31	0.27	0.36	0.33	0.47	1.60
空载情况4	0.50	0.55	0.68	0.73	0.84	2.64

由表2可见, 500吨级货船空载时近岸测点的最大波高为0.68 m, 500吨级货船重载时近岸测点的最大波高为0.51 m, 1 000吨级货船空载时近岸测点的最大波高为0.71 m, 1 000 t货船重载时近岸测点的最大波高为0.48 m。由表3可以看出, 航政艇产生的船行波在近岸测点的最大波高为1.73 m, 远远大于货船船行波在近岸测点的最大波高值。

由表4可见, 在航道无管制正常通航情况下, 岸壁处船行波的最大波高值跨度较大, 最小为0.34 m, 最大为0.84 m, 其最大值大于表2中单条货船通航时岸壁处船行波的最大波高值0.71 m, 这是由于在正常通航情况下, 航道内船舶航行情况比较复杂, 船行波之间会产生反射、叠加等现象, 造成航道内波高大小不稳定, 岸壁附近最大船行波波高值可能大于或者小于单条货船航行时的情况。

2 船行波物理模型试验

2.1 仪器设备

船行波物理模型试验在南京水利科学研究院海岸试验厅试验水槽中进行, 试验水槽长50 m, 宽6.0 m, 高0.8 m, 模型布置见图3。其中, 设有直立式岸壁的模型段长20 m, 位于水槽中间部分, 水槽两端为试验船模的加速和减速区域。

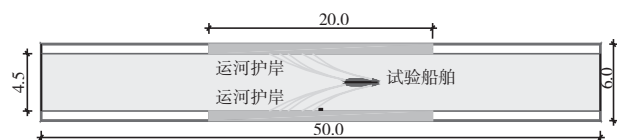


图3 模型布置

波高测量采用电容式波高仪, 由DJ800多功能自动采集系统采集, 最终由计算机形成数据文件。船舶速度轨迹测量采用粒子跟踪成像系统。通过在水槽上方加设多个摄像头, 连续周期性拍摄船舶运动的瞬时过程, 再通过成像分析软件计算船舶不同时刻的实时运动速度, 见图4。

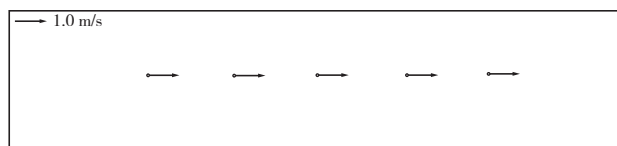


图4 粒子成像系统分析得出船舶航线速度及轨迹

2.2 船舶模拟

试验船舶采用自航船, 依据现场实际航行船

型进行制作, 1 000吨级货船长 $\times$ 宽 $\times$ 吃水为57 m $\times$ 9.8 m $\times$ 2.8 m, 500吨级货船长 $\times$ 宽 $\times$ 吃水为46 m $\times$ 8.7 m $\times$ 2.05 m, 船模模型比尺1:20; 船模最大航行速度为2.5 m/s (相当于原型11.8 m/s)。

2.3 试验方法

根据现场航道形式制作试验航道断面, 并布置护岸结构。在航道两端设置船舶加速段和减速段, 并布置消浪结构。通过遥控船舶自动航行, 控制船舶航线及航速。

试验时, 先在试验段前将模型船加速达到一定速度并稳定后, 再匀速驶入模型试验段, 利用粒子成像分析系统对船舶速度进行测量, 并采用人工测量的办法进行验证。当船舶航线通过观测点时, 利用DJ800多功能测量系统测量各测点的波面运动。

试验中波高仪布置见图5。测量时在航道中沿航道断面布置3排波高仪(1 $^{\#}$ ~15 $^{\#}$), 每排不等距布置5根波高仪同步测量航道内15个位置处的船行波波面运动; 另外在河道断面上还布置4根波高仪(16 $^{\#}$ ~19 $^{\#}$), 同步测量在护岸结构前的波面运动。

