八卦洲汊道改善分流比工程措施研究

戴文鸿^{1,2,3}、吴书鑫²、张 云⁴、唐洪武^{1,2,3}

(1. 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学 水利水电学院, 江苏 南 京 210098; 3. 河海大学 水资源高效利用与工程安全国家工程研究中心, 江苏 南京 210098; 4. 上海市水利工程设计研究院有限公司, 上海 200061)

摘要:自 20 世纪 30 年代开始,因上游河势的变化,南京八卦洲汊道左汊逐渐从主汊演变成支汊.近年来,随着 来水来沙条件的改变,左汊衰退速率又有所加快,并已多次观测到 12% 左右的分流比.为此,迫切需要采取工程 措施,遏制八卦洲左汊缓慢衰退的趋势.针对选用的组合工程措施,运用物理模型试验、MIKE21 等水动力数学 模型研究手段,对八卦洲水位、流速、左右两汊分流比进行了数值模拟,并主要分析了导流坝、切滩、疏浚及其组 合工程措施对分流比的改善.结果表明:导流堤的分流效果较好,组合工程措施最大可增加左汊分流比4.76%. 通过与物理模型试验结果的比较,为整治工程的实施提供相应的理论依据,并为工程进一步改善提出了建议.

关 键 词:八卦洲;整治工程;分流比;数学模型 中图分类号:TV147 文献标志码:A 文章编号:1009-640X(2013)06-0001-07

分汊河道是冲积平原河流中比较常见的河型.稳定的分流口有利于控制河势演变、防止盐水倒灌、保护 生物物种、保持水质和湿地等资源^[1].分汊河段的稳定与其分流特性息息相关,一般来说流量、水深、糙率等 因素均与分流比有关^[2].以分流角为依据考虑分汊河道分流特性,严以新等^[3-4]作了理论分析和大量物理模 型试验,取得了很多理论成果和应用成果.徐剑秋等^[5]认为藕池口分流量减小是水力半径、汊道比降、汊道 糙率等因素在分流洪道与长江干流之间相对变化的结果.彭玉明等^[6]探讨了汊道的形成、变化原因,并提出 了汊道分流的简易算法.杨胜发^[7]认为副汊、主汊的过水面积比对分流比的影响很大.陈界仁等^[8]通过二维 数值模拟计算指出长江南京河段八卦洲汊道分流比变化不仅受汊道本身阻力影响,还与进口水流条件有关, 其影响比较复杂.

1 研究河段概况

八卦洲汊道上起下关、下至西坝,为鹅头型双分汊河道,主泓长约 18 km,八卦洲处最大河宽约 10.0 km (包含八卦洲).八卦洲洲体长约 10.1 km,最大宽度约 7.5 km,洲堤保护面积约 57.6 km².20 世纪 70 年代以前,八卦洲汊道处于自然演变状态,在水流的冲刷下,洲头大幅后退,北岸岸坡多处发生坍塌,八卦洲汊道逐渐形成向北弯曲的鹅头型双分汊河道.由于八卦洲汊道已经形成鹅头型汊道,左汊河道沿程阻力远大于右汊,左汊总体仍然呈缓慢淤积、萎缩态势.近年来,左汊衰退速率又有所加快,左汊已多次观测到 12% 左右的分流比.

收稿日期: 2013-05-27

基金项目: 江苏省自然科学基金(基础研究计划)面上项目"变化环境条件下河弯特性及河流演变的响应机理" (No. BK2012808);中央高校基本科研业务费专项基金资助项目"冲积河湾弯曲演变的机理与模拟研究" (No. 2009B02214);江苏高校优势学科建设工程资助项目(YS11001)

