

苏敏, 姚鹏, 余志斌, 等. 河网型分汊河口分流比影响因素探究——以珠江蕉门口为例[J]. 海洋学报, 2023, 45(10): 147–158, doi:10.12284/hyxb2023143

Su Min, Yao Peng, Yu Zhibin, et al. Research on the effect factors of flow division ratio in river networks bifurcated estuary: A case of Jiaomen outlet, the Zhujiang River Delta[J]. Haiyang Xuebao, 2023, 45(10): 147–158, doi:10.12284/hyxb2023143

# 河网型分汊河口分流比影响因素探究 ——以珠江蕉门口为例

苏敏<sup>1,2,4</sup>, 姚鹏<sup>1,2,3</sup>, 余志斌<sup>1,2\*</sup>, 安欣禧<sup>2</sup>

(1. 河海大学水灾害防御全国重点实验室, 江苏南京 210098; 2. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏南京 210098; 3. 大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁大连 116024; 4. 华东师范大学河口海岸学国家重点实验室, 上海 200241)

**摘要:** 珠江蕉门口是典型的河网型分汊河口, 是珠江口重要的泄洪排沙通道, 其分流比变化对珠江三角洲地貌演变、防洪与航运等至关重要。本文基于蕉门近期地貌形态, 以鬼洲水道落潮分流比为研究对象, 设计系列水槽实验, 选取分汊河道断面形态与分汊角两个影响因素进行敏感性分析, 探究河网型分汊河口分流比随上述因子的演变规律。结果表明: 在分汊河道断面形态稳定的基础上, 鬼洲水道分流比与虎门、蕉门相对流速有较好的相关关系, 受两河口绝对流速的影响较小; 分流比与蕉门南水道水深呈负相关, 与鬼洲水道水深呈正相关; 分汊角在 30°~65°区间内, 分流比与分汊角呈负相关, 分汊角在 65°~75°时, 分流比与分汊角的正负相关关系在流速比  $V=0.7$  前后转换; 通过量化各变量敏感性, 分别得到鬼洲水道分流比增大或减小对上述因子的敏感性大小。研究成果可为蕉门整治工程提供参考依据。

**关键词:** 分汊河口; 分流比; 水槽实验; 敏感性分析; 蕉门鬼洲水道

中图分类号: TV122; P736.5

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2023)10-0147-12

## 1 引言

分汊河口是河流三角洲中常见的地貌结构, 其指上游径流在河口区通过两个或者多个口门入海, 我国主要入海河口中约有 37.5% 呈现出分汊特征<sup>[1-2]</sup>。根据河口汊道体系的拓扑学性质, 分汊河口可分为 4 种基本模式: 少汊型、多汊型、河网型和游荡型<sup>[3]</sup>。分汊河口的水沙运动特征与汊道演变规律受诸多因素综合作用, 分汊节点处微小的变动将改变上游径流与沉

积物的分配过程, 从而影响河口区地貌形态演变<sup>[2,4]</sup>。不同分汊模式河口的形成发育过程不尽相同, 如长江口是单一河流入海形成的分汊河口, 沙岛将河道分隔成三级分汊<sup>[5]</sup>, 其分汊模式属于少汊型。此类由单一河道分汊成两条或多条河道的分汊结构不仅存在于分汊河口, 还大量存在于平原河网中的分汊河道与引水工程中的分汊明渠<sup>[2,5]</sup>, 其相关研究通常根据河道分汊形成的特定形态进行简化, 采用物理模型和数学模型研究上游流量、河道形态、节点、水面坡降、泥

收稿日期: 2023-02-18; 修订日期: 2023-05-07。

**基金项目:** 国家重点研发计划项目(2022YFC3106201); 中央高校基本科研业务费项目(B230201046); 国家自然科学基金项目(51809296, 52071129); 大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室开放基金项目(LP2207); 河口海岸学国家重点实验室开放基金项目(SKLEC-KF202006); 江苏省“双创计划”项目。

**作者简介:** 苏敏(1986—), 女, 山东省菏泽市人, 副教授, 博士, 主要从事河口海岸动力地貌方面研究。E-mail: [sumin@hhu.edu.cn](mailto:sumin@hhu.edu.cn)

\* **通信作者:** 余志斌, 男, 主要从事河口海岸水动力环境方面研究。E-mail: [zyb\\_hhu@163.com](mailto:zyb_hhu@163.com)

沙分选性、水力糙率和分汊角(即分汊处下游两河道的夹角)等因素对水沙分配过程、局部水流结构和河道演变特征等内容<sup>[6-11]</sup>。对于分汊河口,除以上影响因素外,针对长江三角洲与 Mahakam 三角洲的研究表明:河口边界展宽、科氏力、潮汐振幅和水利工程可显著影响河口三角洲分汊格局演变过程和河口分汊河槽的稳定性<sup>[1,12-15]</sup>。结合上述研究,针对少汊型分汊河口的发育演变机制、分流比演变规律和影响因素等的认识较为全面。

河网型分汊河口是在独特的径潮动力条件作用下,由横向河道将两相邻河口连接而成的分汊河口,其分汊格局演变模式、分汊平面形态和水沙输运机制均与少汊型分汊河口不同<sup>[1,3,16-17]</sup>。珠江三角洲中蕉门为河网型分汊河口的研究典例之一。蕉门分汊河口在过去百余年间经历了由单一河道入海到分汊入海的演变过程,其发育出的横向鳧洲水道将蕉门水道与虎门水道相连(图 1),并逐渐由支汊发育成主汊<sup>[18]</sup>。针对蕉门分汊河口的研究主要集中于鳧洲水道泄流对伶仃洋沉积体系的水沙治导、虎门-狮子洋潮汐通道演变、珠江三角洲防洪体系和南沙港航深的影响等<sup>[19-22]</sup>,其核心问题是鳧洲水道的分流比与分沙比<sup>[23]</sup>,且多认为分流比与蕉门上游流量、蕉门南水道淤积程度、鳧洲水道分流点位置和分汊处流态有关<sup>[23-27]</sup>。最新研究表明:鳧洲水道分流比还受蕉门与虎门共同影响,虎门、蕉门相对流速越大,鳧洲水道分流比越大<sup>[28]</sup>。但汉道的断面形态、分汊角等少汊型分汊河口分流比的关键因子对河网型分汊河口的影响及其相

对重要性尚未可知,不同地貌参数下鳧洲水道主支汊转变的阈值等问题有待深入研究。因此,本研究以蕉门分汊河口为研究对象,选取河道断面形态和分汊角(即鳧洲水道与蕉门南水道间的夹角)为影响因子,设计系列物模水槽实验,探究鳧洲水道分流比的演变规律,阐明各影响因子对分流比的影响及相对重要性,丰富河网型分汊河口演变机理,为蕉门整治工程提供科学依据。

## 2 研究方法

### 2.1 研究区域

珠江三角洲具有复杂的水系河网系统<sup>[29]</sup>,呈“三江汇流,八口出海,两湾纳潮,径潮交汇”的水系特点<sup>[30]</sup>。其中,珠江八大入海口门分为东四口门与西四口门<sup>[31]</sup>,其中蕉门和虎门是八大口门中重要的泄洪排沙通道,地处珠江三角洲中心区域。虎门河口是潮汐优势型河口<sup>[32]</sup>,内接狮子洋,外连伶仃洋,形成的狮子洋-虎门-伶仃水道是珠江三角洲主要的潮汐通道<sup>[33]</sup>。蕉门河口是径流优势型河口<sup>[32]</sup>,其分为两汊(图 1):一条沿万顷沙向南延伸,即蕉门南水道<sup>[18]</sup>;另一条沿南沙向东延伸,即鳧洲水道<sup>[34]</sup>。蕉门与虎门通过鳧洲水道交汇,在东四口门下泄伶仃洋的总流量中占比分别为 33% 和 35%<sup>[35]</sup>,总输沙量中占比为 27.2% 与 36.1%<sup>[36]</sup>,对伶仃洋沉积地貌演变至关重要。

