

## 潮波运动对长江口分流的影响

张 蔚, 傅雨洁, 过津侃, 冯浩川

(河海大学海岸灾害及防护教育部重点实验室, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 汉口分流是河流动力学中一个经典的科学问题, 感潮河段内的汉口由于受到潮波运动的影响, 会产生明显的剩余环流, 使其分流过程与非感潮河段汉口存在明显不同。为揭示潮波运动对汉口分流的影响, 引入分流不均匀系数概念, 以长江口为研究对象, 依据 2002 年地形建立平面二维数学模型。分别开展“无径”、“无潮”和“径潮”3 种情况模拟, 定量地分解出径流、潮流和径潮相互作用对分流的影响程度, 并探讨深水航道整治工程对分流过程的影响。结果表明: 潮波运动在枯季和洪季分别以 32.95% 和 35.71% 的程度对南北港分流不均匀系数产生抑制作用, 使分流趋于均匀。深水航道整治工程使得南港的径潮相互作用增强, 潮平均水位壅高, 减弱了径流向南港分配增加的趋势。

**关键词:** 潮波运动; 分流不均匀系数; 径潮相互作用; 数学模型; 长江口

**中图分类号:** TV148      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-6791(2018)04-0551-06

潮汐分汉河口是一种比较常见的河口形态, 径流在该区域的分配状态对其他物质的分配起到了基础性的作用。分流的变化会导致下游汉道水、沙输移平衡及河相关系相应的调整, 进而对整个河口的演变产生重要影响<sup>[1]</sup>。长江口由于存在深水航道整治等重大工程, 因此, 其汉口流量分配过程一直广受关注, 陈吉余院士甚至将其比喻成治理好长江口的“牛鼻子”。茅志昌等<sup>[2]</sup>研究指出长江口北支的分流比在 1915 年到 1958 年间, 从 25% 降到了 8.7%, 李路和朱建荣<sup>[3]</sup>进一步指出该分流比已降低到 5% 以下, 陶晓东<sup>[4]</sup>指出目前仅 1%~2%。刘杰等<sup>[5]</sup>利用 1998—2006 年的水深测图和南北槽水流、泥沙测量资料, 研究了长江口深水航道治理工程实施后南、北槽分流比的变化过程、原因及其与分汉口处河床冲淤演变的关系。但以往的研究主要关心长江口分流比数量上的变化, 而忽略了周期性潮波运动这一重要的动力因素对流量分配的影响。

位于河口地区的潮汐汉口作为汉口<sup>[6]</sup>的一种类型, 受潮汐影响汉口的流量分配规律与无潮河段的河流汉口显著不同。潮波在潮汐汉道上溯向汉口“汇”的过程中, 由于各汉道在粗糙度、长度、深度以及宽度的不同, 导致潮波传播至汉口处时存在着相位差, 进而产生了潮汐汉口处余环流, 这使得潮汐汉口的流量分配过程随潮汐作周期性的变化<sup>[7]</sup>。近年来, 随着对河口径潮相互作用认识的加深, 发现周期性潮波运动可以减小或者增加潮汐汉口流量分配的不均衡性<sup>[8]</sup>。Buschman 等<sup>[1]</sup>首先通过理想潮汐汉口模型的研究发现了潮波运动对潮汐汉口的流量分配产生明显的控制作用, 并把此作用主要归因于斯托克斯通量, 这对潮汐汉口的流量分配具有重要的意义。Sassi 等<sup>[9]</sup>通过对 Mahakam 潮汐汉口现场观测, 研究了潮汐影响下汉口的流量分配情况, 发现潮波对该区域河口汉道的流量分配有明显的限制作用。随后, 将水力几何形态关系中的潮波对断面形态的作用单独分解出来, 量化其对河网分流时空分布规律的影响, 研究发现越往下游, 潮波对河道的塑造作用越强, 从而对流量分配的控制作用越强<sup>[10]</sup>。Zhang 等<sup>[11]</sup>首先研究了潮波作用对长江口南北支分流过程的影响, 通过不同动力因素对通量贡献度的剥离, 发现潮波运动导致了斯托克斯通量以及欧拉回归通量之间的不平衡, 这一不平衡状态使得在枯季时北支潮周期平均通量向上游传播, 从而对枯季存在的北支倒