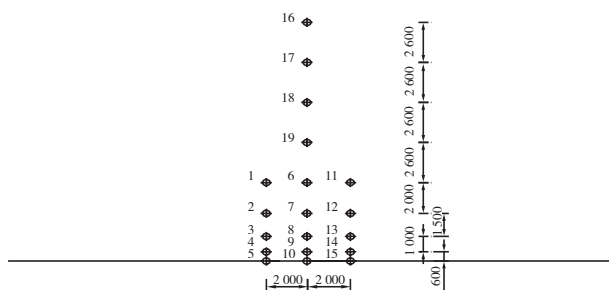


图5 波高仪布置

3 船行波验证试验结果

船行波验证试验航道原型宽度为90 m, 试验护岸模拟的是苏南运河镇江段普遍采用的直立式不透水护岸。其中, 船舶沿航道中线航行即在运河中间航行, 边线航行即沿运河边坡与运河底部接触线航行。

3.1 波面过程验证结果

图6是在速度和离岸距离相近条件下, 实验室测得的护岸前沿典型的波面过程与现场实测的波面过程对比。可以发现, 无论是实验室还是现场观测, 船舶航行时产生的船行波都有两个明显的大波过程, 总体上波形相近。

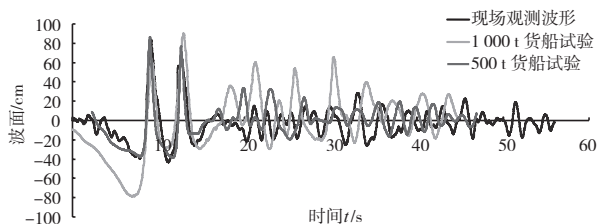


图6 现场观测波面过程和试验波面过程对比

3.2 波高与船速关系现场与实验对比验证

图7~10是1 000 t和500 t货船沿不同航线航行时的岸壁处船行波波高-航速关系,可以看出,船行波波高正比于船舶的航行速度,实测数据点均落在试验数据曲线中间,较好反映了现场货船离岸距离不固定,但都航行于中线和边线之间的实际情况。同时,比较图7和图9曲线,图8和图10曲线,重载情况下1 000 t和500 t船舶在船速达到3.5 m/s和4 m/s后,船行波波高增大幅度比空载时大得多。