据 1906 年与 1927 年海图显示<sup>[18,37]</sup>,蕉门河口为单一河流入海河口,口门外鸡抱沙浅滩与龙穴浅滩已发育,但未出现横向支汊,此时蕉门口为潮汐优势型

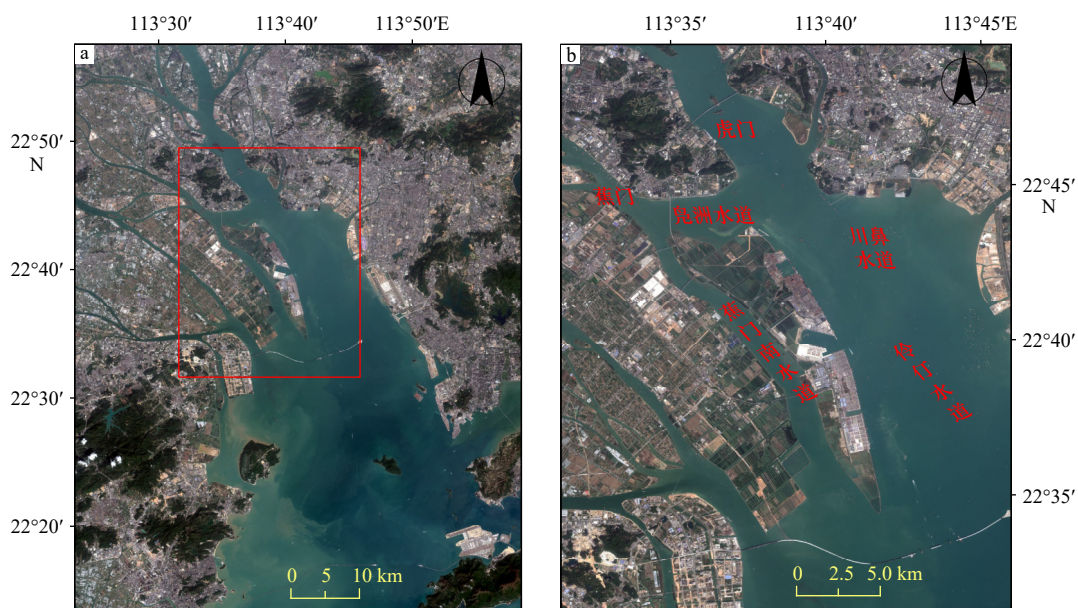


图 1 珠江伶仃洋位置示意图(a)及蕉门分汊河口各水道放大图(b)

Fig. 1 The location of the Lingding Bay, the Zhujiang River Estuary (a) and the enlarged Jiaomen bifurcated outlet (b)

河口。自20世纪50年代以来,在河口自然演变和人类活动影响下,与蕉门水道相邻的洪奇沥水道过流能力减弱,更多水沙从蕉门水道汇入伶仃洋,导致口门外延和河道淤积<sup>[37-38]</sup>。在洪水作用下,原蕉门主泄洪道发生冲决,形成横向鳧洲水道<sup>[18]</sup>。至20世纪70年代,大规模填海工程较大程度改变了东四口门的出口边界,鸡抱沙浅滩成陆,蕉门主汉向南形成新的出口,即蕉门南水道;支汉向东与虎门连通,即鳧洲水道<sup>[39]</sup>,蕉门分汉河口正式形成<sup>[40]</sup>。20世纪80年代开始的蕉门整治工程后,蕉门分流格局发生改变,蕉门南水道继续向海延伸,鳧洲水道由支汉转变成主汉,出现“强支夺干”<sup>[18]</sup>。至20世纪90年代,鳧洲水道与蕉门南水道分流比跃变为8:2左右<sup>[41]</sup>,蕉门分汉格局稳定为“一主一支”。

## 2.2 物理模型实验

物理模型实验是河口航道治理研究中重要技术手段,常用的物理模型有潮流定床模型、清水动床模型和悬沙淤积定床模型<sup>[42]</sup>。潮流定床模型对河道各地貌参数变化前后的流场已有很高的模拟精度<sup>[42]</sup>,

已有针对河道分汉处分流过程的物模实验研究表明<sup>[5,7,9,43]</sup>,实验室尺度下得到的分汉口动力参数-形态参数相关关系与天然汉道趋于一致。鉴于河口分流过程常以落潮分流比作为主要动力参数<sup>[44-45]</sup>,其变化可反映汉道稳定性和演化过程<sup>[46]</sup>,童朝锋<sup>[5]</sup>、Zhu等<sup>[45]</sup>探究了长江分汉河口水沙运动、地貌演变等问题,并认为落潮分流比可用于表征汉道稳定性和分汉格局的变化。因此,本研究关注鳧洲水道落潮分流比变化,利用室内宽浅水槽设计系列物理模型实验,探究鳧洲水道分流比对分汉口附近地貌形态参数的响应机制。

鉴于蕉门分汉河口在各发育阶段的地貌形态特征均不一样,本研究以近期(2008年)海图为依据设计基准实验,具体实验断面设置依据、实验水槽设置参数和布置方案等模型布设内容参考前期研究<sup>[28]</sup>。实验过程中,自行研发的水流循环系统可保证整个模型中水量恒定和水位稳定,通过改变流速大小控制上游进口流量。在基准模型的设计基础上,模型中 $S_3$ 水道处设置有分汉角调整装置(图2),可控制鳧

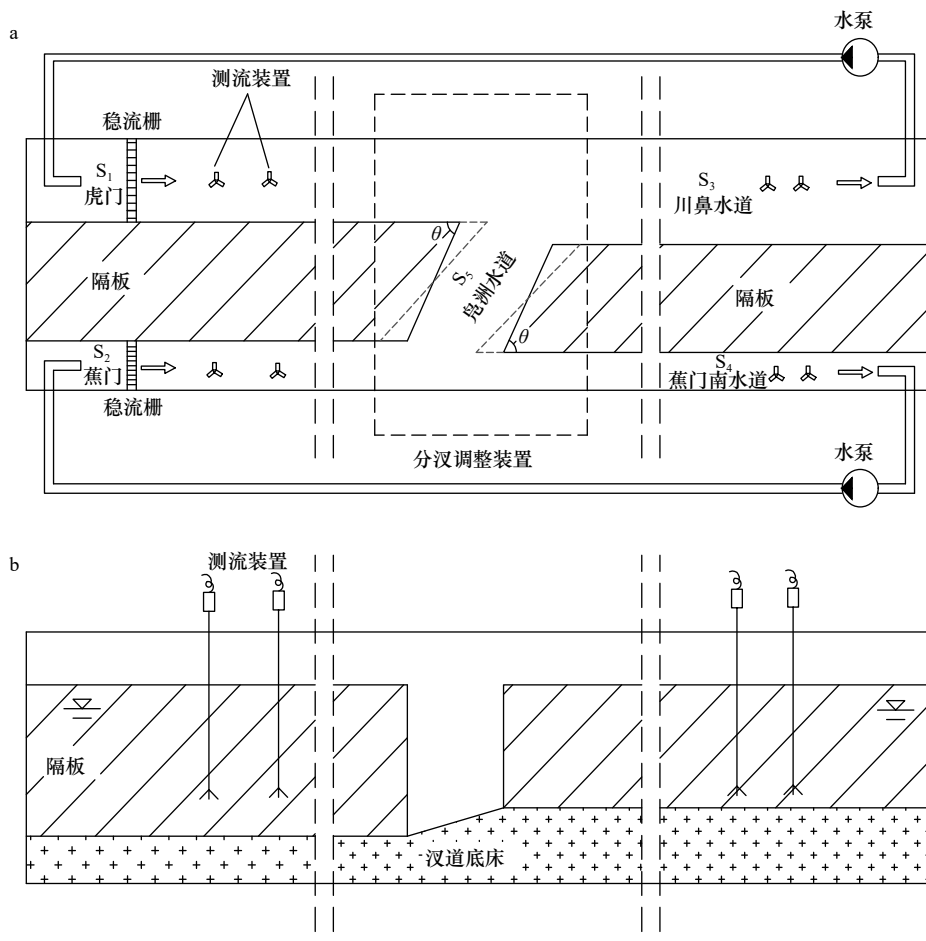


图2 水槽模型设计及仪器布置平面图(a)与正视图(b)

