

径流量变化对长江口北槽最大浑浊带影响分析

万远扬, 吴华林

Study on the effect of river inflow on estuarine turbidity maximum in the North Passage of the Yangtze Estuary

WAN Yuanyang, WU Hualin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12170/20210422001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

流域水沙变化和人类活动对长江口河槽演变的影响

New trends of river channel evolution of the Yangtze River estuary under the influences of inflow and sediment variations and human activities

水利水运工程学报. 2021(2): 1 <https://doi.org/10.12170/20200313001>

1958年以来长江口南、北支河段河床演变及影响因素研究

Riverbed evolution and its influencing factors in the South Branch and the North Branch of the Yangtze River estuary since 1958

水利水运工程学报. 2021(2): 27 <https://doi.org/10.12170/20210105003>

长江口盐水入侵对海平面上升的响应特征

Responses of saline water intrusion to sea level rise in the Yangtze Estuary

水利水运工程学报. 2018(1): 58 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2018.01.009>

长江口水源地取水口盐度对径潮动力的响应

Response of salinity at water source intakes to runoff and tidal dynamics of Yangtze River estuary

水利水运工程学报. 2018(5): 14 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2018.05.003>

2015年长江口航道运行维护特征分析

Characteristic analysis of dredging maintenance for Yangtze River estuary deepwater navigation channel in 2015

水利水运工程学报. 2017(2): 82 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2017.02.011>

长江口登陆台风增水数值模拟

Numerical simulation on surge due to landfall of typhoon in the Yangtze Estuary: Ampil (No. 1810) as an example

水利水运工程学报. 2021(1): 70 <https://doi.org/10.12170/20200525002>



扫码进入官网，阅读更多精彩内容



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI:10.12170/20210422001

万远扬, 吴华林. 径流量变化对长江口北槽最大浑浊带影响分析[J]. 水利水运工程学报, 2021(5): 1-7. (WAN Yuanyang, WU Hualin. Study on the effect of river inflow on estuarine turbidity maximum in the North Passage of the Yangtze Estuary[J]. Hydro-Science and Engineering, 2021(5): 1-7. (in Chinese))

径流量变化对长江口北槽最大浑浊带影响分析

万远扬^{1, 2, 3, 4}, 吴华林^{1, 2, 3, 4}

(1. 上海河口海岸科学研究中心, 上海 201201; 2. 河口海岸交通行业重点实验室, 上海 201201; 3. 长江深水航道水沙环境与工程安全交通运输行业野外科学观测研究基地, 上海 201201; 4. 国家内河航道整治工程技术研究中心, 上海 201201)

摘要: 长江口属巨型多级分叉河口, 由于受中等强度潮汐及季节性变化明显的径流共同作用, 其动力-地貌物理过程十分复杂。研究了长江口北槽最大浑浊带水沙动力与大通径流量的响应特征。聚焦于径流变化对河口最大浑浊带的三重作用: 一是水流起悬能力增强; 二是泥沙输运能力增大; 三是在河口最大浑浊带这个特殊区域, 由于河流效应, 还会引起河口环流增强及底部向陆方向的输运能力增加。实测资料和数学模拟结果表明: 对于长江口而言, 径流越大, 小流速的滩地由于动力增加而含沙量会越大; 但主流区由于流量增加的重重作用, 最大浑浊带含沙量并非单向增大, 而是最大浑浊带含沙量在上游流量为 30 000~40 000 m³/s 时达到最大。本研究定量分析了不同径流条件下河口泥沙悬浮状态, 可为长江口水域相关水土资源开发利用、生态环境保护及航道疏浚维护等工作提供参考。