**收稿日期:** 2017-10-09; **网络出版时间:** 2018-05-16

**网络出版地址:** <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20180514.1027.012.html>

**基金项目:** 国家重点研发计划资助项目(2017YFC0405401); 江苏省自然科学基金资助项目(BK20151499)

**作者简介:** 张蔚(1979—), 男, 江苏南京人, 教授, 博士, 主要从事河口海岸水动力学、近海潮波运动及河口地貌演变等研究。E-mail: zhangweihu@126.com

灌现象做出了机理上的解释。然而,有关潮波运动对长江口南北港分流影响的研究仍然较少,这一潮汐汉口处在南支主汉道中,对长江口深水航道整治工程的影响更为直接,具有深刻的现实意义。因此,在前期潮波作用对长江口南北支分流过程影响的研究基础上<sup>[11]</sup>,此次以南北港为主要研究对象,深入分析潮波这一主要海岸动力对其流量分配的作用,并探讨深水航道整治工程的影响。

## 1 长江口整体平面数学模型

### 1.1 模型简介

本文研究在前述工作的基础上进行,模型采用 Zhang 等<sup>[11]</sup>建立的长江口整体平面二维水动力数学模型。模型采用 2002 年长江下游水下地形,与 2002 年水文条件相适应。上游边界采用大通实测流量,下游边界潮位由长江口主要分潮调和得出,水文条件符合长江口潮波和径流的一般情况。

建立数学模型的上边界到潮波作用消失的地方,即潮区界大通站,而下边界到陆地径流影响几乎消失区域,因此,长江口外海边界分别取南、北、东三面开边界,南边界为北纬 29°30'N,北边界为北纬 32°30'N,东边界为东经 124°30'N。模型范围如图 1 所示。

模型覆盖整个长江河口和杭州湾的主要区域。模型采用正交曲线网格,形状符合河口岸线,网格步长在 36~3 173 m 不等,网格在汉口处加密处理,并通过敏感性分析,以保证计算结果不会受到网格精度的影响。上游边界由大通水文站实测流量数据驱动。外海开边界由东中国海潮波数学模型提供天文潮位边界<sup>[12]</sup>。初始水位和流速取 0。模型分洪季与枯季进行计算,洪季计算从 2002 年 9 月 1 日 01:00 到 10 月 16 日 00:00。枯季计算从 2002 年 2 月 11 日 01:00 到 4 月 1 日 00:00。

### 1.2 模型率定与验证

利用 2002 年 9—10 月洪季以及 2002 年 2—3 月枯季位于河口区的 8 个潮位站点逐时水位以及 5 个流速定点观测的流速资料,对长江口整体平面二维数学模型进行率定与验证,具体位置见图 2。本文工作在 Zhang 等<sup>[11]</sup>基础上进行,模型验证良好,验证结果详见文献[11]。