Fig. 2 Top view (a) and front view (b) of flume experiment design and instruments layout

洲水道分汊角,各河道水深通过调整底床高度实现(图2)。

本研究基准实验流速调节过程、基准工况流速比、皂洲水道分流比 $\mu$ 计算公式与实验误差计算方法参照前期研究<sup>[28]</sup>,此处不再赘述。在此基础上,新增皂洲水道与虎门汇流比 $\beta$ <sup>[47]</sup>的计算与分析,计算公式为

$$\beta = \frac{Q_3}{Q_3} = \frac{Q_3 - Q_1}{Q_3} = \frac{V_3 A_3 - V_1 A_1}{V_3 A_3}, \quad (1)$$

式中, $A$ 为各断面面积,单位为 $\text{cm}^2$ ;  $V$ 为断面平均流速,单位为 $\text{cm/s}$ ;  $Q$ 为断面平均流量,单位为 $\text{cm}^3/\text{s}$ ;下标为各断面序号。

本文基准实验参数设置见表1,保证相对流速比与前期研究一致<sup>[28]</sup>,但绝对流速值大小不同,用于探讨皂洲水道分流比与上游绝对流速和相对流速的相关关系。通过调节水槽生流系统,得到现状地貌特征下皂洲水道分流比随两口门不同来流工况(表1)的变化过程。

表1 基准实验流速比工况设计表

Table 1 Flow velocity ratio setting in the reference run

工况	$V_1/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$	$V_2/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$	$V_1/V_2$
1	2.8	14	0.2
2	5.6	14	0.4
3	7	14	0.5
4	8.4	14	0.6
5(基准工况)	11.2	14	0.8
6(基准工况)	14	14	1
7	14	11.7	1.2
8	14	10	1.4
9	14	8.8	1.6
10	14	7.8	1.8
11	14	7	2
12	14	5.8	2.4

### 2.3 敏感性分析实验设计

敏感性分析是一种研究变量不确定性的方法<sup>[48]</sup>,其在确定性分析的基础上探究对研究目标影响最大的变量,目前已广泛应用于生物模型、环境模型和河流动力学模型<sup>[49-51]</sup>。敏感性分析的结果通常可由敏感性系数直观体现,即研究目标的相对变化与所选参数的相对变化之比<sup>[52-53]</sup>。因此,本研究中, $S_5$ 河道(皂洲水道)分流比 $\mu$ 的敏感性系数 $\varphi$ 计算公式为<sup>[49]</sup>

$$\varphi = \frac{\Delta\mu/\mu_1}{\Delta\delta/\delta_1} = \frac{(\mu_2 - \mu_1)/\mu_1}{(\delta_2 - \delta_1)/\delta_1}, \quad (2)$$

式中, $\varphi$ 为敏感性系数,其正、负值分别表示呈正相关或负相关,绝对值代表敏感程度,绝对值越大则敏感性越高,反之亦然; $\mu$ 、 $\delta$ 分别为分流比与敏感性变量; $\delta_1$ 为基准实验中变量取值, $\delta_2$ 为敏感性实验中变量取值,变量变化幅度 $\Delta\delta = \delta_2 - \delta_1$ ;  $\mu_1$ 为基准实验分流比, $\mu_2$ 为敏感性实验分流比,分流比变化幅度 $\Delta\mu = \mu_2 - \mu_1$ 。

本实验选取蕉门南水道水深、皂洲水道水深和分汊角3个地貌形态参数作为分析变量。在基准实验的基础上,采用单因素分析法,设计系列敏感性分析实验(表2),每组次仅改变一个参数,且各组的流速比工况均与基准实验一致。为保证实验的重复性,各组实验至少重复3次。参考前期研究<sup>[28]</sup>的误差分析方法,本研究各组实验平均误差在2.6%~4.7%之间,处于合理误差范围内,实验重复性较好。

表2 敏感性分析实验参数设计表

Table 2 Parameter setting of sensitivity experimental scenarios

参数变化	组次	$S_4$ 相对水深比 (蕉门南水道)	$S_5$ 相对水深比 (皂洲水道)	分汊角
基准实验	Case RF65	1		
蕉门南水道水深	Case JND	1.86	1	
	Case JNS	0.65		65°
皂洲水道水深	Case FZD		1.86	
	Case FZS		0.65	
分汊角	Case RF30	1		30°
	Case RF45		1	45°
	Case RF75			75°

注:相对水深比指敏感性分析实验中的水深与基准实验中的水深之比。

## 3 实验结果分析

### 3.1 皂洲水道分流比演变规律

根据基准实验(Case RF65)结果绘制皂洲水道分流比与虎门、蕉门流速比之间的相关关系如图3所示。据现场水文测验数据<sup>[18, 25, 54]</sup>,皂洲水道年均落潮平均分流比为69%~73%(图3中绿框);洪季平均分流比为70%~75%,最大分流比为76.6%~78%(图3中黄框)。对比实验结果与年均、洪季工况下的实测分流比(图3),发现基准实验结果与实测水文资料吻合较好,验证本水槽模型实验可模拟蕉门分汊河口分流特征。如图3所示,皂洲水道分流比与虎门、蕉门

断面流速比呈正相关关系。这主要是由于鳧洲水道既是蕉门口的分流主汊,同时又是虎门口的汇流支汊。当虎门与蕉门之间的流速比不断增大时,虎门过流流量提高,显著的大于鳧洲水道下泄流量,故交汇区虎门水流对鳧洲水道水流的顶托作用逐渐减弱,对于鳧洲水道分流具有正向促进作用,从而带动鳧洲水道分流比增大。因此,在讨论河网型分汊河口分流比时,应同时关注分流区和汇流区水流运动的相互作用。

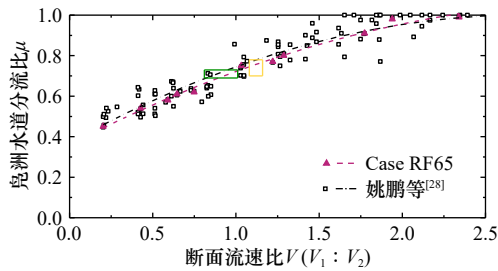


图3 鳧洲水道分流比随断面流速比变化(Case RF65与姚鹏等<sup>[28]</sup>流速比相同但绝对流速不同)

Fig. 3 Relationship between flow division ratio of the Fuzhou Channel and velocity ratio between outlets (Case RF65 and the results of Yao et al<sup>[28]</sup> have the same velocity ratio while different velocity magnitudes)

图4所示为鳧洲水道汇流比、分流比分别随虎门、蕉门两口门流速比的变化趋势,鳧洲水道汇流比与断面流速比呈负相关关系。从汇流比变化趋势来看,呈现变化幅度先快后慢的趋势。这主要是由于在川鼻水道(虎门下游)下泄能力一定的情况下,随着虎门、蕉门相对流速比增大,虎门下泄流量不断提高,川鼻水道承泄的总流量中虎门下泄水流占比随之增大,导致鳧洲水道可汇入川鼻水道的流量有限,汇流比逐渐减小。