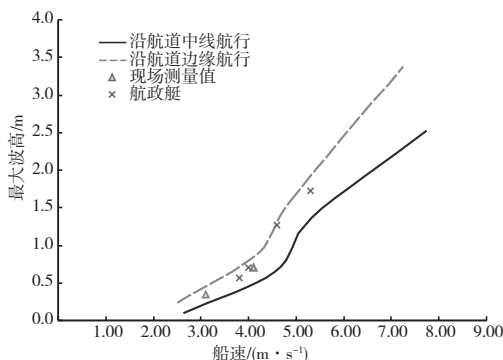


图7 1 000 t船空载试验与实测对比

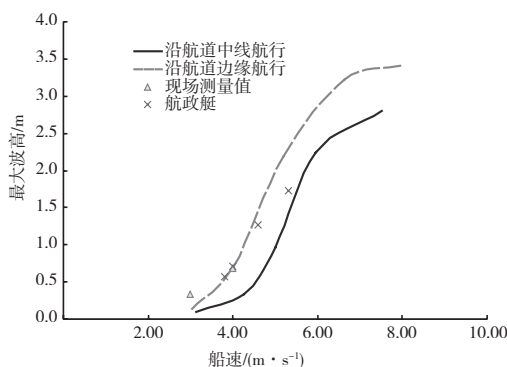


图8 500 t船空载试验与实测对比

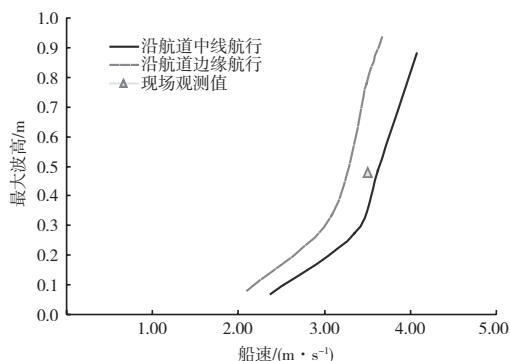


图9 1 000 t船重载试验与实测对比

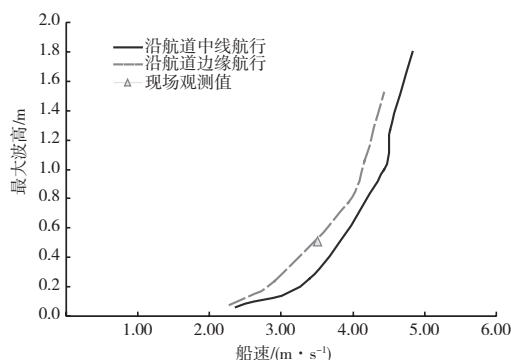


图10 500 t船重载试验与实测对比

3.3 船行波波高船速关系试验结果

现场观测和实验结果验证后,可以比较不同船型、不同离岸距离、不同载重情况下船行波的波高-船速关系曲线。

从图11可以看出,当船舶空载航行时,500 t货船在低速时的船行波波高小于1 000 t货船,而在高速时要大于1 000吨级货船,其船行波波高随速度增加的幅度略快一些;产生这种现象的原因是在船速达到6 m/s时,1 000 t货船达到其临界流速,随着流速的增加,船行波波高有减小的趋势^[2]。由图12可见,当船舶重载航行时,相同速度情况下,1 000吨级货船产生的船行波在岸壁附近的波高值要比500 t略大,这是因为船行波产生的波高与船舶的尺寸有关,原苏联学者包瑞奇^[3]关于船行波波高的计算公式:

$$H_m = \frac{v^2}{2g} \left(0.65 + 3.2 \frac{BT_c}{B_0 d} \right)^2 \left[1 + \sqrt{0.73 \frac{L}{B_c}} - 0.027 \left(1 + \sqrt{0.73 \frac{L}{B_c}} \sqrt{1.37 B_c - L} \right) \right] \quad (1)$$

式中: L 为船长; B 为船舶中剖面的船宽; B_c 为水面宽度;当船舶沿航道中轴线航行时 B_0 为河宽,否则为距离计算岸线距离的2倍; T_c 为船舶吃水; v

为船速, $v=10\sim 20$ km/h; g 为重力加速度; d 为水深。在本试验中,船速 v 相同,水面宽度 B_c 不变,虽然1 000吨级货船 L 大于500吨级货船,但是重载

时1 000吨级货船船舶中剖面的船宽 B 和吃水 T_c 比500吨级货船都要大,在这两个因素共同影响下,1 000吨级货船产生的船行波在岸壁附近的波高值要比500 t要大。