关键词: 长江口; 北槽; 数学模型; 最大浑浊带

中图分类号: TV148

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2021)05-0001-07

长江口受到巨大的人海径流及中等强度潮汐的东海潮波入侵的双重影响(图1), 在近岸宽浅地貌及科氏力作用下, 潮波发生显著变形, 同时由于咸淡水混合作用, 导致了大小潮、表底层、深槽浅滩、洪枯季不同尺度和范围的潮汐不对称及环流现象, 会进一步影响河口泥沙的输运方向和输运能力, 从而影响河口动力地貌的发展。河口作为一个多元素融合、复杂而快速变化的动力系统, 由于受到不同周期外力共同作用, 其自身动力一直处于一个不断调整的状态中, 理解河口自身, 尤其是最大浑浊带的动力特性一直是河口海岸学的难题之一。从物理学机制来看, 受到絮凝沉降、盐度斜压力及紊动抑制等物理机制的共同作用, 河口最大浑浊带垂向流速、含沙量、紊流结构和盐度发生变异, 导致了河口不同区段物质输运和最大浑浊带的时空差异。为了解决河口地区很多工程实际问题, 在分析河口动力地貌系统基本特征和自然条件的基础上, 国内外学者们从潮汐径流相互作用、宏观变化和微观物理过程^[1]等多角度作了很多研究, 尤其以研究河口区域潮汐径流相互作用为主^[2-4]。Jay等^[5]研究了径流对潮汐衰减的作用; Wang^[6]分析了潮汐不对称产生的物理机制; 沈焕庭等^[7]分析了长江口的潮波传播速度、传播方向、代表潮差、涨潮历时等的变化, 定性地指出长江口径流量过大或者过小, 都不利于最大浑浊带的发育; 杨正东等^[8]分析了徐六泾以下若干站的年内潮差变化; 李佳^[9]发现洪季潮差在江阴以上比枯季要小; 路川藤等^[10]研究了径流影响下的潮汐传播特征; 陈吉余^[11]分析了径流与长江口平均海面 and 潮差的关系。总体上前人的研究主要关注潮汐径流相互作用对水动力及潮汐变形的影响, 鲜有定量关注径流量变化对最大浑浊带的影响, 尤其是对含沙量平面和纵向分布的影响^[12-13]。本研究尝试在现有河口物理机制认识水平基础上, 通过实测资料和数学模型研究长江口径流

收稿日期: 2021-04-22

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFC0405403)

