

长江口主要分潮振幅时空变化特征及原因初探

王佑铭, 沈洪, 李俊花, 顾峰峰, 贾雨少, 应铭

Preliminary exploration of the spatiotemporal variation characteristics and causes of the main tidal amplitude in the Yangtze Estuary

WANG Youming, SHEN Qi, LI Junhua, GU Fengfeng, JIA Yushao, YING Ming

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12170/20231127002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

近40年来长江口沉积物粒度变化及其对底床冲淤的响应

Analysis of sediment grain size change and its response to erosion and deposition pattern within the Yangtze River Estuary for the past 40 years

水利水运工程学报. 2021(5): 8 <https://doi.org/10.12170/20210628002>

地形变异条件下长江口南港河段水动力变化

Hydrodynamic changes in south channel of Yangtze River estuary under topographic variation conditions

水利水运工程学报. 2020(1): 51 <https://doi.org/10.12170/20181223001>

径流量变化对长江口北槽最大浑浊带影响分析

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

水利水运工程学报. 2021(5): 1 <https://doi.org/10.12170/20210422001>

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>

长江口海域风浪场的计算与特征分析

Calculation and characteristic analyses of wind wave fields in the Yangtze Estuary

水利水运工程学报. 2020(5): 48 <https://doi.org/10.12170/20200102003>

长江经济带生态系统健康评估及时空变化特征

Ecosystem health assessment and spatial and temporal change characteristics of the Yangtze River Economic Belt

水利水运工程学报. 2022(4): 28 <https://doi.org/10.12170/20200519001>



扫码进入官网，阅读更多精彩文章



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI:10.12170/20231127002

王佑铭, 沈淇, 李俊花, 等. 长江口主要分潮振幅时空变化特征及原因初探 [J]. 水利水运工程学报, 2025(1): 25-36. (WANG Youming, SHEN Qi, LI Junhua, et al. Preliminary exploration of the spatiotemporal variation characteristics and causes of the main tidal amplitude in the Yangtze Estuary[J]. Hydro-Science and Engineering, 2025(1): 25-36. (in Chinese))

长江口主要分潮振幅时空变化特征及原因初探

王佑铭¹, 沈 淇², 李俊花³, 顾峰峰², 贾雨少⁴, 应 铭⁴

(1. 上海河口海岸工程咨询有限公司, 上海 201201; 2. 上海河口海岸科学研究中心 交通部河口海岸重点实验室, 上海 201201; 3. 上海海事大学 海洋科学与工程学院, 上海 201306; 4. 中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 上海 200120)

摘要: 径潮流相互作用及河口拦门沙综合影响下, 长江口潮波传播过程及内在机制十分复杂。以“下游口门—北槽拦门沙—上游徐六泾”段沿程 6 个潮位站多年逐时潮位、北槽洪、枯季水文及上游大通站流量资料, 采用 t-tide 分析工具与河道阻力系数公式, 重点分析长江口主要分潮(M2、S2、N2、K1、O1、M4)振幅受径流及河口拦门沙影响下的时空变化特征及成因。研究表明, 外海潮波自口门传入口内, 长江口各主要天文分潮振幅呈先增后减的特征, 浅水分潮(M4)振幅逐渐增大。径流对分潮振幅影响的正向作用表现为其引起的局地水位抬升使分潮振幅增加, 反向作用体现为其与潮流顶冲使分潮振幅减小。由于长江口各水域受径潮流正、反作用影响的占比差异, 所以越靠近口内(外), 径流对分潮振幅的反(正)向作用越显著。在两者之间的拦门沙过渡水域, 分潮振幅(M2)随径流增加而呈现“先增后减”的变化趋势, 临界径流量约为 45 000 m³/s。最大天文分潮振幅位于河口拦门沙水域, 且洪季拦门沙水域分潮振幅沿程衰减速率小于枯季。洪季拦门沙近底高含沙量减阻效应对长江口潮波传播的影响不可忽略。

关 键 词: 长江口; 分潮振幅; 时空变化; 调和分析; 河道阻力

中图分类号: P731.2

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2025)01-0025-12

长江口是外海潮流与长江径流相互交汇的水域, 也是连接海上航运和长江黄金水道的咽喉, 诸多大型涉水工程建设于此, 例如在长江口北槽建有的长江口 12.5 m 深水航道治理工程。该工程虽打通了北槽拦门沙, 但航道常年受河口拦门沙水域高浑浊泥沙影响, 回淤问题突出^[1-3]。径流和潮汐是长江口两大重要动力因子, 直接影响长江河口泥沙输运过程、河口地形塑造及北槽深水航道水深的维护。在外海潮汐、上游径流及河口拦门沙的综合影响下, 长江口潮波传播过程及内在变化机制十分复杂。国内外针对径、潮流作用下河口潮波传播过程开展了诸多研究。研究内容主要围绕径流对潮汐的衰减作用^[4]、河口底摩擦对潮汐变形的影响^[5]、河口形态对潮汐变形的影响^[6]及河口潮汐非线性传播作用^[7-9]等方面。其中, 径流对潮汐的影响主要通过类似摩擦的机制来实现^[10-12]。由于河口潮汐传播过程受不同地貌条件^[13]、来潮特征^[14]、径流过程^[15]及人类活动的影响^[16], 不同地区河口潮汐传播过程及主要动力机制并不相同。