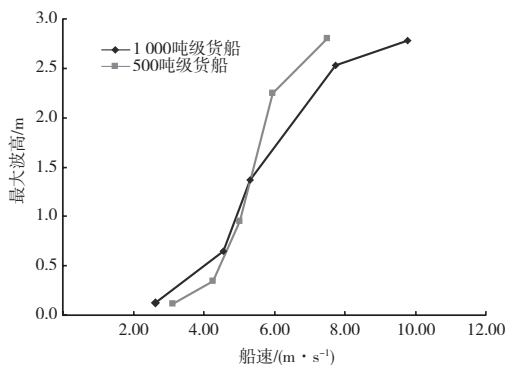


图11 货船空载沿航道中线航行

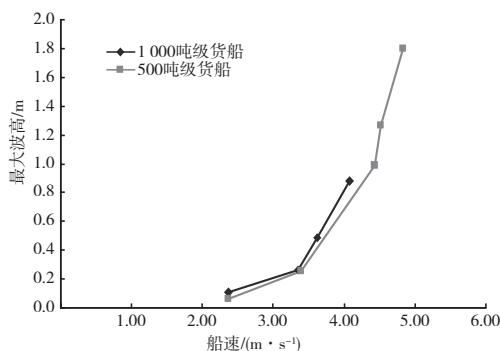


图12 货船重载沿中线航行

从图13和图14可以看出,无论是1000吨级货船还是500吨级货船,当沿航道边线航行时船行波在岸壁附近形成的波高都比沿航道中线航行时船行波形成的波高要大。荷兰delft水工试验研究所Blaauw^[4]和Verhey提出了以下波高计算公式

$$H_m = \alpha_1 d (s/d)^{-0.33} [v/(gd)^{0.5}]^{2.67} \quad (2)$$

式中: s 为波高计算点距离船舷的距离; v 为船速; g 重力加速度; d 为水深; α_1 为与船型有关的系数。从式(2)可以看出,船舶离岸距离 s 越小,波高 H_m 值越大。本试验中船舶沿航道边线航行时离岸距离 s 比沿中线航行时小,在船速 v 和水深 d 相同的情况下,在岸壁附近形成的波高值比沿中线航行时波高值要大。