作者简介: 万远扬(1981—), 男, 湖北监利人, 副研究员, 主要从事河口海岸工程研究。E-mail: sway110@qq.com

量对最大浑浊带的影响,厘清不同径流量条件下河口泥沙悬浮状态,为长江口区域相关水土资源开发利用、生态环境保护及航道疏浚维护等工作提供参考。

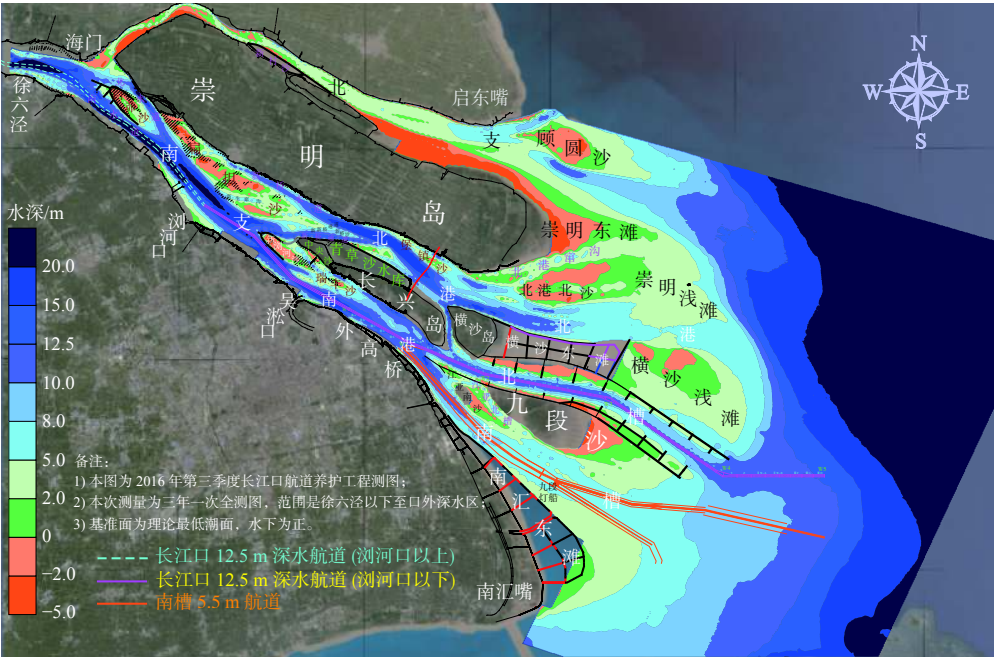


图 1 长江口河势格局
Fig. 1 Sketch map of the Yangtze Estuary

1 实测资料分析

长江口属巨型多级分汊河口,受到潮汐和径流的共同作用,其动力-地貌条件十分复杂。长江口大通站上游径流量变化幅度一般为 10 000~80 000 m³/s (见图 2)。

长江口大部分区域的潮流运动受东海前进潮波的控制,仅在北部部分地区受黄海旋转潮波的影响。传入长江口的潮波以半日分潮为绝对优势,以 M2 分潮为主。在传播过程中由于受到地形的影响发生反射和底摩擦等影响,成为以前进波为主的合成波。长江口口外为正规半日潮,口内为非正规半日浅海潮,一个太阴日内两涨两落,平均潮周期为 12 h 25 min,潮汐日不等现象明显。

长江口潮位、流速测站及航道单元布置见图 3,测量期间的大通流量及泥沙分层系数见表 1,其中泥沙分层系数为表底层含沙量的差异与平均值的比值,表征水体的层化程度。根据 2010—2018 年北槽最大浑浊带洪季底部及平均含沙量测量结果(图 4),分析可得:

(1)洪季北槽拦门沙最大浑浊带层化较为明显,洪季悬沙分层系数平均为 2.7,以 CSW 测点(位于北槽中段)为例,垂线平均值一般在 0.5~1.7 kg/m³,而底部含沙量值一般在 1.3~8.1 kg/m³;

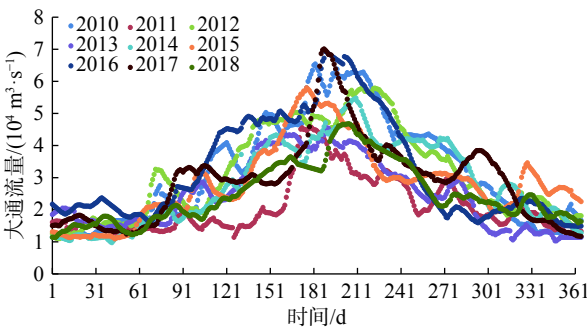


图 2 2010—2018 年大通流量变化
Fig. 2 Daily discharge of the Datong Station from 2010 to 2018

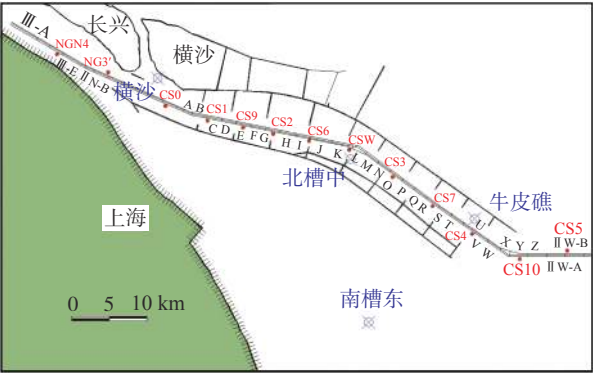


图 3 实测资料测站及航道单元布置

Fig. 3 Locations of the observation stations and channel cell

表 1 北槽固定垂线测验期间边界条件及泥沙分层系数（洪季大潮期）

Tab. 1 Boundary conditions of the measurement and the sediment stratification coefficient (spring tide of the flood season)

年份	流量/ ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	泥沙分层 系数	年份	流量/ ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	泥沙分层 系数
2010	60 000	2.39	2015	50 000	2.83
2011	30 000	3.17	2016	70 000	2.33
2012	47 000	2.88	2017	63 000	2.08
2013	39 600	2.53	2018	40 100	3.05
2014	46 200	3.01			