作者简介:戴文鸿(1966-),男,江苏泰州人,教授,博士,主要从事河流动力学及河流演变等方面研究. E-mail: wdai@ hhu. edu. cn

八卦洲汊道在演变的过程中总体趋势是缓慢的右兴左衰.反映这种变化趋势的一个主要指标就是分流 比的变化.自1957年开始对八卦洲汊道进行分流分沙测验,至2011年9月累计达80次.1957年,左汊汛期 和枯期实测分流比分别为26.0%和22.0%,到20世纪80年代中期实施八卦洲头分水鱼咀工程前,汛枯期 分流比分别降到19.5%和16.0%左右,年均降幅约为0.22%.分水鱼咀工程实施后,左汊分流比减小的趋势 有所减缓,到2003年三峡水库蓄水前,汛枯期分流比分别为17.0%和13.9%左右,年均降幅约为0.13%. 2003年以来的近期分流比测验资料表明,汛期分流比维持在15%~19%之间,分流比减小的趋势已趋稳定. 而枯季分流比的变化范围在12.0%~14.8%之间,平均分流比为13.27%,2003年以来仍有年均0.15%的 降幅.结合1985年以来的分流比测验资料及水下地形资料分析,八卦洲头分水鱼咀工程对延缓八卦洲左汊 的衰退,稳定八卦洲汊道河势起到了重要的作用.同时也表明,虽然左汊分流比减小有所改善和减缓,但分流 比减小的趋势依然存在,特别是在低水位情况下.

2 数学模型

本文选用商用软件 MIKE21^[9]建立平面二维水流模型. MIKE21 是丹麦水力研究所(简称 DHI)开发的系列水动力学软件之一,在平面二维自由表面数值模拟方面具有强大的功能^[10].

2.1 控制方程

对于水平尺度远大于垂直尺度的情况,水深、流速等水力参数沿垂直方向的变化较之沿水平方向的变化 要小得多,从而可将三维流动的控制方程沿水深积分,并取水深平均,得到沿水深平均的二维浅水流动质量 和动量守恒控制方程组.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = \frac{\partial h}{\partial t} \tag{1}$$

X方向动量方程:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p^2}{H}\right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{pq}{H}\right) + gH \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{gp\sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 H^2} - \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial}{\partial x} (H\tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (H\tau_{xy})\right] - fq - \frac{f_w}{W/W_x} = 0$$
(2)

Y方向动量方程:

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q^2}{H}\right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{pq}{H}\right) + gH \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{gq\sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 H^2} - \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial}{\partial y} (H\tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial x} (H\tau_{xy})\right] - fq - \frac{f_w}{W/W_y} = 0$$
(3)

式中:H为自由水面到河底深度; ζ 为水位;h为水深; $H = h + \zeta$;p,q分别为x,y方向上的流量通量;C为谢才 系数;g为重力加速度;f为科氏力系数; ρ 为水的密度; W,W_x,W_y 为风速及在x,y方向上的分量; f_w 为风阻力系 数; $\tau_{xx},\tau_{xy},\tau_{yy}$ 为有效剪切力分量.

2.2 模型验证

模型进口段位于四号码头,出口段位于港池,具体示意见图 1. 水文验证资料采用 2011 年 5 月和 9 月分

别测得的枯水、中水数据.其中枯水流量15 290 m³/s,中水流量27 310 m³/s.本次模型计算采用恒定流条件,上游边界给定流量,下游边界给定水位,初始时刻,取全局流速为0,水位为常数.经数值模拟多次率定各河段的糙率如下:上游0.017~0.025,左汊0.017~0.025,右汊0.025~0.030,下游0.020~0.025.分流比验证、水位验证以及流速验证见表1和2以及图2,可知水位误差在0.05 m以内,个别断面在0.07 m以内,分流比相对误差在5%以内,流速误差在0.1 m/s 以内.故计算误差基本在有效范围内,可应用于模拟实际工程.