图5为虎门流速不变,仅改变蕉门流速时,鳧洲

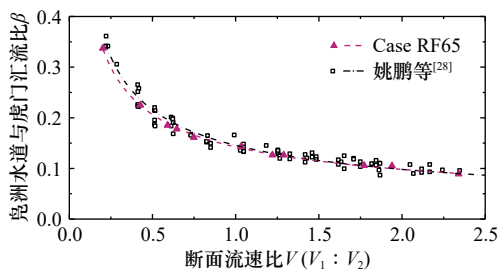


图4 鳧洲水道与虎门汇流比随断面流速比变化(Case RF65与姚鹏等<sup>[28]</sup>流速比相同但绝对流速不同)

Fig. 4 Relationship between flow confluence ratio of the Fuzhou Channel and velocity ratio between outlets (Case RF65 and the results of Yao et al<sup>[28]</sup> have the same velocity ratio while different velocity magnitudes)

水道分流比、汇流比的变化规律。结果显示,仅增大蕉门流速时,虎门与鳧洲水道汇流比基本保持不变,表明汇流区水力特性变化较小,故蕉门来流增大,鳧洲水道分流能力变化较小,反而更利于分汊口水流分流进入蕉门南水道。因此,在姚鹏等<sup>[28]</sup>研究中发现,虎门流速不变,鳧洲水道的分流比随蕉门流速的增大而减小。综上所述,在讨论河网型分汊河口分流比时,应同时关注分汊比和汇流比的影响。

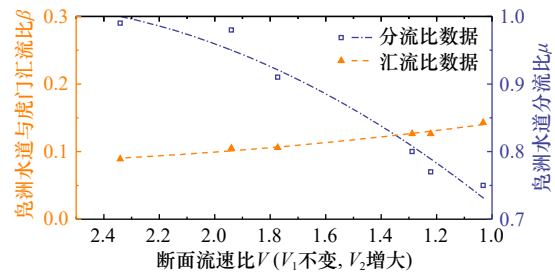


图5 鳧洲水道分流比及汇流比随虎门、蕉门断面流速比变化(虎门流速不变)

Fig. 5 The relationship between variation of flow division ratio, confluence discharge ratio of Fuzhou channel and flow discharge of Humen and Jiaomen outlets (in case of constant Humen flow velocity)

通过将本文基准实验(Case RF65)与姚鹏等<sup>[28]</sup>中基准实验的分流比和汇流比对比(图3,图4),发现当虎门、蕉门断面流速比相同时,虽然两组实验中绝对流速大小不同,但鳧洲水道分流比变化规律基本相似。其主要原因在于,鳧洲水道既是蕉门口的分流主汊,也是虎门口的汇流支汊,分流与汇流的水流运动特性变化均会影响鳧洲水道分流比。

### 3.2 分流比随分汊口形态的变化规律

图6和图7分别为蕉门南水道水深改变(即Case RF65, Case JND, Case JNS)、鳧洲水道水深改变(即Case RF65, Case FZD, Case FZS)后鳧洲水道分流比随断面流速比的变化规律,其中绿色和黄色阴影分别代表年均工况( $V = 0.8 \sim 1.0$ )和洪季工况( $V = 1.08 \sim 1.16$ )。上述6组实验结果显示,分流比与流速比均呈现正相关关系,但鳧洲水道分流比对两支汊的水深变化敏感性不同。从定性角度,鳧洲水道分流比与鳧洲水道水深呈正相关关系,但与蕉门南水道水深呈负相关关系,这是由于蕉门南水道和鳧洲水道的水深增大时,对应河道的过流能力增强,从而改变鳧洲水道分流比;从定量角度,年均工况和洪季工况下,相同支汊水深改变率引起的分流比变化率不同:蕉门南水道水深调整引起的分流比变化率约为13.4%~21.7%,是鳧洲水道水深调整引起的分流比变化(约4.7%~

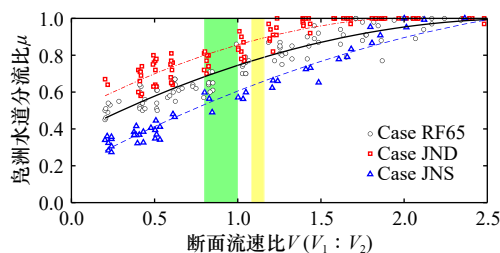


图6 蕉门南水道3组不同水深实验下鳧洲水道分流比随断面流速比( $V_1:V_2$ )变化

Fig. 6 Variation of flow division ratio of Fuzhou Channel with flow velocity ratio between  $V_1$  and  $V_2$  in three different water depth experiments of Jiaomen South Channel

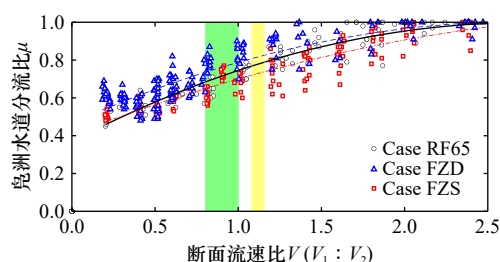


图7 鳧洲水道3组不同水深实验下鳧洲水道分流比随断面流速比( $V_1:V_2$ )变化

Fig. 7 Variation of flow division ratio of Fuzhou channel with flow velocity ratio between  $V_1$  and  $V_2$  in three different water depth experiments of Fuzhou Channel

7.2%)的3倍。该实验结果证实,在实际的蕉门河口治理工程中,通过疏浚蕉门南水道以减小鳧洲水道分流比的方案<sup>[23]</sup>是合理可行的。

图8为鳧洲水道分流比在分汊角变化下(即Case RF65, Case RF30, Case RF45和Case RF75)的演变规律,其中分汊角 $65^\circ$ (Case RF65)为基准算例。当分汊角在 $30^\circ\sim 65^\circ$ 区间内变化时,分流比与分汊角成正相关关系。在年均工况和洪季工况下,当分汊角从 $65^\circ$ 减小至 $45^\circ$ 时,分流比仅变化1.6%左右,从 $45^\circ$ 减小至 $30^\circ$ 时,分流比变化幅度略有增大,为2.2%左右;

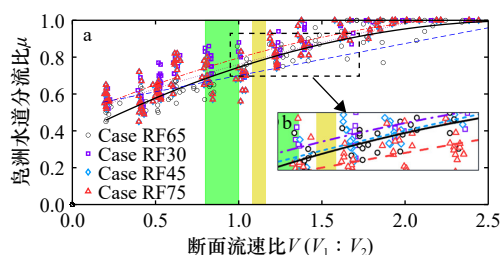


图8 4组不同分汊角实验下鳧洲水道分流比随断面流速比( $V_1:V_2$ )变化

Fig. 8 Variation of flow division ratio of Fuzhou Channel with flow velocity ratio between  $V_1$  and  $V_2$  in four different bifurcation angle experiments

当分汊角由 $65^\circ$ 增大至 $75^\circ$ 时,分流比平均变化可达8.3%,且以 $V=0.7$ 为阈值,在小流速比( $V_1:V_2 < 0.7$ )情况下,鳧洲水道分流比与分汊角呈正相关,在大流速比( $V_1:V_2 > 0.7$ )情况下呈负相关。即,若采取增大分汊角的方式减小鳧洲水道分流比时,虽然能在 $V > 0.7$ 时取得显著的效果,但在 $V < 0.7$ 时会导致分流比增大的情况不应忽略。因此,在河网型分汊河口,分汊角对横向河道分流比的影响较为复杂,不仅和角度增大或减小有关,角度改变的大小、两河口相对流速等均会对河网型分流比有影响。