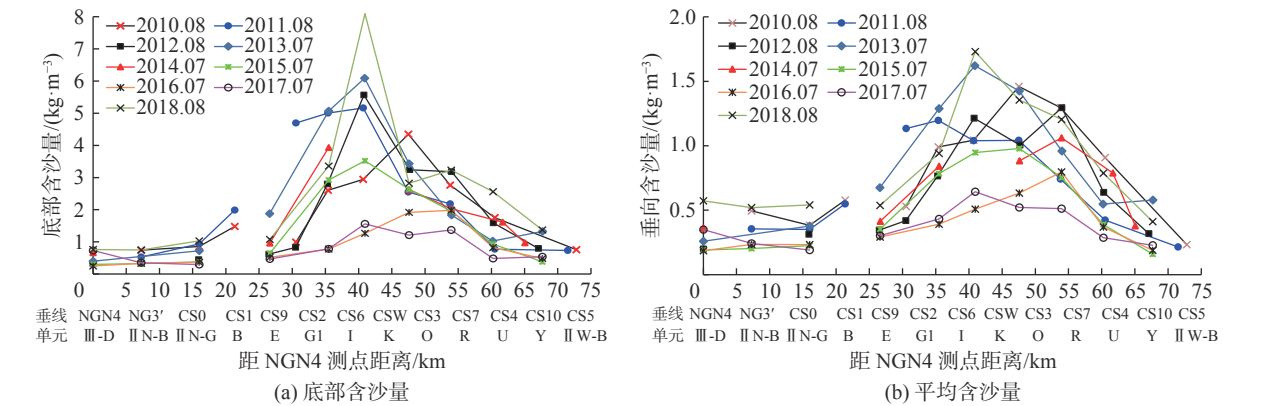


图 4 北槽最大浑浊带洪季大潮含沙量沿程垂向平均与底部年际变化

Fig. 4 Near-bed and depth-averaged sediment concentration along the deep-water navigational channel of the Yangtze Estuary during spring tide of flood seasons

- (2)大通流量在 30 000~40 000 m^3/s 时,泥沙分层系数较大,流量超过 60 000 m^3/s 后,分层系数会减小;
- (3)北槽最大浑浊带的位置较为稳定,主要在北槽中下段约 20 km 的范围,总体上流量越大最大浑浊带的核心位置越往下游侧摆动;
- (4)从年际变化来看,2010—2013 年整体含沙量相对较高,2014—2017 年有所减小,2018 年受台风影响含沙量较高。

2 数学模型简介

采用上海河口海岸科学研究中心开发的“长江口航道维护管理核心计算平台系统<SWEM2D/3D>”^[14]中的三维潮流泥沙模块进行数值模拟计算。该模型具有以下基本特点^[15]: (1)应用无结构化混合计算网格(三角形+四边形),使计算域能更好模拟长江口复杂的岸线。整体模型上游边界可以直接延伸到长江口的枯季潮区界(潮差为零的地方)大通。(2)采用有限体积法作为离散格式的基础,比有限差分法更贴近物理量守恒定律,能使计算总体精度得到有效保证。(3)采用半隐半显格式^[16],计算稳定性好。同时克服 ADI 计算格式中无法考虑不同方向流动之间相互作用的不足,且采用变时间步长计算,计算效率有所提高。(4)计算基于 Linux 系统,较 Windows 系统而言,能较好地兼顾模型的计算精度(最小网格尺度)和计算效率。(5)经多次应用于长江口的动态率定和验证,及与商业软件 MIKE21/3 和 Delft3D 的对照,证实了模拟结果与长江

口实测数据相似性良好, 并已成功应用于长江口多项工程的科研咨询。

数值计算网格见图 5, 计算范围西起上游的大通, 东至外海-40 m 等深线, 北边界接近渤海湾, 南边界包括杭州湾整个区域, 其中东西向的长度约 600 km, 南北向的宽度约 600 km。采用无结构化计算网格覆盖整个计算域, 且计算网格完全贴合工程建筑物的形状及走向, 对北槽局部区域加密, 最小网格间距约为 20 m, 网格单元总数为 97 657 个。

