

· 航道及通航建筑物 ·

长江口深水航道分流比与汉道稳定性评估*



金 廖¹, 楼 飞²

(1. 交通运输部长江口航道管理局, 上海 200003;

2. 中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 上海 200120)

摘要: 潮汐河口汉道整治工程通常引起工程所在一支汉道分流比减少, 目前对这种分流比减少的河势效应缺乏量化的评估。通过窦国仁河相方程, 探讨长江口深水航道整治工程开工以来北槽水、沙条件的变化与河相调整间的相关关系。结果显示: 1) 整治工程可产生的河相调整幅度小于实际增幅。期间, 大规模的疏浚工程和区域含沙量的降低是平衡河相实际调整的两大重要因素。2) 当前, 北槽低含沙量环境支撑了主槽平均水深的增加, 但仍需通过疏浚稳定主槽容积。

关键词: 分流比; 汉道治理; 河相关系; 潮汐河口

中图分类号: TV 143.3; U 652

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)02-0053-05

Assessment of water diversion ratio and channel stability in the Yangtze estuary deep-water channel

JIN Liu¹, LOU Fei²

(1. Yangtze Estuary Waterway Administration Bureau, Ministry of Transport, Shanghai 200003, China;

2. Shanghai Waterway Engineering Design and Consulting Co., Ltd., Shanghai 200120, China)

Abstract: The regulation of a bifurcated tidal estuary usually can lead to the water diversion ratio to decrease. At present, there is no quantitative assessment of the river regime effect of such diverging ratio reduction. Based on the DOU Guo-ren equation, the correlation is analyzed between the changes in water and sand conditions and river hydraulic geometry relationship of the North Passage since the implementation of the Yangtze estuary deep-water channel regulation project. The results show that: 1) The theoretical adjustment range of river hydraulic geometry relation after the project is less than the actual change. The large-scale dredging and the decrease of local sediment concentration are the two important roles in balancing the actual adjustment of river hydraulic geometry relation. 2) At present, the low sediment content environment of the North Passage supports the increase of the average depth in the main trough, but the volume of the main trough still needs to be stabilized by dredging.

Keywords: water diversion ratio; inlet regulation; hydraulic geometry relationship; tidal estuary

长江口深水航道治理工程选择在长江口拦门沙汉道的一支(北槽)进行。汉道稳定性评估是航道整治工程的规划、设计和建成后效益评估的重要内容。河道或汉道的稳定,具体表现为在一定的水力、泥沙条件下,河道或汉道的容积(或平均断面面积)以及平均水深符合包括长江口在内的潮汐河口河相关系。因此,借助河相关系这一具有一

定普遍性的统计关系来探讨汉道分流比与汉道稳定性之间的量化关系,具体落实分流比作为汉道稳定性的指标是有意义的尝试。

1 平原潮汐河口河相关系、汉道分流比

窦国仁^[1]在关于平原冲积河流和潮汐河口河床形态的基础研究中,依据能量概念,提出河床

收稿日期: 2020-05-21

*基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFC0405405); 上海市科学技术委员会基金项目(18DZ1206600)

作者简介: 金廖(1940—), 男, 教授级高工, 从事港口航道工程的建设管理及研究工作。

活动性假说和河床稳定性指标，对于某一输沙平衡的河段，河床平均断面面积(或容积)和平均水深符合以下经验统计关系：

$$A = k_1 \left(\frac{Q^8}{v_{0s}^2 v_{0b}^2 s^2} \right)^{1/9} \quad (1)$$

$$H = k_2 \left(\frac{v_{0b}^2 Q}{v_{0s} s} \right)^{1/3} \quad (2)$$

式中：对于潮汐河口， A 、 H 分别为平衡河段平均中潮位下平均断面面积和平均水深； Q 、 s 分别为平衡河段的多年平均落潮流量和平均水体含沙量； v_{0s} 和 v_{0b} 分别为悬沙和床沙的起动流速， $v_0 = 2.24 \cdot$

$\sqrt{\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} gd}$ ， ρ_s 为泥沙颗粒密度， ρ_w 为水密度， g 为重力加速度， d 为泥沙粒径； k_1 、 k_2 为系数。