在分汊河口的演变中存在两个关键阈值:主支汊转换阈值和支汊消亡阈值。在本研究中,分别以分流比为0.5和0.1为界,各组实验中鳧洲水道主支汊转换与蕉门南水道支汊消亡对应的断面流速比如表3所示。基准工况(Case RF65)、Case JNS、Case FZD、Case RF30和Case RF45等工况下,鳧洲水道主支汊转换的流速比阈值为 $0.03\sim 0.30$ ,远小于年均流速比,因此可认为在常态动力条件下,鳧洲水道目前的主汊地位是较为稳定的。在Case JNS实验中,蕉门南水道消亡的流速比阈值为1.18,略大于洪季流速比,故在多次连续洪水事件后蕉门南水道有可能逐渐由支汊转变为消亡状态(表3)。

表3 各组实验中鳧洲水道主支汊转换及支汊消亡的流速比阈值

Table 3 Threshold of velocity ratio for the Fuzhou Channel turn to secondary branch and threshold of velocity ratio for the shrivel of current secondary branch

组次	主支汊转换流速比	蕉门南水道消亡流速比
Case RF65(基准实验)	0.30	1.65
Case JND	0.72	2.02
Case JNS	0.03	1.18
Case FZD	0.09	1.53
Case FZS	0.29	1.96
Case RF30	0.07	1.46
Case RF45	0.06	1.59
Case RF75	/	2.15

## 4 讨论

### 4.1 分流比影响因素敏感性分析

基于不同地貌特征下鳧洲水道分流比物模实验结果,采用式(2)可计算得到12种流速比工况下分流比的敏感性系数,并将其分为可引起分流比增大和分

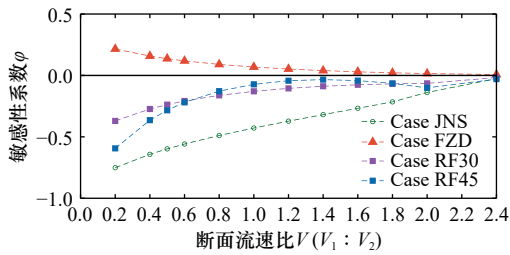


图9 引起鳧洲水道分流比增大的变量  
敏感性系数变化

Fig. 9 Variation of sensitivity coefficient of parameters causing increase of flow division ratio of Fuzhou Channel

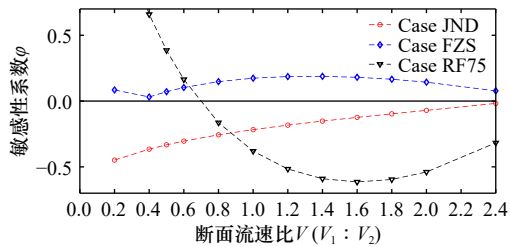


图10 引起鳧洲水道分流比减小的变量  
敏感性系数变化

Fig. 10 Variation of sensitivity coefficient of parameters causing decrease of flow division ratio of Fuzhou Channel

流比减小两种情况分别讨论各影响因素的敏感性。针对引起分流比增大或减小的变量,其敏感性系数随断面流速比变化如图9和图10所示,各变量敏感性系数均呈现随分流比增大而趋于0的变化趋势,这是由于鳧洲水道分流比与流速比之间均呈现流速比越大,分流比越大的情况,当分流比接近1时,分流比相对变化较小(图6至图8)。值得注意的是,Case RF75中变量敏感性系数随流速比变化趋势与其他组次实验不同,即,当分汊角由 $65^\circ$ 增大 $75^\circ$ 时,当 $V < 0.7$ 时敏感性系数随流速比增大而趋于0,当 $V > 0.7$ 时敏感性系数先减小后趋于0。

图9中,蕉门南水道水深减小(Case JNS)、分汊角减小(Case RF30、Case RF45)和鳧洲水道水深增大(Case FZD)的平均敏感性系数绝对值分别为0.40、0.16和0.08。因此,引起鳧洲水道分流比增大的各变量敏感性的顺序由大到小依次为蕉门南水道水深、分汊角、鳧洲水道水深。图10中,分汊角增大(Case RF75)、蕉门南水道水深增大(Case JND)、鳧洲水道水深减小(Case FZS)的平均敏感性系数绝对值分别为0.46、0.21和0.13。因此,引起鳧洲水道分流比减小的各变量敏感性顺序由大到小依次为分汊角、蕉门南水道水深、鳧洲水道水深。

综合上述敏感性分析结果可见,在河网型分汊河

口中,诸如蕉门的鳧洲水道、横门的洪奇沥水道之类的横向汊道,其自身断面形态变化对分流比的影响较小,而另一汊的过水断面的影响则相对较大。在蕉门分汊河口演变历史中,相关研究认为蕉门南水道淤积与外延是导致鳧洲水道发生“强支夺干”的主要原因<sup>[18]</sup>,即蕉门南水道过流能力的变化对鳧洲水道分流比影响较大,与本研究敏感性分析结果相吻合。从蕉门口形态特征分析,若蕉门南水道未发生淤塞(即相较于目前情况,进行一定的疏浚增大水深后),由于蕉门南水道与蕉门上游河道方向一致,更利于水流沿阻力最小路径入海的规律进行自然分流,对分流比产生直接影响。若对目前的鳧洲水道疏浚,虽然更利于蕉门口分流流入鳧洲水道,但鳧洲水道分流比不仅与分流有关,也与虎门口汇流有关。当两口门流速比不变的情况下,常态工况下鳧洲水道的汇流比变化较小,因此单纯增大鳧洲水道水深对其分流比的增大效果不明显。因此,鳧洲水道过流能力除受相邻河道虎门的制约,另一支汊(蕉门南水道)的过水能力改变也是鳧洲水道分流比的敏感因素。

#### 4.2 分汊河口分流比随分汊角变化规律

分汊角是分汊河道平面形态的直接体现,其变化与分汊河道的稳定性密切相关<sup>[46]</sup>。不同类型的分汊河口,分汊角变化对分流比的影响不同,内在机制存在差异。在少汊型分汊河口,例如针对长江口分汊格局演变的研究表明,长江口在发育过程中北支与南支间的分汊角逐渐增大并趋于 $90^\circ$ ,造成北支进口流路不畅,汊道过流阻力增大,促进了北支河道衰退,分流比逐渐减小至5%左右,北支汊道分流比与分汊角呈现负相关关系<sup>[55-60]</sup>。

在河网型分汊河口,例如珠江口,由于洪水冲缺而成的横向分汊,将两相邻河道或河口互相连接,形成分汊河口,分汊角为横向汊道与分汊后下游河道间的夹角。根据本研究实验结果,在蕉门分汊河口,当分汊角小于 $65^\circ$ 时,由于分汊角增大导致蕉门上游流量分流进入鳧洲水道的流路不畅,分流区出现局部壅水,阻碍鳧洲水道下泄水流,分流比减小,鳧洲水道分流比与分汊角呈负相关,与长江口北支分流比随分汊角的相关关系相同。但当分汊角在 $65^\circ \sim 75^\circ$ 时,鳧洲水道分流比与分汊角的正负相关性在流速比 $V = 0.7$ 前后转换。不可忽略的是,鳧洲水道同时连接蕉门和虎门,当分汊角增大时,鳧洲水道水流呈较大的人射角与虎门水流交汇,顶托作用增强,交汇口水流分离区尺度增大<sup>[61-62]</sup>,汇流过流断面束窄,减弱鳧洲水道过流能力。两者共同的作用导致分汊角越大,对

横向汉道分流的抑制效果更强,故在年均和洪季工况下(图 8 中绿色和黄色阴影),分汉角增大  $10^\circ$ 引起的分流比的变化幅度大于分汉角减小  $20^\circ$ 对分流比的影响(图 9,图 10)。因此,在讨论分汉角变化对河网型分汉河口分流比的影响时,需要同时关注横向汉道分流区与汇流区的水流运动特性变化。