模型上游进口给定实测大通流量; 模型下游外海边界由 16 个分潮的天文潮波调和常数和余水位来给定。模型中的重要参数取值如下: (1) 沉降概率系数取值一般为 0~1.0, 本次取 0.2~0.6; (2) 冲刷系数一般为 0.000 04~0.000 50; (3) 根据经验及验证情况, 临界淤积应力为 0.2~0.4 N/m², 临界起动应力为 0.4 N/m²; (4) 沉降速度取值参考上海河口海岸科学研究中心的泥沙沉降机理实验经验公式^[17], 取值范围在 0.02~0.4 mm/s。本次研究的数学模型进行了严格的程序验证, 且验证结果符合相关标准规范的要求。限于篇幅, 详细的验证结果图表不一一列出, 请参考文献 [18]。

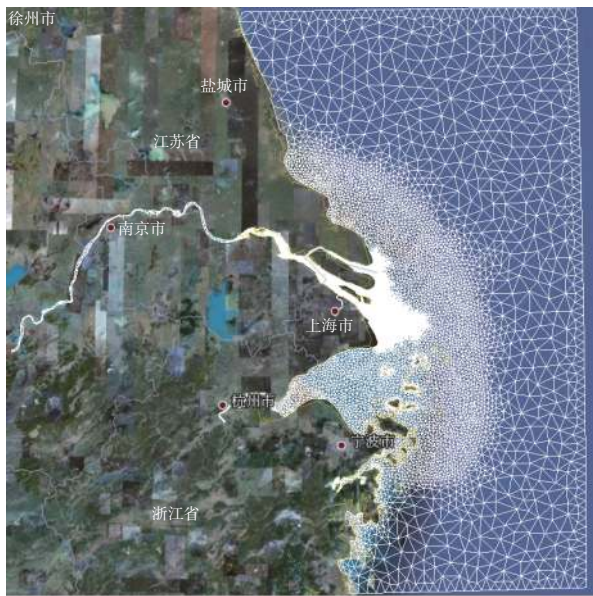


图 5 模型范围及计算网格

Fig. 5 Model domain and mesh distribution

3 计算结果分析

河口最大浑浊带形成和发育主要与细颗粒泥沙絮凝、层化、紊动抑制、河口环流等宏观和微观物理过程有关^[1], 本文主要聚焦于径流量变化对河口最大浑浊带的三重作用(泥沙再悬浮、河流效应和河口环流)及影响。

根据前述实测资料的分析可知, 径流变化会显著影响最大浑浊带的部位和含沙量水平。鉴于实测资料存在其他边界条件(如海况、地形、工程等)不统一的情况, 其可比性有所欠缺, 因此为研究径流量这个单一因子对长江口北槽最大浑浊带的影响, 采用三维数学模型进行单因子(径流量)敏感性试验。

计算水文条件采用典型洪季大潮期水文条件。采用长江口 2017 年整体 1 : 10 000 的实测地形, 外海采用海图地形。模型中考虑了长江口已有的大型涉水工程, 包括相关航道整治工程、水库工程和水利及河道整治工程。在验证 2017 年洪季水文资料的基础上, 修改上游径流流量, 流量范围为 20 000~80 000 m³/s, 分析径流量变化引起的北槽动力场和含沙量场的差异。计算结果见图 6, 为便于清晰对比, 将图中平均含沙量小于 0.2 kg/m³ 的区域全部白化。

首先, 从余流来看, 上游径流量越大, 南北槽内余流强度越大, 说明潮汐不对称性越强。由于径流和潮汐的相互作用(图 7), 使得北槽上段潮差在径流流量为 20 000~30 000 m³/s 时最大, 北槽中段潮差在径流量 40 000 m³/s 时最大, 北槽下段径流越大潮差越大, 这就是潮汐和径流相互作用后在空间分布上的差异。