上述河相关系揭示了自然状态和工程后潮汐河段及汉道河床演变趋于相对稳定状态时槽槽几何形态和水力、泥沙条件之间的关系。暂不考虑河床调整过程中泥沙粒径的变化，则由式(1)、(2)可知，稳定河段及汉道的落潮平均流量与平均断面面积、平均水深及水体含沙量之间应有如下关系：

$$Q = k_1 A^{9/8} s^{1/4} \quad (3)$$

$$Q = k_2 H^3 s \quad (4)$$

对于汉道的航道整治工程，工程开始前通航汉道可视为处于基本稳定状态。工程期间，水力、泥沙条件即 Q 、 s 均发生变化。工程完成后，经过调整，通航汉道的平均断面面积和平均水深发生改变，在实际的汉道分流比情况下，这种平均断面面积及水深的改变可能符合、也可能偏离河相关系所表述的稳定关系。计算实际分流比与河相

关系所反映的稳定分流比之间偏离的程度，即可对整治工程对汉道稳定性的影响加以量化评估。

2 北槽分流比和河相特征统计

赵捷等^[2]根据1998—2010年期间大通站年输沙量以及南北港、南北槽分沙比实测资料，统计得到流域来沙在各主要汉道之间的分配格局，见表1。由表1可知，不同水情年份，南北支、南北港的分流、分沙格局无显著变化，而北槽分流、分沙则随航道整治工程的推进而持续下降。

表1 1998—2010年长江口各主要汉道分沙比统计结果

区段	位置	分沙比/%			
		1998 (洪水年)	2006 (特枯年)	2010 (平水年)	平均
南北支	北支	5	5	5	5
	南支	95	95	95	95
南北港	北港	60	49	52	52
	南港	40	51	48	48
南北槽	北槽	58	41	33	44
	南槽	42	59	67	56

图1为1950年以来大通站逐年流域径流及悬沙来沙量过程^[3]，结合表1可知，1998—2002年，三峡工程之前，年均进入北槽的流域来沙量约0.75亿t，2002—2015年期间下降到0.21亿t，即北槽水体含沙量中，属于流域来沙补给的部分大幅减少，而受泥沙补给来源多元化影响，北槽水体含沙量仍维持在汛期1~1.5 kg/m³的水平。但自2012年起，尤其是2015年后，北槽含沙量趋势性下降，同时这一趋势性下降的现象也出现在北港和南槽，下降幅度均在50%以上，见图2。

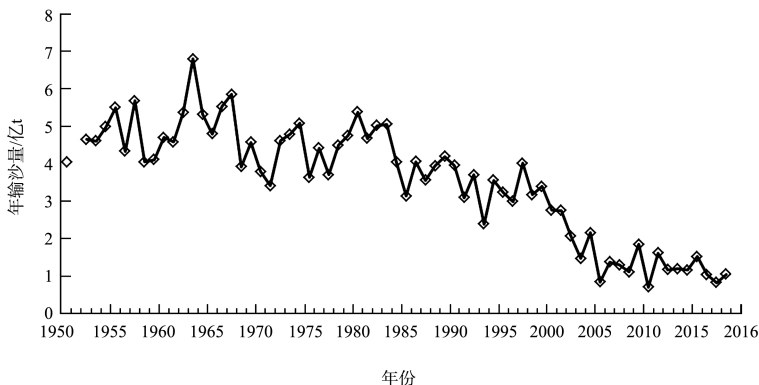


图1 1950—2018年大通站年输沙量变化

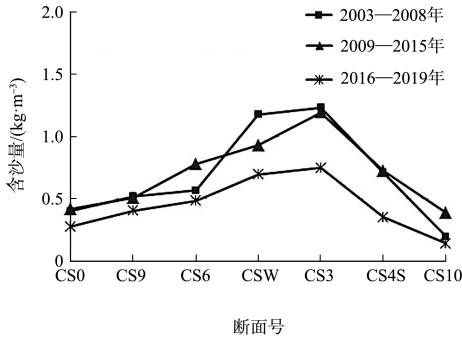
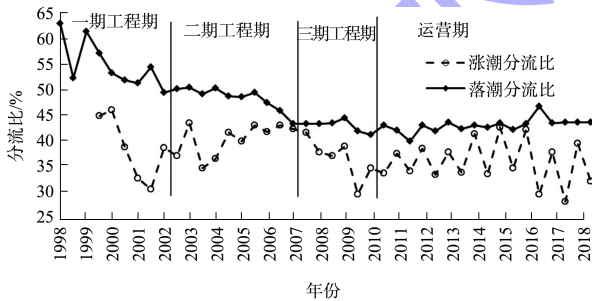