### 4.3 蕉门分汉河口整治建议

蕉门整治工程规划始于 20 世纪 70 年代,目的在于调整鳧洲水道水沙分配,通过疏浚蕉门南水道、缩窄鳧洲水道河宽和理顺鳧洲水道岸线走向等治理措施,增强蕉门南水道泄洪能力,稳定蕉门河口河势<sup>[23, 25-26]</sup>。据本研究,在年均和洪季工况下,引起鳧洲水道分流比减小的各因素敏感性顺序由大到小为分汉角、蕉门南水道水深、鳧洲水道水深。因此,在整治过程中通过采用浚深蕉门南水道、增大鳧洲水道分汉角的整治措施,可以更为有效的达到减小鳧洲水道分流比的整治目标。

另一方面,鳧洲水道下泄水流与虎门的汇流角度将影响虎门潮汐通道、虎门双向射流体系和汇流后泥沙沉积区域。从整治蕉门分汉河口的目标来看,增大分汉角的手段能达到减小鳧洲水道分流比的目的,但可能会造成鳧洲水道下泄水流与虎门涨落潮流的汇流区改变,不利于潮汐通道稳定,可能会进而影响虎门双向射流体系<sup>[63]</sup>的射流强弱及分布、鳧洲水道下泄泥沙的沉积区域如何变化等也未可知,因此,后续可通过动力地貌数值模拟、动床物理模型实验等手段对各因素变化对蕉门河口分汉格局的分沙比、

地貌格局演变进行深入探讨。

## 5 结论

本研究重点关注河网型分汉河口分流比及其影响因素,以珠江三角洲蕉门分汉河口为例,基于物理模型设计系列敏感性分析实验,在已有研究成果<sup>[28]</sup>的基础上进行延续研究,逐一量化鳧洲水道分流比对蕉门南水道水深、鳧洲水道水深和分汉角的敏感性,探讨鳧洲水道分流比随多个因素的变化规律,更为全面的揭示了鳧洲水道分流比随虎门、蕉门两口门水流条件的演变规律,得到如下结论:

(1)在分汉河口当前形态条件下,鳧洲水道分流比受虎门、蕉门断面的相对流速影响,两口门绝对流速变化对分流比的影响较小。

(2)鳧洲水道分流比随虎门、蕉门流速比呈正相关关系;鳧洲水道分流比与蕉门南水道水深和分汉角呈负相关关系、与鳧洲水道水深呈正相关关系;分汉角在  $65^\circ\sim 75^\circ$ 时,分流比与分汉角的相关关系在流速比  $V=0.7$  前后转换。

(3)引起鳧洲水道分流比增大的各变量敏感性的顺序由大到小依次为蕉门南水道水深、分汉角、鳧洲水道水深;引起鳧洲水道分流比减小的各变量敏感性顺序由大到小为分汉角、蕉门南水道水深、鳧洲水道水深。

**致谢:** 感谢康彦彦副教授对本文卫星遥感图片绘制的帮助与支持!

### 参考文献:

- [1] 金元欢,沈焕庭.分汉河口形成的基本条件[J].*海洋湖沼通报*,1991(4):1-9.  
Jin Yuanhuan, Shen Huanting. Basic conditions for the formation of branching estuaries[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 1991(4): 1-9.
- [2] Pittaluga M B, Repetto R, Tubino M. Channel bifurcation in braided rivers: equilibrium configurations and stability[J]. *Water Resources Research*, 2003, 39(3): 1046.
- [3] 金元欢.河口分汉的定量表达及其基本模式[J].*地理学报*,1990,45(1):56-67.  
Jin Yuanhuan. Quantitative properties and classification models of branching estuaries[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1990, 45(1): 56-67.
- [4] Kleinhans M G, Jagers H R A, Mosselman E, et al. Bifurcation dynamics and avulsion duration in meandering rivers by one-dimensional and three-dimensional models[J]. *Water Resources Research*, 2008, 44(8): W08454.
- [5] 童朝锋.分汉口水沙运动特征及三维水流数学模型应用研究[D].南京:河海大学,2005.  
Tong Chaofeng. Study on flow and sediment movement of bifurcation area and related application of 3-D numerical flow model[D]. Nanjing: Hohai University, 2005.
- [6] Wang Z B, De Vries M, Fokkink R J, et al. Stability of river bifurcations in 1D morphodynamic models[J]. *Journal of Hydraulic Research*, 1995, 33(6): 739-750.
- [7] Bertoldi W, Tubino M. River bifurcations: experimental observations on equilibrium configurations[J]. *Water Resources Research*, 2007, 43(10): W10437.
- [8] 严以新,葛亮,高进.最小能耗率理论在分汉河段的应用[J].*水动力学研究与进展(A辑)*,2003,18(6):692-697.  
Yan Yixin, Ge Liang, Gao Jin. Application of the minimum energy dissipation rate theory in the braided river[J]. *Chinese Journal of Hy-*