在河口区域, 径流增加一般意味着水流动力增加, 它首先有两方面的作用: 一是起悬能力增强(泥沙再悬浮), 二是输运能力增加。在河口最大浑浊带, 由于“河流效应”, 往往还会有河口垂向环流增加, 这意味着底部向陆的输运也增加(第三重作用), 这 3 种作用的叠加就意味着最大浑浊带含沙量水平与上游来流流量的关系并非简单相关。图 8 的计算结果表明, 对于长江口而言, 动力较弱的滩地由于流速增加含沙量增大, 但主流区由于径流增加的三重作用, 最大浑浊带含沙量并非单向增大。最大浑浊带含沙量在径流量为

30 000~40 000 m³/s 时达到最大, 这与图 7 潮差与流量的关系基本对应。该结论与沈焕庭等^[7] 对长江口最大浑浊带定性认识基本一致。此外, 从图 8 亦可见, 随着流量的增加, 最大浑浊带的重心会逐渐下移, 峰值会有所减小。

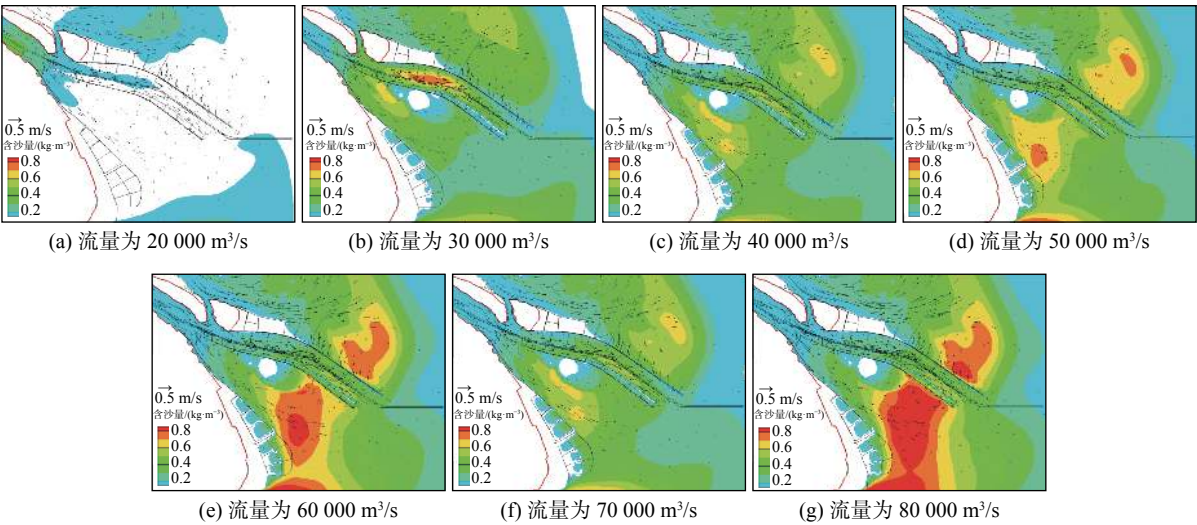


图 6 不同流量下南北槽 14 d 垂线平均含沙量场的分布及余流
Fig. 6 Distribution of the residual currents and 14 days-avaeraged sediment concentration in the North and South Passages under different discharges from 20 000 to 80 000 m³/s

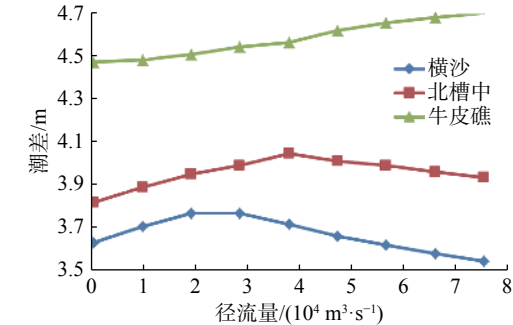


图 7 不同流量下横沙、北槽中和牛皮礁站潮差
Fig. 7 Tidal limits of the Hengsha, Beicaozhong and Niupijiao station under different discharges from 20 000 to 80 000 m³/s