图2 长江口北槽洪季落潮含沙量变化

随着长江口深水航道整治工程实施, 涨落潮水流逐渐集中于北槽沿线, 与两侧滩面的漫滩水沙交换减少。因此, 断面分流比的变化更能反映对北槽整体河槽的影响。如图3所示, 随着工程的推进, 北槽落潮分流比呈现台阶式下降趋势。1998—2002年为一期工程阶段, 分流比从约60%降至约50%; 2002—2007年为二期工程及河势调整期, 分流比从50%降至42%; 2007年之后为三期工程及减淤工程实施阶段, 2010年后分流比基本稳定在42%。在这期间, 涨潮分流比受落潮流的影响开始加大, 年内呈现明显的洪枯季节特征, 但年际间未呈现明显的趋势性变化。



注: 分流比统计断面位于北槽上段。

图3 长江口深水航道工程北槽涨、落潮分流比变化

对北槽南北两侧丁坝间主槽水域进行河槽特征的分段统计, 区段划分见图4, 统计数据不包括深水航道维护部分, 统计结果见图5~6、表2^[4]。统计显示: 1999年5月—2019年5月, 北槽各段主槽容积、平均断面面积和平均水深的发展, 除2006—2009年期间有所停滞外, 均显示出逐渐增加的趋势。

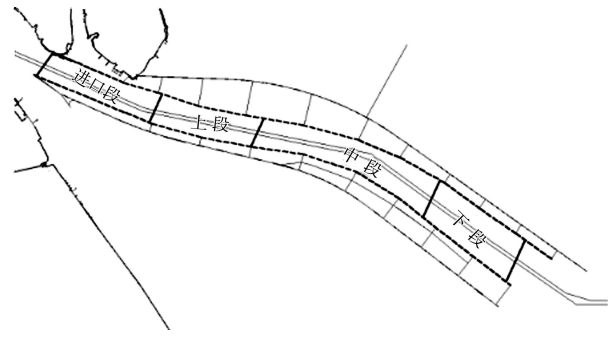


图4 统计范围及区段划分

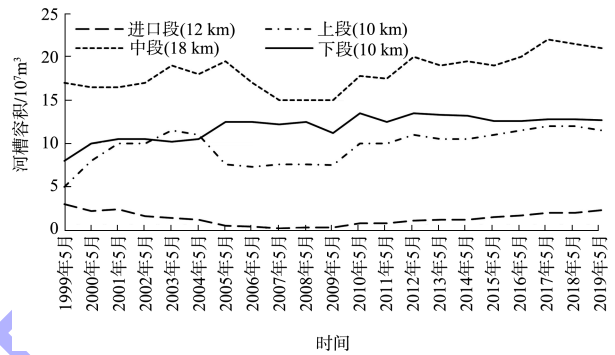


图5 北槽-5 m以下河槽容积

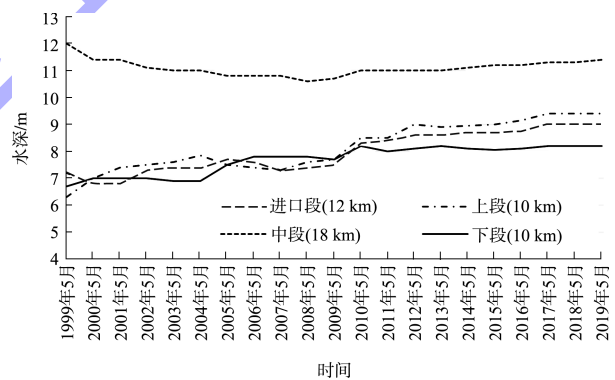


图6 北槽-5 m以下河槽平均水深

表2 北槽平均断面面积及水深变化

时间	平均断面面积/万 m ²	平均水深/m	时间	平均断面面积/万 m ²	平均水深/m
1999年5月	0.58	7.90	2010年5月	0.74	8.87
2000年5月	0.61	7.86	2011年5月	0.72	8.85
2001年5月	0.69	7.93	2012年5月	0.80	9.03
2002年5月	0.69	8.05	2013年5月	0.77	9.04
2003年5月	0.70	8.04	2014年5月	0.78	9.07
2004年5月	0.71	8.09	2015年5月	0.77	9.09
2005年5月	0.70	8.26	2016年5月	0.80	9.14
2006年5月	0.65	8.30	2017年5月	0.86	9.32
2007年5月	0.61	8.19	2018年5月	0.85	9.32
2008年5月	0.62	8.23	2019年5月	0.83	9.34
2009年5月	0.60	8.27			