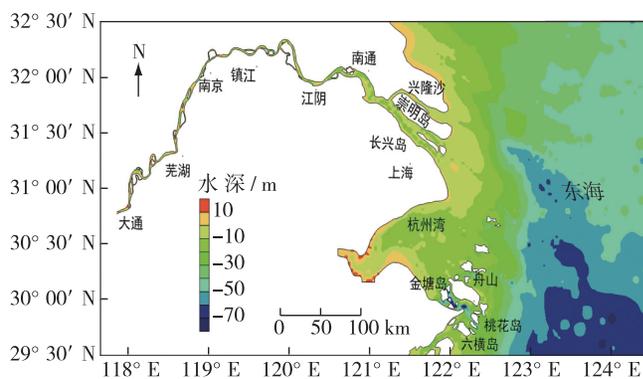


图 1 长江河口范围示意

Fig. 1 Map of the Yangtze Estuary

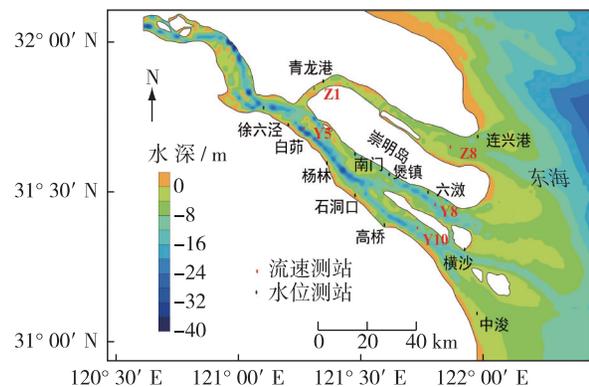


图 2 测站位置示意

Fig. 2 Location of measurement stations

## 2 潮波对长江口分流的影响程度

### 2.1 长江河口分流不均匀系数

为了量化周期性潮波运动对汉口分流的影响程度,引入了分流不均匀系数(Discharge Asymmetry Index, DAI)的概念<sup>[1]</sup>:

$$\psi = \frac{\bar{Q}_1 - \bar{Q}_2}{\bar{Q}_1 + \bar{Q}_2} \quad (1)$$

式中: 上标“-”表示潮周期平均, 本文取全日潮周期平均, 即 24 h 50 min 数据平均; 且流量正负性规定为向海侧为正, 向陆侧为负。Q 代表汉道断面流量, 下标 1 和下标 2 分别代表南侧与北侧的支汉, 当水流量在两个汉道平均分配时, 分流不均匀系数  $\psi$  为 0, 而当南侧日均流量较大时, 值为正, 当北侧日均流量较大时, 值为负; 且分流不均匀系数的绝对值越大, 代表分流状态越不均匀, 绝对值越小, 则代表越均匀。在两侧汉道日均流量均为正值的情况下, 分流不均匀系数的值会在-100%到 100%之间变化。

通过模型计算了 2002 年洪枯季长江口南北港分汉口的分流不均匀系数。图 3 显示了这一分汉口处分流不均匀系数  $\psi$  与日平均水位  $\langle \eta \rangle$  之间的关系。由于潮波运动周期性变化的影响, 日平均水位呈现明显的大小潮循环波动; 同样是潮波运动的缘故, 分流不均匀系数一般会呈现出大小潮周期波动。南北港分汉口的分流不均匀系数均为负值, 且变化范围较大, 数值大致在-40%和 0 之间变化。南北港分流不均匀系数变化与日平均水位变化的相位差异较小, 造成这种现象的原因是由于南港与北港汉道之间地形差异相对较小, 对潮波传播的影响也趋于同步; 大潮与小潮期间不同的水位对潮周期内摩阻的改变不同, 这使得潮周期内水位梯度的改变程度不同, 进而导致分流状态的变化。同时, 在大潮时, 分流不均匀系数绝对值小于小潮时分流不均匀系数绝对值。也可以说, 在南北港, 无论洪枯季, 潮波作用较强情况下的分流状态相对于潮波作用较弱的情况下更为均匀。

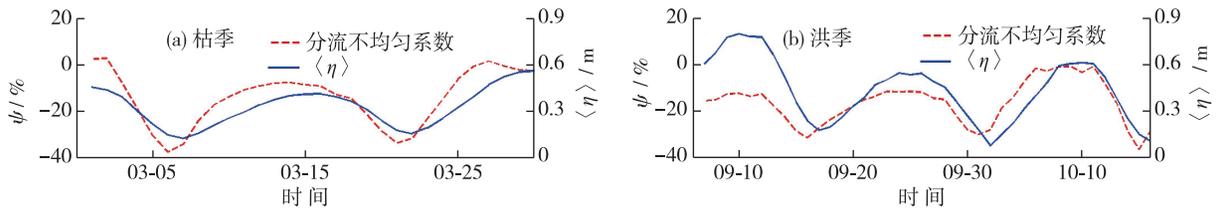


图 3 2002 年南北港枯季、洪季分流不均匀系数与日均潮位相关关系

Fig. 3 DAI and  $\langle \eta \rangle$  as a function of time at the South and North Channel bifurcation during the dry season and wet season in 2002