Fig. 1 Schematic drawing of Baguazhou

		Ę	表1 分流比验证			
		Tab. 1 V	erification by diver	sion ratio		
~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~			分流	比/%		
(加里/		左 汊			右 汊	
$(\mathbf{m}^{\mathbf{s}} \cdot \mathbf{s}^{\mathbf{s}})$	原型	模型	差值	原型	模型	差值
15 290	12.40	12.36	0.04	87.60	87.64	-0.04
27 310	13.57	13.39	0.18	86.43	86.61	-0.18

Tab. 2	Verification	by	water	level

	 水位/ m					
测站	$Q = 15 \ 290 \ m^3/s$		$Q = 27 310 \text{ m}^3/\text{s}$			
	实 测	计 算	误差	实 测	计 算	误差
四号码头	1.780	1.763	0.017	4.011	4.024	-0.013
燕子矶	1.723	1.710	0.013	3.928	3.922	0.006
黄家圩	1.763	1.733	0.030	3.987	3.984	0.003
二桥下	1.679	1.667	0.012	3.867	3.845	0.012
南化	1.670	1.697	-0.027	3.843	3.902	-0.059
通江集	1.610	1.660	-0.050	3.837	3.848	-0.011
港池	1.648	1.644	0.004	3.781	3.781	0.000





### 3 整治工程措施数值模拟计算及分析

#### 3.1 单项工程措施模拟计算

八卦洲左汊衰退的原因主要归结于左汊入流条件、过水面积、阻力系数和左汊出流条件,据此就以下单项整治工程措施进行模拟(见表3).

Tab. 3 Individual engineering treatments and their implementation effe	ects
------------------------------------------------------------------------	------

丁担世族	- エロナ 巫[12]	工程措施	左汊分流比增加/%		
上性頂爬	二.作11 <u>目</u> 。	模拟编号	$Q = 15 \ 290 \ \text{m}^3/\text{s}$	$Q = 27 \ 310 \ m^3 / s$	
洲头导流堤1-1	长度 550 m,方位角 215°	1-1	1.50	1.67	
洲头导流堤1-2	长度 550 m,方位角 225°	1-2	0.90	1.08	
洲头导流堤1-3	长度750 m,方位角215°	1-3	2.29	2.46	
洲头导流堤1-4	长度750 m,方位角225°	1 - 4	1.59	1.74	
黄家洲切滩2-1	疏挖至高程-10 m	2-1	0.73	0.75	
马汊河疏浚 2-2	疏挖至高程-10 m	2-2	0.19	0.27	
左汊出口拓卡 2-3	疏挖至高程-10 m	2-3	-0.01	0.36	
洲尾导流坝 3-1	宽度和形式与导流堤相同	3-1	1.29	1.96	

(1)导流堤工程措施:在八卦洲洲头原鱼嘴的基础上,往河道上游偏右的方向修建导流堤,坝头位置延伸至上游-20 m 槽处,越过洲头深槽水域,考虑到八卦洲头导流坝主要改善左汊低水期的入流条件,加上考虑整治工程应降低其负面影响,拟定坝顶高程为2 m(约为枯水期平均水位),坝顶宽1 m,边坡系数1.5.导流坝工程措施考虑了不同角度、不同长度的组合.

(2) 疏浚工程措施:在模型中通过修改地形的方式,将原 始地形中高于切滩工程措施高程的点修改为拟定高程 -10 m,分别对左汊进口、中部、出口3个区域进行开挖疏浚, 其开挖量分别为970万,350万和670万m³.

(3)洲尾导流坝工程措施:根据左汊出口沙脊线走向布 置洲尾导流坝,坝长 600 m.坝顶高程取为 2 m,宽度和形式 与导流堤工程措施相同.工程详细布置见图 3.



Fig. 3 Map of individual engineering treatments

计算结果(表3)表明,洲头导流堤工程,导流堤方位角越小,即堤线延伸方向向右偏转,分流比增加效果 越明显,导流堤向上延伸越长,效果越好.疏浚工程措施在左汊进口、中部、出口三个部位实施后,改善了左汊 的淤积情况,单个工程措施增加左汊分流比在1%以内.洲尾导流坝实施后,改善了左汊的出流条件,左汊出 流比工程前顺畅,中水流量下左汊分流比增加接近2%.