3 航道稳定性评估

根据涨落潮分流比随北槽整治工程的变化特征,选取具有趋势性变化的落潮分流比和水体含沙量为研究参数,分析主槽区河相特征的相应变化。首先,可以认为深水航道治理工程开始前(t_0 ,1999年5月),北槽河槽形态是基本稳定的,此时北槽下断面落潮分流比约为60%。之后,随着治理工程实施,北槽的落潮分流比和断面尺度均发生变化。取3个节点的分流比和河槽尺度的变化,分别估计北槽的稳定性。这3个节点分别是 t_1 2002年(一期工程完成),下断面分流比为50%; t_2 2007年(二期工程完成),下断面分流比约42%; t_3 2019年(三期及减淤工程完成),下断面分流比稳定在42%左右,北槽水体含沙量(汛期平均)2012年之前稳定维持在 1.5 kg/m^3 左右,2012年之后逐年下降,按趋势估计,2019年约为 0.4 kg/m^3 (图7)。由式(3)、(4)计算各时间节点符合河相关系的北槽落潮量,并与实际的分流量进行对比,依此对北槽的稳定性作出评估。

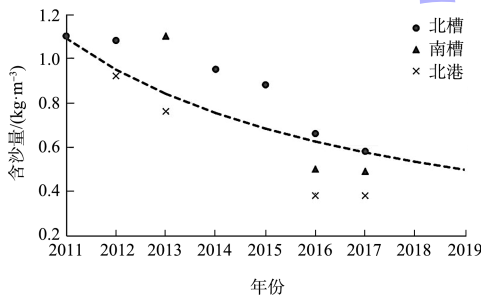


图7 长江口拦门沙汉道汛期水体含沙量变化

1) t_0 (1999年5月)~ t_1 (2002年5月)。由式

(4), t_0 和 t_1 北槽落潮流量 Q_0 和 Q_1 之比为: $\frac{Q_0}{Q_1} =$

$$\left(\frac{H_0}{H_1}\right)^3 \left(\frac{S_0}{S_1}\right) = 0.949$$

因此,为了达到稳定的平均水深 $H_1 = 8.04\text{ m}$,应有 $Q_1 \geq 1.05Q_0$;而实际的 Q_1 ,由于分流比从60%下降至50%,比 Q_0 减少了16.7%,一期工程后,北槽的分流量不足以支撑实际河槽平均水深的增加幅度。

再看断面稳定性,由式(3)得: $\frac{Q_0}{Q_1} = \left(\frac{A_0}{A_1}\right)^{9/8}$.

$$\left(\frac{S_0}{S_1}\right)^{1/4} = 0.823$$

,即为了达到稳定的平均断面面积 $A_1 = 6900\text{ m}^2$,应有 $Q_1 \geq 1.11Q_0$,而实际 Q_1 减少了16.7%。因此一期工程后,北槽理论上的河槽容积和平均断面面积应小于实际情况。实际的增加在一定程度上得益于航槽疏浚,人为平衡了自边滩向挖槽输送的泥沙量。

2) t_0 (1999年5月)~ t_2 (2007年5月)。同法,由式(4)计算得 $Q_0/Q_2 = 0.897$,即为了维持新的稳定水深,要求 $Q_2 \geq 1.11Q_0$,由于分流比从60%下降至42%,实际的 Q_2 减少了30%。因此,二期工程后北槽的实际分流量与支撑北槽水深增幅的需求流量间的差距进一步加大。

由式(3)计算得 $Q_0/Q_2 = 0.945$,即为了维持新的稳定河槽容积(平均断面面积),要求 $Q_2 \geq 1.06Q_0$,而实际的 Q_2 比 Q_0 下降了30%。即,在北槽平均水深和断面面积的增加过程中,对疏浚维护作用的依赖程度进一步扩大。

3) t_0 (1999年5月)~ t_3 (2019年5月)。至2019年,北槽水体含沙量已明显减少。同法由式(4)计算得 $Q_0/Q_3 = 2.27$,即为了维持新的稳定水深,只要求 $Q_3 \geq 0.44Q_0$,而实际 Q_3 比 Q_0 仅下降了30%。因此对现北槽平均水深而言,得益于水体含沙量减少,现分流量总体是满足需求的。

由式(3)计算得 $Q_0/Q_3 = 0.930$,即为了维持新的稳定河槽容积(平均断面面积),要求 $Q_3 \geq 1.08Q_0$,而实际 Q_3 比 Q_0 下降了30%,所以理论上河槽容积(平均断面面积)应小于当前实际值。