## 2.2 潮波对长江河口分流的影响程度分析

为了系统地分析潮波对河口分流状态的影响程度, 依据本文设定的“无径”、“无潮”和“径潮”3 种不同的模拟情况, 将分流不均匀系数按下式分解<sup>[13]</sup>:

$$\psi = \psi_r + \psi_t + \psi_n \quad (2)$$

无潮指模型模拟的一种边界情况, 将外海边界设置成没有潮汐作用的边界, 即外海边界设置为恒定不变的海平面。此时, 模型系统不存在潮波运动, 只有上游径流的影响, 其中,  $\psi$  代表正常边界条件, 即上边界赋值流量, 下边界赋值潮位过程得到的长江口分流不均匀系数;  $\psi_r$  代表仅在径流作用下, 而下边界无潮波波动, 只赋值平均潮位, 模拟得出的分流不均匀系数;  $\psi_t$  代表上边界无径流流量, 下边界赋值潮位过程得到的分流不均匀系数;  $\psi_n$  代表径、潮非线性作用的分流不均匀系数, 虽然是小量, 但不可忽略不计, 可以由  $\psi$  减去  $\psi_r$  以及  $\psi_t$  计算得出。 $\psi_t$  与  $\psi_n$  可反映由于潮波运动对汉口产生的不均匀系数, 可由  $\psi - \psi_r$  获得, 而  $(\psi - \psi_r) / \psi_r$  (以百分比值显示) 就可以认为是潮波运动相对于径流作用对潮汐汉口流量分配的影响程度。 $(\psi - \psi_r) / \psi_r$  的值为正, 则代表潮波对仅在径流作用情况下的分流不均匀状态产生了促进作用, 即潮波运动增加了河口分流的不均匀程度; 若其值为负, 则代表产生了抑制作用, 即减弱了河口分流的不均匀程度。

图 4 与图 5 分别为洪季及枯季长江口南北支与南北港两个分汉口的  $\psi$ 、 $\psi_r$  与  $(\psi - \psi_r) / \psi_r$  的值。这 6 组数据分别为由洪季及枯季各自模拟时段内平均所得, 其中南北支结果由 Zhang 等<sup>[11]</sup> 得出, 此处用以与南北港结果进行比对。可以看出, 在南北支分汉口, 潮波的影响在洪季与枯季有着较大区别, 在洪季, 潮波对仅在径流作用状况下的分流状态有着微弱的抑制作用 (-0.93%), 抑制流量向南支分配, 而促进流量向北支分配。而在枯季, 则有约 13% 的促进作用<sup>[11]</sup>。由于南北支之间存在较大的地形差异, 且南北支分汉口距离口

门较远, 潮波对南北支的影响相对较弱。相比而言, 潮波对南北港分流的影响较强, 且南北港洪季与枯季之间的区别较小。潮波运动对南北港洪季(-35.71%)与枯季(-32.95%)的分流状态均有较为明显的抑制作用, 促使南北港汉口的分流状态趋向于更加均匀。因此, 从总体来看, 潮波运动在枯季增加了南北支的分流不均匀性, 但对南北港的分流不均匀性产生了抑制作用, 使南北港分流更趋于均匀; 在洪季, 潮波运动对南北支与南北港汉口都起到抑制其分流不均匀的作用, 使得其流量分配状态更趋于均匀。针对洪枯季径潮比的不同, 并结合南北支以及南北港之间分流状态的对比可得知: 在一般径潮比状态下, 潮波对分流不均匀性产生抑制作用, 而在径潮比很小的状态下, 潮波作用会扭转受径流影响的分流状态而促进分流不均匀性的扩大。