- drodynamics, 2003, 18(6): 692–697.
- [9] Marra W A, Parsons D R, Kleinhans M G, et al. Near-bed and surface flow division patterns in experimental river bifurcations[J]. *Water Resources Research*, 2014, 50(2): 1506–1530.
- [10] Alomari N K, Yusuf B, Mohammad T A, et al. Experimental investigation of scour at a channel junctions of different diversion angles and bed width ratios[J]. *CATENA*, 2018, 166: 10–20.
- [11] 左利钦, 陆永军. 节点对长江下游马当河段汉道演变影响的研究 [J]. *长江科学院院报*, 2014, 31(10): 72–79.  
Zuo Liqin, Lu Yongjun. Effect of nodes on branch evolution in Madang reach in the downstream of Yangtze River[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2014, 31(10): 72–79.
- [12] 金元欢, 沈煥庭. 科氏力对河口分汉的影响 [J]. *海洋科学*, 1993(4): 52–56.  
Jin Yuanhuan, Shen Huanting. Effects of Coriolis' Force on estuarine branch fiord[J]. *Marine Sciences*, 1993(4): 52–56.
- [13] Zhang Wei, Feng Haochuan, Hoitink A J F, et al. Tidal impacts on the subtidal flow division at the main bifurcation in the Yangtze River Delta[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2017, 196: 301–314.
- [14] Sassi M G, Hoitink A J F, De Brye B, et al. Tidal impact on the division of river discharge over distributary channels in the Mahakam Delta[J]. *Ocean Dynamics*, 2011, 61(12): 2211–2228.
- [15] 唐明. 人工控制下河口分汉河槽演变过程与稳定性研究 [D]. 上海: 华东师范大学, 2022.  
Tang Ming. Evolution processes and stability of the bifurcated channels in the estuary under human control[D]. Shanghai: East China Normal University, 2022.
- [16] 何为. 珠江河口分汉机制及其对排洪和咸潮上溯的影响——以东三口门为例 [D]. 上海: 华东师范大学, 2012.  
He Wei. Bifurcated mechanism and its impact on flood discharge and saline intrusion in Pearl River Estuary[D]. Shanghai: East China Normal University, 2012.
- [17] 何杰. 潮汐河口汉道治理数值模拟研究 [D]. 南京: 南京水利科学研究院, 2006.  
He Jie. Study on regulation for tidal estuary inlet by mathematical simulation[D]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2006.
- [18] 王世俊, 李春初, 田向平. 蕉门口发育演变及其对南沙港的影响 [J]. *泥沙研究*, 2004(3): 59–63.  
Wang Shijun, Li Chunchu, Tian Xiangping. Evolvement of Jiaomen distributary estuary of the Pearl River and its influences on Nansha Harbor[J]. *Journal of Sediment Research*, 2004(3): 59–63.
- [19] 尹小玲, 张红武, 任杰, 等. 珠江口虎门水域洪季大潮的水沙特点分析 [J]. *水利学报*, 2009, 40(2): 166–172.  
Yin Xiaoling, Zhang Hongwu, Ren Jie, et al. Analysis on characteristics of current and sediment movement in Humen Estuary of Pearl River during spring tide in flood season[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2009, 40(2): 166–172.
- [20] 李孟国, 韩志远, 李文丹, 等. 伶仃洋滩槽演变与水沙环境研究进展 [J]. *海洋湖沼通报*, 2019(5): 20–33.  
Li Mengguo, Han Zhiyuan, Li Wendan, et al. A review on the seabed evolution and hydrodynamic sediment environment in Lingdingyang Bay of the Pearl River Estuary[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2019(5): 20–33.
- [21] 肖洋, 王艳, 徐辉荣, 等. 珠江三角洲洪水就近入海防洪治理方案 [J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2021, 49(3): 257–264.  
Xiao Yang, Wang Yan, Xu Huirong, et al. Analysis on flood control scheme for flood discharge from nearer route in the Pearl River Delta[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2021, 49(3): 257–264.
- [22] 徐润刚, 黎维祥, 王科华. 广州港南沙港区水文泥沙条件及回淤分析 [J]. *水运工程*, 2009(7): 29–35.  
Xu Rungang, Li Weixiang, Wang Kehua. Hydrological sediment condition and sedimentation analysis of Nansha Port, Guangzhou[J]. *Port & Waterway Engineering*, 2009(7): 29–35.
- [23] 胡晓张, 张宇琪, 陈军, 等. 蕉门口当前治理思路探讨 [J]. *人民珠江*, 2018, 39(7): 22–26.  
Hu Xiaozhang, Zhang Yuqi, Chen Jun, et al. Discussion on current management ideas of Jiaomen Estuary[J]. *Pearl River*, 2018, 39(7): 22–26.
- [24] 黄希敏. 蕉门口的整治 [J]. *人民珠江*, 1988(2): 42–45.  
Huang Ximin. Regulation scheme of Jiaomen Estuary[J]. *Pearl River*, 1988(2): 42–45.
- [25] 胡晓张, 王汉岗, 杨聿, 等. 高强度人类活动引起的蕉门口河势变化及规划治理对策研究 [J]. *水利规划与设计*, 2019(1): 12–18.  
Hu Xiaozhang, Wang Hangang, Yang Yu, et al. Study on the changing river regime at Jiaomenkou caused by high intensity human activities and the strategies for planning and harnessing[J]. *Water Resources Planning and Design*, 2019(1): 12–18.
- [26] 杨聿, 胡晓张, 王汉岗, 等. 蕉门口整治方案研究 [J]. *人民珠江*, 2019, 40(9): 39–47, 55.  
Yang Yu, Hu Xiaozhang, Wang Hangang, et al. Study on regulation scheme of Jiaomen Estuary[J]. *Pearl River*, 2019, 40(9): 39–47, 55.
- [27] 李春初, 雷亚平, 何为, 等. 珠江河口演变规律及治理利用问题 [J]. *泥沙研究*, 2002(3): 44–51.  
Li Chunchu, Lei Yaping, He Wei, et al. Evolutional processes of the Pearl River Estuary and its protective regulation and exploitation[J]. *Journal of Sediment Research*, 2002(3): 44–51.
- [28] 姚鹏, 余志斌, 苏敏, 等. 珠江蕉门分汉河口分流比水槽实验研究 [J]. *海洋学报*, 2022, 44(6): 106–115.  
Yao Peng, Yu Zhibin, Su Min, et al. Flume experiment on flow division ratio of bifurcated Jiaomen outlet in the Zhujiang River[J]. *Haiyang Xuebao*, 2022, 44(6): 106–115.
- [29] Zhang Wei, Cao Yu, Zhu Yuliang, et al. Flood frequency analysis for alterations of extreme maximum water levels in the Pearl River Delta[J]. *Ocean Engineering*, 2017, 129: 117–132.

- [30] 陈文龙, 刘培, 陈军. 珠江河口治理与保护思考 [J]. 中国水利, 2020(20): 36–39.  
Chen Wenlong, Liu Pei, Chen Jun. Thoughts on the regulation and protection for the Pearl River Estuary[J]. China Water Resources, 2020(20): 36–39.
- [31] 窦希萍, 罗肇森. 潮汐河口治理研究 [J]. 中国水利, 2007(1): 39–42.  
Dou Xiping, Luo Zhaosen. Research of treatment of estuary with tides[J]. China Water Resources, 2007(1): 39–42.
- [32] Su Min, Gong Zheng, Yao Peng, et al. Investigation on factors of influence on long-term morphodynamic evolution of a multi-outlets estuarine-delta system: a case study of the Lingding Bay, Pearl River Delta[J]. Journal of Coastal Research, 2020, 95(S1): 664–668.
- [33] 谢梅芳, 张萍, 杨昊, 等. 珠江“伶仃洋河口湾–虎门–潮汐通道”的潮波传播特征 [J]. 热带海洋学报, 2021, 40(4): 1–13.  
Xie Meifang, Zhang Ping, Yang Hao, et al. Tidal wave propagation dynamics in Lingdingyang Bay-Humen outlet-tidal channel of the Pearl River[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2021, 40(4): 1–13.
- [34] 胡德礼, 杨清书, 吴超羽, 等. 珠江网河水沙分配变化及其对伶仃洋水沙场的影响 [J]. 水科学进展, 2010, 21(1): 69–76.  
Hu Deli, Yang Qingshu, Wu Chaoyu, et al. Changing water and sediment dynamics in the Pearl River network and consequences on water and sediment regimes in the Lingdingyang Estuary[J]. Advances in Water Science, 2010, 21(1): 69–76.
- [35] Callahan J, Dai Minhan, Chen R F, et al. Distribution of dissolved organic matter in the Pearl River Estuary, China[J]. Marine Chemistry, 2004, 89(1/4): 211–224.
- [36] 韩西军, 杨树森. 珠江口鸡抱沙附近地形冲淤演变研究 [J]. 水道港口, 2008, 29(5): 328–332.  
Han Xijun, Yang Shusen. Scour and silting evolution of topography around Jibaosha in the Zhujiang Estuary[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2008, 29(5): 328–332.
- [37] Wu Ziyin, Milliman J D, Zhao Dineng, et al. Recent geomorphic change in Lingding Bay, China, in response to economic and urban growth on the Pearl River Delta, Southern China[J]. Global and Planetary Change, 2014, 123: 1–12.
- [38] 钟德馨. 浅探蕉门及洪奇沥的河口治理 [J]. 人民珠江, 1989(2): 44–48, 43.  
Zhong Dexin. Preliminary research on the regulation of Jiaomen Estuary and Hongqili Estuary[J]. Pearl River, 1989(2): 44–48, 43.
- [39] 曾昭璇. 珠江三角洲地貌发育 [M]. 广州: 暨南大学出版社, 2012: 100–101.  
Zeng Zhaoxuan. Geomorphological Development in the Pearl River Delta[M]. Guangzhou: Jinan University Press, 2012: 100–101.
- [40] Chen Kanglin, Dong Haoyan, Jia Liangwen, et al. Depocentre transfer in the Lingdingyang Estuary: interferences from natural and anthropogenic forcings[J]. Ocean & Coastal Management, 2020, 185: 105064.
- [41] 吴小明, 蔡伟. 珠江口蕉门延伸段悬沙不淤流速的初步研究 [J]. 人民珠江, 1993(3): 16–20.  
Wu Xiaoming, Cai Wei. Preliminary research of the non-silting flow rate of suspended sand in the extension section of the Jiaomen at the Pearl River Estuary[J]. Pearl River, 1993(3): 16–20.
- [42] 付桂, 汤宇. 模型试验研究在河口治理工程中的重要性 [C]//中国水利学会 2016 学术年会论文集 (上册). 成都: 中国水利学会, 2016: 273–276.  
Fu Gui, Tang Yu. Importance of model test research work in estuarine regulation project[C]//Proceedings of the 2016 Academic Annual Conference of the Chinese Hydraulic Engineering Society (Volume I). Chengdu: Chinese Hydraulic Engineering Society, 2016: 273–276.
- [43] Thomas R E, Parsons D R, Sandbach S D, et al. An experimental study of discharge partitioning and flow structure at symmetrical bifurcations[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2011, 36(15): 2069–2082.
- [44] 陆佳玉, 葛建忠, 丁平兴. 潮控型分汊河口分流过程探讨——以长江北支口为例 [J]. 华东师范大学学报 (自然科学版), 2020(3): 1–12.  
Lu Jiayu, Ge Jianzhong, Ding Pingxing. A discussion on the diversion process of tide-dominated estuary bifurcation: the North Branch estuary of the Yangtze River[J]. Journal of East China Normal University (Natural Science), 2020(3): 1–12.
- [45] Zhu Boyuan, Li Yitian, Yue Yao, et al. Aggravation of north channels' shrinkage and south channels' development in the Yangtze Estuary under dam-induced runoff discharge flattening[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2017, 187: 178–192.
- [46] 葛亮. 分汊河道分流特性的研究与应用 [D]. 南京: 河海大学, 2004.  
Ge Liang. Study and application on division characteristics of the bifurcated channel[D]. Nanjing: Hohai University, 2004.
- [47] 王协康, 杨青远, 卢伟真, 等. 交汇水流分离区特征研究 [J]. 四川大学学报 (工程科学版), 2008, 40(6): 1–6.  
Wang Xiekang, Yang Qingyuan, Lu Weizhen, et al. Study on characteristics of separation zone in confluence river[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2008, 40(6): 1–6.
- [48] 王锋. 拱坝受力影响因素的敏感性分析 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2013.  
Wang Feng. Sensitivity analysis of factors affecting arch dam stress[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2013.
- [49] Norton J P. Algebraic sensitivity analysis of environmental models[J]. Environmental Modelling & Software, 2008, 23(8): 963–972.
- [50] Zi Zhike. Sensitivity analysis approaches applied to systems biology models[J]. IET Systems Biology, 2011, 5(6): 336–346.
- [51] Hardy R J, Lane S N, Yu Dapeng. Flow structures at an idealized bifurcation: a numerical experiment[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2011, 36(15): 2083–2096.
- [52] Drechsler M. Sensitivity analysis of complex models[J]. Biological Conservation, 1998, 86(3): 401–412.
- [53] Ni Xianglong, Kang Jianshe, Wang Guangyan, et al. Sensitivity analysis method of uncertainty based on conditional entropy[J]. Applied