从图15和图16可以看出,当船舶重载航行时,由于船舶吃水和排水都增大,相同速度下,

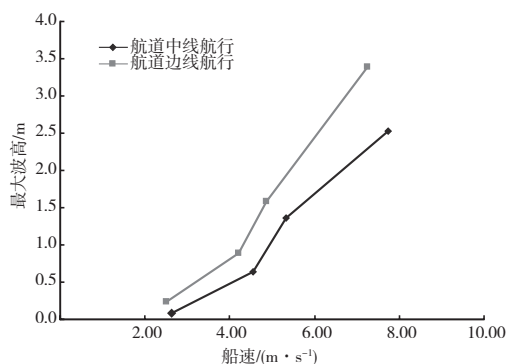


图13 1 000 t货船不同离岸距离波高比较

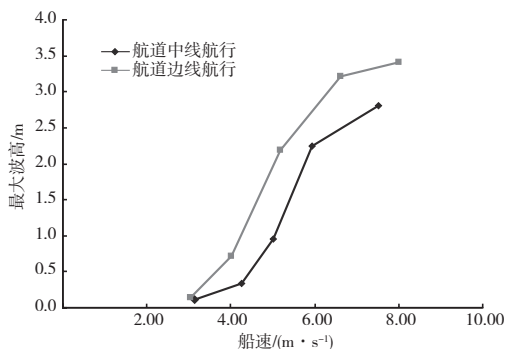


图14 500 t货船不同离岸距离波高比较

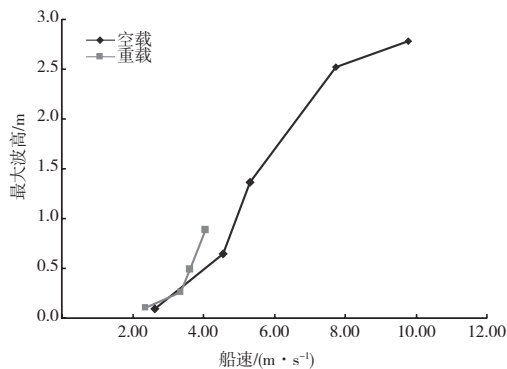


图15 1 000 t货船不同载重情况波高比较

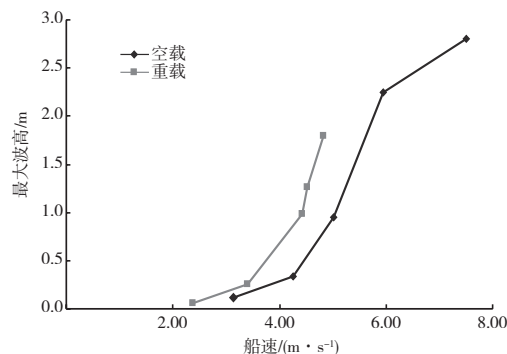


图16 500 t货船不同载重情况波高比较

重载在岸壁处产生的船行波波高以及波高随速度增加幅度都要比空载时大。但是重载情况下,受

船舶动力限制,船舶航行的速度比空载时小。船舶产生船行波的大小与速度关系最为密切,当船舶航行速度低于2.0 m/s时,产生的船行波波高很小,但当空载航行速度超过4.0 m/s或重载航行速度超过3.5 m/s时,船行波波高随速度增加非常明显,这是因为船舶航行过程中存在临界航速 $v = \sqrt{gd}$ ^[5],当航速接近临界航速时,船行波波高增大明显;当船速达到临界航速时,船行波大小会趋于稳定;随船舶速度的继续增大,船行波波高将会减小。而依据项萼等^[2]的研究成果,实际临界速度略大于理论值,并与水深和吃水深度等相关因素有关。

4 结论

1) 根据现场观测可知,在苏南运河镇江段,1 000 t货船空载时船行波在岸壁附近产生的最大波高为0.71 m,满载时为0.48 m;500 t货船在空载时船行波在岸壁附近产生的最大波高为0.68 m,满载时为0.51 m;航政艇船行波在岸壁处产生的船行波波高最大可达1.71 m。在正常通航情况下,苏南运河镇江段船行波在岸壁附近产生波高范围是0.34~0.84 m。

2) 由模型试验验证可见,1 000 t和500 t货

船以及航政艇现场观测数据和试验验证结果符合良好。

3) 一般情况下,相同航速时1 000 t货船船行波在岸壁附近产生的最大波高大于500 t货船。

4) 1 000 t和500 t货船在航道边线航行时在岸壁处产生的船行波波高要大于在中线航行。

5) 相同航速条件下,1 000 t和500 t船舶重载时船行波在岸壁附近产生的最大波高要大于空载。

参考文献:

- [1] 周家宝,陈文辽.船行波与护坡工程的综述[J].江苏交通工程,1996(1):28-33.
- [2] 项萼,石根娣.天然航道船行波计算方法[J].河海大学学报,1994(2):45-50.
- [3] 王水田.关于船行波问题的研究[J].水道港口,1980(1):21-37.
- [4] Robert M sorenson .Port and channel bank protection from ship waves[R].Boston Massachusetts:American Society of Civil Engineers,1989:393-400.
- [5] 潘宝雄,蒋宗燕.船行波问题的研究综述[J].河港工程,2001(1):14-19.

(本文编辑 武亚庆)

~~~~~

(上接第129页)

长江中下游采砂一般安排在枯水期,本文通过航道整治与采砂方案的研究,提出了采砂方案动态设计的思路,且在施工期本着动态管理的原则,根据当时工程区域地形变化情况,通过物理模型试验,预测河道变化趋势,及时调整工程实施内容,细化施工组织设计,确保了整治工程效益的发挥,科学合理地将航道整治工程措施与采砂疏浚航道有机地结合起来。整治工程实施后,该水道河床经过一到两年的调整,滩槽形势渐趋稳定,北槽淤积,南槽冲刷发展,与模型试验预期结果基本相同,枯水航道条件一直较好,开创了航道整治与采砂互利双赢的良好局面,有利于促

进社会和谐和经济的发展,使无序的采砂活动走上有序的、可持续发展的轨道,为其它河流或河段航道整治提供借鉴。

#### 参考文献:

- [1] 黄召彪.长江中游武穴水道航道整治工程工程可行性研究报告[R].武汉:长江航道规划设计研究院,2004.
- [2] 钱宁,万兆惠.泥沙运动力学[M].北京:科学出版社,1983.
- [3] 谢鉴衡,丁君松,王运辉.河床演变及整治[M].北京:水利水电出版社,1990.
- [4] 谢鉴衡.河流模拟[M].北京:水利水电出版社,1990.

(本文编辑 郭雪珍)