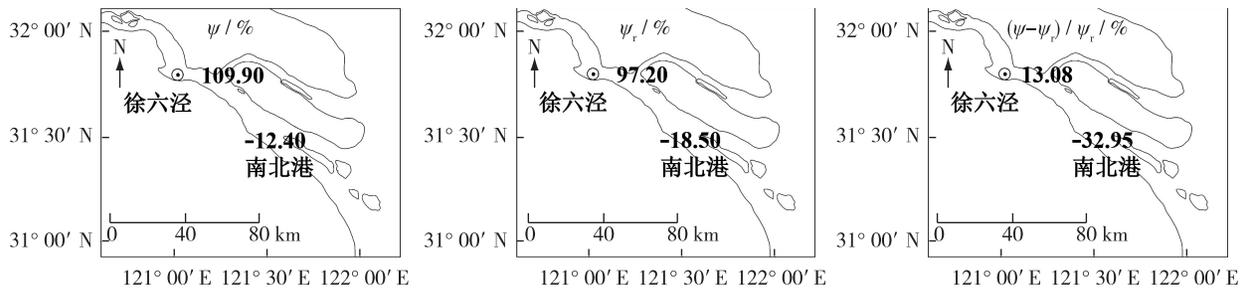


图4 长江口枯季潮汐相关性影响程度示意

Fig. 4 Relative difference at bifurcations in Yangtze Estuary during the dry season

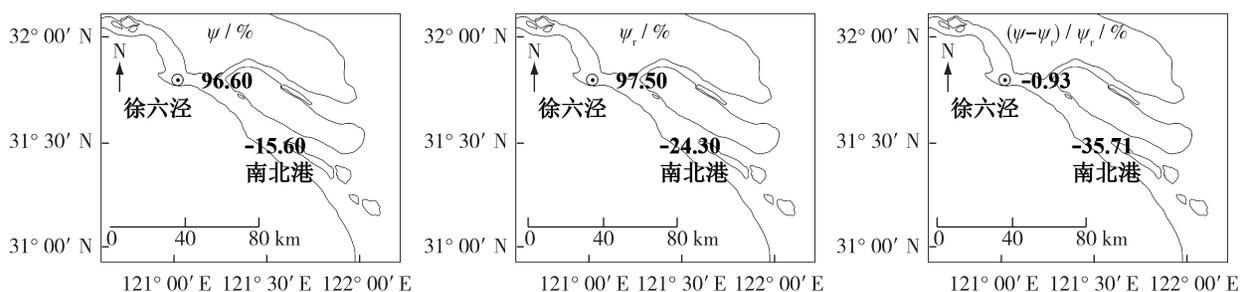


图5 长江口洪季潮汐相关性影响程度示意

Fig. 5 Relative difference at bifurcations in Yangtze Estuary during the wet season

### 3 讨 论

从河口演变的角度考虑, 潮波运动对南北港分流不均匀性的抑制趋势有益于南北港汉道以及分汉口的稳定。入海汉道的稳定性是长江口深水航道治理工程关注的重要问题之一, 因此, 潮波运动的影响也是这一工程实施过程中所需要考量的重要因素。潮波运动趋向于使更多上游径流分配给南港, 抬高了南港汉道的平均水位, 在一定程度上改善了南港及其下游河段的通航条件, 这一趋势对将南港以及北槽作为主航道的航道治理工程有着积极的现实意义。

另一方面, 长江口深水航道整治工程的实施, 在大范围空间尺度上对长江口地貌产生了较大影响。目前深水航道治理工程以“南支-南港-北槽”作为主航道予以疏浚加深, 使得这一系列汉道过流条件进一步优化, 南北港分流格局也因此而发生进一步变化。上游径流将更多的分配给南港, 而潮波运动则会在一定程度上抑制这一趋势的扩大。具体而言, 浚深的汉道不仅使得上游径流更容易流向南港, 也会使潮波更容易通过北槽向南港传播。因此, 南港的径潮相互作用增强, 潮周期内平均水位将壅高。南港平均水位的升高使得上游径流向南支和南港分配增加的趋势得到减弱。

通过这一过程的分析发现潮波运动产生的水位梯度对潮汐汉口分流过程会起到明显的控制作用。当潮波传至近岸进入河网时, 由于受到陆地径流、浅水地形和底部摩阻等作用, 生成新的倍潮与复合分潮<sup>[14]</sup>, 潮