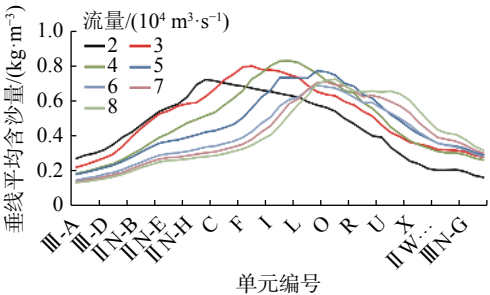


图 8 不同流量下北槽沿程平均含沙量分布
Fig. 8 Along-channel depth-averaged sediment concentration under different discharges from 20 000 to 80 000 m³/s

4 结 语

在实测资料分析的基础上, 建立了长江口水域三维水沙盐数学模型, 并利用该模型对径流量这个单一因子对长江口北槽水沙动力的影响进行了模拟计算和分析。实测资料和数模结果共同显示: 北槽拦门沙最大浑浊带层化较为明显, 大通径流量大小对最大浑浊带影响明显; 北槽最大浑浊带的位置较为稳定, 主要在北槽中下段约 20 km 的范围, 总体上流量越大最大浑浊带的核心位置越往下游侧摆动; 大通流量在 30 000~40 000 m³/s 时, 泥沙分层系数较大, 且总体含沙量水平最高。长江口最大浑浊带含沙量与径流量的非单向影响关系主要由径流的三重作用共同控制: 泥沙再悬浮能力、河流效应和河口环流。

参 考 文 献:

- [1] WAN Y Y. Multiscale physical processes of fine sediment in an estuary[D]. Delft: Delft University of Technology, 2015.
- [2] DRONKERS J. Tide-induced residual transport of fine sediment[M]//VAN DE KREEKE J. Physics of Shallow Estuaries and Bays. New York: Springer-Verlag, 1986: 228-244.
- [3] VALLE-LEVINSON A. Contemporary issues in estuarine physics[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2010.
- [4] GUO L, VAN DER WEGEN M, ROELVINK J A, et al. The role of river flow and tidal asymmetry on 1-D estuarine morphodynamics[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2014, 119(11): 2315-2334.
- [5] JAY D A, MUSIAK J D. Internal tidal asymmetry in channel flows: origins and consequences[M]//PATTIARATCHI C. Mixing in Estuaries and Coastal Seas. Washington DC: AGU, 1996: 211-249.
- [6] WANG X H. Tide-induced sediment resuspension and the bottom boundary layer in an idealized estuary with a muddy bed[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2002, 32(11): 3113-3131.
- [7] 沈焕庭, 潘定安. 长江河口最大浑浊带[M]. 北京: 海洋出版社, 2001. (SHEN Huangting, PAN Ding'an. Turbidity maximum in the Changjiang estuary[M]. Beijing: China Ocean Press, 2001. (in Chinese))
- [8] 杨正东, 朱建荣, 王彪, 等. 长江河口潮位站潮汐特征分析[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2012(3): 111-119. (YANG Zhengdong, ZHU Jianrong, WANG Biao, et al. Analysis of tidal characteristics of the tide gauges in the Changjiang Estuary[J]. *Journal of East China Normal University (Natural Science)*, 2012(3): 111-119. (in Chinese))
- [9] 李佳. 长江河口潮区界和潮流界及其对重大工程的响应[D]. 上海: 华东师范大学, 2004. (LI Jia. Tidal limit and tidal current limit & response to major engineering in Yangtze Estuary[D]. Shanghai: East China Normal University, 2004. (in Chinese))
- [10] 路川藤, 罗小峰, 陈志昌. 长江口潮波传播影响因素探讨[J]. *海岸工程*, 2011, 30(1): 29-35. (LU Chuanteng, LUO Xiaofeng, CHEN Zhichang. Discussion on factors effecting tidal wave propagation in Yangtze Estuary[J]. *Coastal Engineering*, 2011, 30(1): 29-35. (in Chinese))
- [11] 陈吉余, 沈焕庭. 长江河口动力过程和地貌演变[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1988. (CHEN Jiyu, SHEN Huangting. Estuarine hydro- and morph-dynamics of the Yangtze Estuary[M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 1988. (in Chinese))
- [12] WINTERWERP J C, VROOM J, WANG Z B, et al. SPM response to tide and river flow in the hyper-turbid Ems River[J]. *Ocean Dynamics*, 2017, 67(5): 559-583.
- [13] WOLANSKI E, CHAPPELL J, RIDD P, et al. Fluidization of mud in estuaries[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1988, 93(C3): 2351-2361.
- [14] 戚定满. 长江口航道核心计算平台开发研究及成果应用[R]. 上海: 上海河口海岸科学研究中心, 2007. (QI Dingman. Study and application of the numerical platform of navigational channel of the Yangtze Estuary[R]. Shanghai: Shanghai Estuarine and Coastal Scientific Research Center, 2007. (in Chinese))
- [15] 万远扬, 孔令双, 戚定满, 等. 长江口横沙通道近期演变及水动力特性分析[J]. *水道港口*, 2010, 31(5): 373-378. (WAN Yuanyang, KONG Lingshuang, QI Dingman, et al. Study on characteristics of hydrodynamic and morphological evolution at Hengsha Watercourse of the Yangtze Estuary, China[J]. *Journal of Waterway and Harbor*, 2010, 31(5): 373-378. (in Chinese))
- [16] WAN Y Y, ROELVINK D, LI W H, et al. Observation and modeling of the storm-induced fluid mud dynamics in a muddy-estuarine navigational channel[J]. *Geomorphology*, 2014, 217: 23-36.
- [17] WAN Y Y, WU H L, ROELVINK D, et al. Experimental study on fall velocity of fine sediment in the Yangtze Estuary, China[J]. *Ocean Engineering*, 2015, 103: 180-187.
- [18] 万远扬. 水沙条件变化对长江口深水航道影响初步分析[R]. 上海: 上海河口海岸科学研究中心, 2019. (WAN Yuanyang. Preliminary study on the effect of variations of sediment and water conditions on the Deepwater Navigational Channel of the Yangtze Estuary[R]. Shanghai: Shanghai Estuarine and Coastal Scientific Research Center, 2019. (in Chinese))