#### 3.2 组合工程措施模拟计算

基于各单项推荐工程,提出组合工程措施见表 4. 其中,各工程措施布置为:洲头导流堤的长度为 750 m, 方位角为 215°;黄家洲切滩、马汊河疏浚均开挖至-10 m 高程;洲尾导流坝坝长 600 m. 坝顶高程取 2 m,宽度 和形式与导流堤相同. 各组合工程措施实施后左汊分流比增加效果见表 4.

组合工程供选护具	左汊分流比增加/%		
组百二11111加洲 5 一	$Q = 15 \ 290 \ m^3/s$	$Q = 27 \ 310 \ m^3/s$	
4-1	3.38	3.33	
4-2	3.50	3.29	
4-3	2.47	2.80	
4-4	4.76	4.88	
	组合工程措施编号 — 4-1 4-2 4-3 4-4	组合工程措施编号 左汊分流日   Q=15 290 m³/s Q=15 290 m³/s   4-1 3.38   4-2 3.50   4-3 2.47   4-4 4.76	

表 4 组合工程措施及其实施效果 Tab.4 Combined engineering treatments and their implementation effects

组合工程措施 4-4 前后流场分析表明,枯水流量下,洲头导流堤使左右汊分流点上提,且对其附近及右 汊下游 2 000 m 范围的流场产生明显影响(见图 4).导流堤实施后,洲头导流堤上游流速和水位的大小均呈 现左侧增大,右侧减小的趋势;右汊进口断面左侧流速明显减小,右侧流速有所增大;马汊河疏浚工程使得左

汊入流增强、右汊水流减弱的总体态势继续扩大,有利于增强左汊的水流动力.

洲尾坝工程可有效解决右汊较强水流对左汊出流的顶托问题,从而增大左汊出流断面的流速.洲尾坝工程的实施,对八卦洲上游分流段水位影响很小,仅使汇合处附近的下游平均水位降低了0.022 m 左右,增大了左汊出流段的水面比降,利于左汊出流;工程对右汊过流断面有一定的压缩,右汊出口处平均水位增加0.020 m左右.工程前后洲尾流场变化见图5.从图5可见汊道下游左侧的流速由于左汊出流的右偏而明显减小,枯水时的主流位置向河道中部右移,从汊道出口区域流场变化可以看出,断面最大流速位置右移,可能会对下游河势带来一定的不利影响.



Fig. 4 Flow fields of the entrance before and after regulation works



Fig. 5 Flow fields of the exit before and after regulation works

#### 3.3 与物理模型的比较

物理模型试验中,采用长江勘测规划设计研究院模拟试验方案,洲头导流堤形式为:长度750 m,方位角 215°. 导流堤顶宽5m,左侧(上游)坡比1:3、右侧(下游)坡比1:4,顶面高程分段考虑:导流堤根部高程 5 m, 自坝根向上游 100 m 顶面高程为 5 m, 然后按 1:100 放坡至 4 m, 维持 4 m 顶面高程至坝头(平台长约 350 m);坝头平面形态为半圆弧,圆弧边缘按1:5 放坡与河床衔接.导流堤实施后,左汊分流比均有一定增 大,在15 290 m³/s时,洲头导流堤使左汊分流比分别增加了2.72%^[11-12].

在数值模拟中,长度550m,方位角215°的洲头导流堤使左汊分流比增加2.29%.相同工程措施布置下, 物理模型中洲头导流堤效果优于数值模拟结果,这可能是由于物理模型优化了导流堤形状,减小了局部阻 力,而数学模型采用的是标准堰,与物理模型的优化工程措施相比,对于水流的局部阻力较大.物理模型中关 于洲头导流堤的结论为:导流堤越向右摆,分流比增加效果越明显,导流堤向上延伸越长,效果越好;这与数 学模型结论一致.