波发生扭曲变形, 产生附加的水面坡度, 使得河网汉口间的水面线更加陡峭<sup>[8]</sup>。

为了研究南港与北港这两条汉道平均水位分布的异同, 对汉道长时间平均水位进行计算, 并观察其沿程分布。通过计算, 分别得出枯季与洪季分布示意图(图6)。图中黑色代表长江主槽“南支-南港”河道, 红色代表北港河道, 图示结果由洪季及枯季各自模拟时段水位数据整体平均所得。从图6可以看出, 南港与北港之间的长时间平均水位存在较明显差别。由于洪季上游来流较大, 因此, 其平均水位比枯季略高。无论洪季与枯季, 北港的长时间平均水位均高于南港, 且北港长时间平均水位向下游的坡度更为缓和, 上游来流向北港分配的趋势受到抑制, 这与南北港的 $(\psi - \psi_r) / \psi_r$  洪季(-35.71%)及枯季(-32.95%)结果对应。

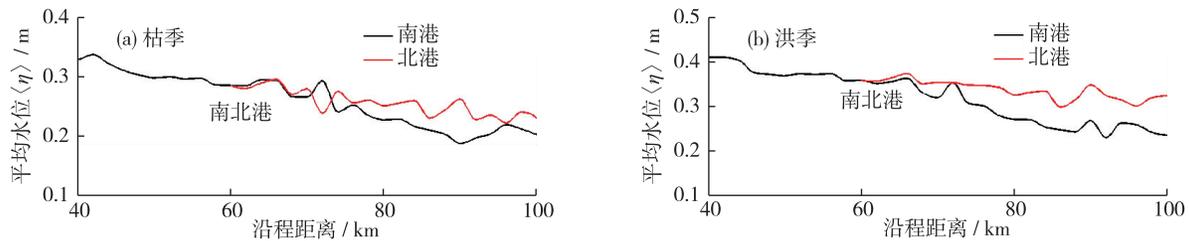


图6 2002年长江口南北港枯季及洪季长时间平均水位沿程分布示意

Fig. 6 Water level profiles at the South and North Channel generated during dry season and wet season in 2002

从以上结果可以看出, 潮波与径流相互作用在河口各汉道内形成相对较稳定的长时间平均水位分布对上游来流的分配状态可以产生较强的影响。具体来说, 相邻汉道之间的长时间平均水位差会影响上游来流对这两条汉道的分配。上游来流向长时间平均水位较高一侧汉道的分配会受到抑制, 反之, 水流量向长时间平均水位较低的一侧汉道的分配会受到促进。

## 4 结 论

本文建立上至潮区界下至口外海滨的长江口整体平面二维水动力模型, 通过“无径”、“无潮”、“径潮”3种边界条件的设置, 从而定量剥离径流、潮流和径潮非线性作用对长江口南北港分流过程的影响。研究发现潮波运动对汉口分流起到不可忽视的作用, 具体结论如下:

(1) 在潮波运动较强时, 分流不均匀系数绝对值较小, 即分流更为均匀; 而潮波运动较弱时, 则与之相反。

(2) 由于南北港的地形差异不大, 潮波起到抑制其分流不均匀过程的作用, 从而使南北港汉道分流趋于相等。

(3) 潮波运动对汉口分流的影响可以通过相邻汉道间潮周期平均的水位分布得以体现, 上游来流向平均水位较高一侧汉道的分配会受到抑制, 而对水位较低侧汉道的分流则会得到促进。

### 参考文献:

- [1] BUSCHMAN F A, HOITINK A J F, van der VEGT M, et al. Subtidal flow division at a shallow tidal junction [J]. *Water Resources Research*, 2010, 46: W12515.
- [2] 茅志昌, 郭建强, 陈庆强, 等. 长江口北支河槽演变与滩涂资源利用[J]. *人民长江*, 2008, 39(3): 36-38. (MAO Z C, GUO J Q, CHEN Q Q, et al. Channel evolution and utilization of tidal flat resources in the North Branch of Changjiang Estuary [J]. *Yangtze River*, 2008, 39(3): 36-38. (in Chinese))
- [3] 李路, 朱建荣. 长江口枯季北港淡水向北支扩展的动力机制[J]. *水科学进展*, 2016, 27(1): 57-69. (LI L, ZHU J R. Dynamics mechanism of freshwater extension from the north channel to the north branch in the Changjiang Estuary in dry seasons [J]. *Advances in Water Science*, 2016, 27(1): 57-69. (in Chinese))
- [4] 陶晓东. 长江口北支综合整治问题分析和研究方向探讨[J]. *江苏水利*, 2016(5): 1-5. (TAO X D. The analysis and research