- Mechanics and Materials*, 2013, 422: 296–302.
- [54] 辛文杰. 伶仃洋西岸浅滩建港条件分析[J]. 水利水运工程学报, 2010(1): 9–15.  
Xin Wenjie. Analysis on the conditions of harbor construction at Lingdingyang West Bay[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2010(1): 9–15.
- [55] 吴增斌. 潮控河道水沙净输运机制研究——以长江口北支为例[D]. 上海: 华东师范大学, 2022.  
Wu Zengbin. Sediment transport in tide-dominated channels: a case study of the North Branch in the Yangtze Estuary[D]. Shanghai: East China Normal University, 2022.
- [56] Gu Jie, Qin Xin, Chen Wei, et al. Influence of the diversion angle on flow characteristics of the North Branch of the Changjiang River Estuary[J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 610–613: 2697–2700.
- [57] Guo Leicheng, Xie Weiming, Xu Fan, et al. A historical review of sediment export-import shift in the North Branch of Changjiang Estuary[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2022, 47(1): 5–16.
- [58] 孟翊, 程江. 长江口北支入海河段的衰退机制[J]. 海洋地质动态, 2005, 21(1): 1–10.  
Meng Yi, Cheng Jiang. The atrophy of the estuarine North Branch of the Yangtze River (Changjiang River)[J]. *Marine Geology Letters*, 2005, 21(1): 1–10.
- [59] 张静怡, 胡振云, 杨鸣慧, 等. 近年来长江口北支上段河床演变成因分析[J]. 人民长江, 2007, 38(2): 103–105.  
Zhang Jingyi, Hu Zhenyun, Yang Minghui, et al. Analysis of riverbed evolution cause in upper part of North Branch of Yangtze Estuary for the recent years[J]. *Yangtze River*, 2007, 38(2): 103–105.
- [60] 高志松. 近百年来长江口北支对滩涂围垦的自适应研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2008.  
Gao Zhisong. Research on self-adjustment of North branch of Yangze Estuary to land reclamation on tidal flat for the recent hundred years[D]. Shanghai: East China Normal University, 2008.
- [61] 冯镜洁, 李然, 王协康, 等. 河流交汇分离区特性研究[J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 2009, 24(3): 320–325.  
Feng Jingjie, Li Ran, Wang Xiekang, et al. Study on characteristics of separation zone at river confluence[J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2009, 24(3): 320–325.
- [62] 茅泽育, 赵升伟, 罗昇, 等. 明渠交汇口水流分离区研究[J]. 水科学进展, 2005, 16(1): 7–12.  
Mao Zeyu, Zhao Shengwei, Luo Sheng, et al. Study on the separation zone in open-channel junction[J]. *Advances in Water Science*, 2005, 16(1): 7–12.
- [63] 唐兆民, 包芸, 任杰, 等. 珠江口虎门小尺度动力结构及鳧洲水道对其影响的数值研究[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2005, 44(5): 88–92.  
Tang Zhaomin, Bao Yun, Ren Jie, et al. Small-scale structure of Humen Estuary of the Pearl River and numerical model of the impact from Fuzhou Channel[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis SunYatseni*, 2005, 44(5): 88–92.

## Research on the effect factors of flow division ratio in river networks bifurcated estuary: A case of Jiaomen outlet, the Zhujiang River Delta

Su Min<sup>1,2,4</sup>, Yao Peng<sup>1,2,3</sup>, Yu Zhibin<sup>1,2</sup>, An Xinxi<sup>2</sup>

(1. *The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University, Nanjing 210098, China*; 2. *College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China*; 3. *State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China*; 4. *State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200241, China*)

**Abstract:** Jiaomen outlet is a typical river network bifurcated estuary and an important channel for flood discharge and sediment discharge of the Zhujiang River. The change of diversion ratio in bifurcated Jiaomen outlet is crucial to the geomorphological evolution, flood control and navigation safety of the Zhujiang River Delta. This study designed a series of flume experiments, and selected sensitivity analysis parameter which includes the water depth of bifurcated channel and bifurcated angle to explores the evolution of the flow division ratio of the river network type bifurcated estuary with the above factors. The dimension of the physical model is based on the recent geomorphic morphology of Jiaomen outlet. The result show that, on the basis of the stability of the section feature of the bifurcated channel, the flow division ratio of Fuzhou Channel depicts a good correlation with the flow velocity ratio between Humen and Jiaomen, and is less affected by the absolute flow velocity of the two outlets. Subsequently, the

sensitivity experiment result indicate that the flow division ratio is negatively correlated with the water depth of Jiaomen South Channel and positively correlated with the water depth of Fuzhou Channel, and when the bifurcation angle is between  $30^\circ$  and  $65^\circ$ , the flow division ratio is negatively correlated with the bifurcation angle, but when the bifurcation angle is between  $65^\circ$  and  $75^\circ$ , the positive and negative correlation between the flow division ratio and the bifurcation angle changes around the velocity ratio  $V = 0.7$ . Then, the sensitivity of the increase or decrease of the flow division ratio to the above each variable can be obtained by quantifying the sensitivity experiment result. The research results can provide reference for artificial regulation project of Jiaomen outlet.

**Key words:** bifurcated estuary; flow division ratio; flume experiment; sensitive analysis; Jiaomen outlet Fuzhou Channel