物理模型试验中,黄家洲切滩布置为:挖除左汊进口处的水下沙埂(左汊进口-20m深槽断开的区域); 沿左汊进口段-20 m 槽左缘边线,向左侧拓宽-20 m 槽约100 m(-20 m 槽左缘边线以左100 m 的区域,河床 高程降低至-20 m), 疏浚线左缘按1:10 放坡与左侧河床衔接. 黄家洲小切滩工程措施在15 290 m³/s 时, 左汊分流比增大了0.75%.

数值模拟中,黄家洲切滩工程措施的切滩高程为-10 m,15 290 m³/s 流量下左汊分流比增加 0.73%,与 物理模型中切滩方案基本吻合.物模与数模组合工程措施的比较见表5.

	Tab. 3 Comparison between the mathematical	and physical models in low nov	w conditions
编号	组合工程措施	物模分流比增加值/%	数模分流比增加值/%
4-1	洲头导流堤+黄家洲切滩	2.69	3.38
4-2	洲头导流堤+黄家洲切滩+马汊河疏浚	3.57	3.50
4-3	洲尾坝+黄家洲切滩+马汊河疏浚	3.38	2.47
4-4	洲头导流堤+洲尾坝+黄家洲切滩+马汊河疏浚	4.96	4.76

表 5 枯水流量下数值模拟与物理模型的结果比较 . 1

1...

.1

### 4 结 语

针对改善八卦洲左汊分流比的各类工程措施,运用 MIKE21 软件建立了二维水流数学模型. 计算结果显示,各单项工程措施都能在一定程度上增大左汊分流比. 洲头导流堤可以改善入流条件,整治效果随着长度的增加而有所增强,且与角度有一定关联;切滩和疏浚改善了左汊进口和中部的淤积以及河床阻力;拓卡和洲尾导流堤可以改善出流条件,平顺水流. 组合工程措施效果更好,特别是洲头导流堤+洲尾坝+黄家洲切滩+马汊河疏浚,可以同时改善左汊进口条件、出口条件以及中部泄流能力,可使左汊内流速普遍增大,适当抑制右汊水动力. 对工程措施的进一步选择应该根据当地条件以及工程实际决定. 计算结果与河海大学泥沙实验室进行的同条件物理模型试验进行对比分析,吻合良好.

本文研究结果均是在定床河道模型的基础上得出的,但工程实施后,在新的水动力条件下水流与河床相 互作用将使上下游河段的河床自动调整,流场也会随之产生一定变化.后续研究将在动床水沙模型上通过水 沙冲淤过程进一步研究论证工程影响.