- direction of the comprehensive remediation of the Yangtze River [J]. *Jiangsu Water Resources*, 2016 (5): 1-5. (in Chinese))
- [5] 刘杰, 陈吉余, 徐志扬. 长江口深水航道治理工程实施后南北槽分汊段河床演变[J]. *水科学进展*, 2008, 19(5): 605-612. (LIU J, CHEN J Y, XU Z Y. River-bed evolution in the braided reach of the South and North Passage after implementing Yangtze Estuary deepwater navigational improvements [J]. *Advances in Water Science*, 2008, 19(5): 605-612. (in Chinese))
- [6] 孙志林, 金元欢. 分汊河口的形成机理[J]. *水科学进展*, 1996, 7(2): 144-150. (SUN Z L, JIN Y H. The formation mechanism of branch estuary [J]. *Advances in Water Science*, 1996, 7(2): 144-150. (in Chinese))
- [7] 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 Resource Research*, 2008, 44(8): 83-91.
- [8] HOITINK A J F, JAY D A. Tidal river dynamics: implications for deltas [J]. *Reviews of Geophysics*, 2016, 54(1): 240-272.
- [9] SASSI M G, HOITINK A J F, BRYE B D, 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.
- [10] SASSI M G, HOITINK A J F. River flow controls on tides and tidemean water level profiles in a tidal freshwater river [J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 2013, 118(9): 4139-4151.
- [11] ZHANG W, FENG H C, 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.
- [12] 章卫胜. 中国近海潮波运动数值模拟[D]. 南京: 河海大学, 2005. (ZHANG W S. Numerical models of tidal wave in margin seas near China [D]. Nanjing: Hohai University, 2005. (in Chinese))
- [13] STEIN U, ALPERT P. Factor separation in numerical simulations [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1993, 50: 2107-2115.
- [14] GODIN G, MARTINEZ A. Numerical experiments to investigate the effects of quadratic friction on the propagation of tides in a channel [J]. *Continental Shelf Research*, 1994, 14(7/8): 723-748.

## Influence of tidal motion on discharge distribution in Yangtze Estuary \*

ZHANG Wei, FU Yujie, GUO Jinkan, FENG Haochuan

(Key Laboratory of Coastal Disaster and Defence, Hohai University, Ministry of Education, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** Flow division is a classic issue encountered in river dynamics. Bifurcations in subtidal estuarine environments are influenced by river discharge as well as tidal motion. Residual circulation usually occurs in estuaries owing to the effect of tidal dynamics. Flow divisions that occur at bifurcations are generally more complicated compared to those occurring in regions without tides. This study aims at quantifying tidal influence on subtidal discharge distribution in the Yangtze Estuary through application of the discharge asymmetry index. A 2-D numerical model was developed based on the bathymetry of the estuary, as measured in 2002. To decompose the effect of tidal motion, river discharge, and river-tide interactions, the model was subjected to three independent operating conditions—river discharge and tides, river discharge only, and tides only. In addition, the effect of Deepwater Navigation Channels on flow division has been qualitatively explained. Through use of the proposed model, the discharge asymmetry index at the South and North Channel bifurcations was reduced by 32.95% and 35.71%, respectively, during the dry and wet seasons. As observed, the general effect of tides is to make flow divisions more even. In the South Channel, river-tide interactions were strengthened by construction of the Deepwater Navigation Channel. Consequently, the subtidal water level was enhanced, and the dominant trend of flow allocation to the South channel was weakened.

**Key words:** tidal motion; discharge asymmetry index; river-tide interaction; numerical model; Yangtze Estuary

---

\* The study is financially supported by the National Key R&D Program of China(No. 2017YFC0405401) and the Natural Science Foundation of Jiangsu Province, China (No. BK20151499).