也就是现北槽的水沙动力可支撑河槽平均水深的维持乃至适度增加,但难以支撑现河槽容积(平均断面面积)的维持,河槽存在束窄发展或断面形态的调整。同样,在此过程中,疏浚工程对平衡主槽输送泥沙量、稳定河槽容积起到了积极作用。同时,水体含沙量的减少使得深水航道可维护性增强,2012年后,深水航道回淤量开始下降(图8)。

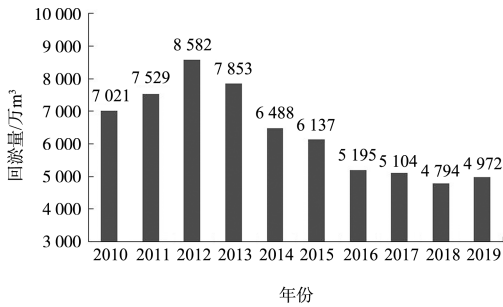


图8 北槽 12.5 m 航道常态回淤量变化

4 结语

1) 长江口既是典型的分汊河口, 其北槽也是深水航道最为主要的整治和维护区段。针对长江口深水航道治理工程实施以来, 北槽落潮分流比台阶式大幅下降, 本文应用窦国仁河相关系开展北槽汉道稳定性的探讨研究。认为北槽整治工程可产生的河相调整幅度小于实际增幅, 其中航道区域常年的疏浚维护人为减少了主槽输移泥沙, 对主槽容积和平均水深的增加起到了重要作用。

2) 当前的北槽水体含沙量低值环境已可支撑

(本文编辑 武亚庆)

主槽平均水深的稳定, 但主槽仍存在容积减小等不稳定性, 须通过适量疏浚工程以维持平衡。

3) 受基础资料限制, 本文研究过程中忽略了泥沙粒径的变化, 同时以分流比的变化作为参照, 代替了平均流量的变化, 因此, 该研究仅为半定量式的探讨和一种工程后汉道稳定性评估的方法研究。

参考文献:

- [1] 窦国仁. 平原冲积河流及潮汐河口的河床形态[J]. 水利学报, 1964(2): 1-13.
- [2] 赵捷, 何青, 虞志英, 等. 长江口北槽深水航道回淤泥沙来源分析[J]. 泥沙研究, 2014(5): 18-24.
- [3] 中交上海航道勘察设计研究院有限公司. 长江口北槽中下段及相邻水域水沙输移过程初步研究综合分析报告[R]. 上海: 中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 2018.
- [4] 上海河口海岸研究中心. 2019年度长江口河势跟踪分析报告[R]. 上海: 上海河口海岸研究中心, 2020.

(本文编辑 武亚庆)

(上接第 33 页)

- [2] LICK W. Diffraction of waves by a wedge[J]. Journal of the waterway, port, coastal and ocean division, 1978, 104(2): 119-133.
- [3] 洪广文. 不完全反射边界楔形堤和隅角堤波浪绕射理论解析解[J]. 海洋学报(中文版), 1990, 12(4): 487-504.
- [4] 楚玉川, 程建生, 赵鑫, 等. 圆弧型贯底式防波堤上波浪作用力的解析研究[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2014, 29(2): 212-217.
- [5] 陆志妹, 缪国平, 朱仁传, 等. V形贯底式防波堤上波浪作用力的解析研究[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2007, 22(1): 135-141.
- [6] CHANG K H, TSAUR D H, HUANG L H. Accurate solution to diffraction around a modified V-shaped breakwater[J]. Coastal engineering, 2012, 68: 56-66.
- [7] ISAACSON M. Solitary wave diffraction around large cylinder[J]. Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering, 1983, 109(1): 121-127.
- [8] ZHONG Z, WANG K H. Solitary wave interaction with a concentric porous cylinder system[J]. Ocean engineering, 2005, 33(7): 927-949.
- [9] 才瀚涛, 黄华, 詹杰民, 等. 孤立波与直立透空防波堤相互作用的解析研究[J]. 水运工程, 2019(5): 13-20.
- [10] 张敖, 黄华, 詹杰民, 等. 椭圆余弦波对圆弧型固防波堤的绕射波浪力[J]. 水运工程, 2017(3): 28-33.
- [11] 张敖, 黄华, 詹杰民, 等. 圆弧型贯底式透空防波堤对孤立波的绕射[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2017, 56(3): 8-16.

(本文编辑 王聰)