Study on the effect of river inflow on estuarine turbidity maximum in the North Passage of the Yangtze Estuary

WAN Yuanyang^{1,2,3,4}, WU Hualin^{1,2,3,4}

(1. Shanghai Estuarine and Coastal Science Research Center, Shanghai 201201, China; 2. Ministerial Key Laboratory of Estuarine Coastal Research, Ministry of Transport, Shanghai 201201, China; 3. Observation and Research Base of Transport Industry of Water-Sediment Environment and Engineering Safety of Yangtze Deepwater Channel, Ministry of Transport, Shanghai 201201, China; 4. National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation, Shanghai 201201, China)

Abstract: The Yangtze Estuary is a giant multi-channel bifurcated river-tide system, which is affected by medium-intensity tides (mainly semilunar tides) and obvious seasonal variation of riverine inflow, and its hydrodynamic-morphological conditions are very complex. In this research, the response of discharge to the dynamic characteristics of water and sediment in the maximum turbidity area (North Passage) of the Yangtze Estuary is studied. The research results show that the increasing of discharge means the increasing of hydrodynamics, which first of all has two consequences: one is the enhancement of sediment resuspension capacity, the other is the increase of transport capacity; in addition, in the maximum turbidity area of the estuary, because of the river effect, there is often an increase in estuarine circulation, and the change of discharge also means that the transport capacity from the bottom to land also changes. The measured data and mathematical model jointly show that the larger the discharge is, the greater the sediment concentration of the beach with low velocity will be, however in the main flow area, due to the triple effects of the increase of discharge, the sediment concentration in the maximum turbidity area does not increase in one direction. Sediment concentration in the maximum turbidity area reaches the maximum under the discharge of 30, 000-40, 000 m³/s. This study clarifies the sediment suspension state of the estuary under different discharge conditions, which could provide a reference for the development and utilization of soil and water resources, ecological environment protection and waterway dredging maintenance in the Yangtze Estuary.

Key words: Yangtze Estuary; North Passage; numerical study; maximum turbidity