#### 参考文献:

- [1] 陈吉余,陈沈良.长江口生态环境变化及对河口治理的意见[J].水利水电技术,2003(1):19-25.(CHEN Ji-yu, CHEN Shen-liang. The changes of ecologic environment in Yangtze River Estuary and some suggestions for estuary regulation[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2003(1):19-25.(in Chinese))
- [2] 谢鉴衡. 河床演变及整治[M]. 北京: 水利水电出版社, 1997. (XIE Jian-heng. Fluvial process and remediation[M]. Beijing: China WaterPower Press, 1997. (in Chinese))
- [3] 严以新,高进,宋志尧,等. 长江口九段沙分流计算模式及工程应用[J]. 水利学报,2001(4):79-84. (YAN Yi-xin, GAO Jin, SONG Zhi-yao, et al. Calculation method for stream passing around the Jiuduan sandbank in the mouth of Yangtze River[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001(4):79-84. (in Chinese))
- [4] 严以新,高进,郑金海,等. 长江口南港泥沙运动的水动力条件[J]. 河海大学学报:自然科学版, 2002(5):1-6. (YAN Yi-xin, GAO Jin, ZHENG Jin-hai, et al. Hydrodynamic conditions for sediment movement in South Waterway of Yangtze River Estuary[J]. Journal of Hohai University(Natural Science), 2002(5):1-6. (in Chinese))
- [5] 徐剑秋,毛北平,梅军亚. 荆江藕池口分流比变化影响因素灰关联度分析[J]. 人民长江, 2006, 37(12): 120-122. (XU Jian-qiu, MAO Bei-ping, MEI Jun-ya. Factors affecting the diversion ratio and an analysis of their gray correlation in the Jingjiang Ouchi Port[J]. Yangtze River, 2006, 37(12): 120-122. (in Chinese))
- [6] 彭玉明, 阳立群,杨晓刚. 荆江汊道分流分沙变化及特性分析[J]. 人民长江, 2008, 39(14): 62-64. (PENG Yu-ming, YANG Li-qun, YANG Xiao-gang. An analysis of changes and their characteristics of sediment diversion in Jingjiang Inlet Channel [J]. Yangtze River, 2008, 39(14): 62-64. (in Chinese))
- [7] 杨胜发. 上游工程对分汊河道分流比的影响[J]. 重庆交通学院学报, 1993, 18(1): 93-98. (YANG Sheng-fa. Upper engineering effect on rate of flow rate in braided river[J]. Journal of Chongqing Jiaotong Institute, 1993, 18(1): 93-98. (in Chinese))
- [8] 陈界仁, 余雯. 码头桩群对八卦洲汊道分流比的影响研究[J]. 水运工程, 2012(3): 104-107. (CHEN Jie-ren, YU Wen. Influence of pile group on diversion ratio of Baguazhou branch[J]. Port & Waterway Engineering, 2012(3): 104-107. (in Chinese))
- [9] Danish Institute of Hydraulics. MIKE21 User-Guider [M]. Copenhagen: Danish Institute of Hydraulics, 2009.
- [10] 许婷. 丹麦 MIKE21 模型概述及应用实例[J]. 水利科技与经济, 2010, 16(8): 867-869. (XU Ting. Calculation principle and application example of a two-dimensional flow model-MIKE21 HD[J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy[J]. 2010, 16(8): 867-869. (in Chinese))
- [11] 肖洋, 唐立模, 戴文鸿. 八卦洲整治定床模型试验研究报告 V1(12-5)[R]. 南京: 河海大学, 2012. (XIAO Yang, TANG Li-mo, DAI Wen-hong. Report V1 for fixed bed model of Baguazhou regulation(12-5)[R]. Nanjing: Hohai University, 2012. (in Chinese))

[12] 侯卫国. 长江南京河段八卦洲汊道河道整治工程可行性研究定床数学模型计算专题报告[R]. 武汉:长江勘测规划设 计研究院, 2011. (HOU Wei-guo. Feasibility study report for mathematical model to calculate fixed bed on regulation measures to Nanjing Yangze River Baguazhou branch[R]. Wuhan: Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research, 2011. (in Chinese))

## Preliminary studies on improvement measures to the diversion ratio of Nanjing Baguazhou branch

DAI Wen-hong^{1,2,3}, WU Shu-xin², ZHANG Yun⁴, TANG Hong-wu^{1,2,3}

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing 210098, China;

2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. National Engineering Research Center of Water Resources Efficient Utilization and Engineering Safety, Hohai University, Nanjing 210098, China; 4. Shanghai Water Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200061, China)

**Abstract**: Due to changes in upstream conditions since 1930s, the left branch of Baguazhou inlet has been gradually evolving from the main river branch to the subsidiary channel. In recent years, since the variation of discharge and sediment concentration, the rate of decay of the left branch has accelerated again, with diversion ratios as low as 12% observed repeatedly. For this reason, engineering treatments are urgently required to curb the recessionary trend of the left branch. According to the engineering measures, a physical model and MIKE21 hydrodynamic numerical model are used to simulate the water level, flow rate, and diversion ratio of the Baguazhou inlet. The improvement effects on the diversion ratio of a diversion dam, cutting of the beach, dredging, several separate schemes and combined schemes are mainly analyzed. The analysis results show that the diversion effect of the diversion dam is quite good and combined regulation works can increase the left branch diversion ratio by as much as 4.76%. By comparison with the physical model, it provides a theoretical basis for the implementation of the regulation works.

Key words: Baguazhou branch; regulation works; diversion ratio; mathematical model