长江口平面上呈现“三级分叉、四口入海”的滩槽格局, 作为典型的径流和潮汐作用为主的大型河口, 长江口 1950—2005 年间多年平均大通站流量为 28 600 m³/s, 拦门沙附近中浚站的平均潮差达 2.66 m^[17]。目前, 针对径潮流作用下长江口潮波传播特征已取得一些研究成果。鲁胜等^[18]选取 2002 年江阴至芦潮港 23 个潮位站对长江口洪、枯季潮波演变规律进行研究, 发现长江口潮波沿口门上溯的过程中, 天文分潮能量有所衰减而浅水分潮能量有所增加; 郭磊城等^[17]关注到以往对江阴以上长江口潮波传播的认识不足, 通

收稿日期: 2023-11-27

基金项目: 上海市 2021 年度“科技创新行动计划”社会发展科技攻关项目(21DZ1201000)

作者简介: 王佑铭(1998—), 男, 上海人, 助理工程师, 主要从事河口动力学及水沙数值模拟研究。

E-mail: 821918376@qq.com 通信作者: 沈 淇(E-mail: shenqimath@hotmail.com)

过收集南京、徐六泾、牛皮礁三站的逐时连续水位资料及大通站以下多站 2009 年洪、枯季水位资料,对长江口潮波时空分布特征进行了再分析,研究发现长江径流加剧了河口段的潮波变形,影响了天文潮的衰减和浅水分潮的产生和传播,河口段浅水分潮振幅随径流增大而增大,而河流段(大通至江阴)则具有相反的变化特征;黄竞争等^[19]选取长江流域 6 个水文站 2002—2014 年潮位资料及大通站月均流量数据进行分析,指出径流量和底摩擦程度共同影响潮波演变趋势,径流动力对潮波衰减的影响主要位于江阴以上河段,江阴以下河段主要受潮汐动力影响;杨峰等^[20]关注了长江口长周期 Sa 气象分潮调和常数的时空变化特征,发现最大日距平流量可能是 Sa 分潮振幅变化的主要影响因子。

随着数值模拟技术的发展,不少学者采用数学模型研究长江口潮波传播过程及内在机制。路川藤等^[13]以 2007 年 8 月长江口水文资料为基础,通过概化模型研究了长江口潮波传播受河口平面收缩、河床底摩擦及河口断面变化的影响;Guo 等^[7]基于数学模型分析了长江口低频分潮的演变趋势及原因,指出径流增强会引起各个分潮之间相互作用的加强,分潮之间因摩擦作用所耗散的部分能量将传递至低频分潮,从而引起低频分潮(如 MSF 和 MM)的振幅增大;路川藤等^[21]模拟分析了长江口潮波传播过程与长江口深水航道工程建设的相关关系,指出导堤丁坝共同影响下北槽低潮位大幅增加、潮差减小;钱明霞等^[22]通过建立数学模型分析了长江口北槽地形变化对潮波的影响,指出在北槽水深增加后,高、低潮位随之降低,潮差增大,潮波变形逐渐趋缓;陈维等^[23]通过建立数学模型,分析了海平面上升对长江下游河口潮波的影响,结果表明海平面上升对潮位有抬高作用,且在徐六泾至入海口河道区域对流速和潮差的影响为先增后减,在芜湖至徐六泾区域内,潮波沿河道向上时潮位增加,潮差减小;杨峰等^[24]建立了大通站至长江口感潮河段的二维水动力模型,分析了长江口 Sa 分潮的影响因子和变化规律,认为长江口处 Sa 分潮受径流年内变化大小、相关涉水建筑物(上游三峡大坝)与外海 Sa 潮波振幅大小的影响。

长江口拦门沙水域是径潮流交汇及人类活动频繁水域,虽然上述研究对长江河口整体潮波传递特征进行了大量研究,但仍缺乏基于长序列实测资料开展的长江口拦门沙水域潮波沿程时空变化特征及原因探讨。此外,长江口是以细颗粒泥沙为主的大型河口,河口拦门沙水域常伴有河口高浑浊带^[25-26]。以往研究多关注于潮波与径流的相互作用,就河口浑浊带对潮波传播影响的关注较少。因此,本文基于长江口“下游口门—北槽拦门沙—上游徐六泾”河段多年实测潮位资料、北槽洪-枯季水沙资料及大通站径流量数据,结合半理论半经验公式推导,进一步分析长江口主要分潮途经北槽拦门沙水域前后的时空变化特征,并对各分潮振幅变化的成因进行分析。

1 数据来源及分析方法

本文收集了 2018 年北槽水域洪、枯季水沙观测资料和 2014—2020 年期间长江口徐六泾、吴淞、横沙、北槽中、牛皮礁、长江口多年逐时的潮位数据及相应的大通站日均流量。各站点潮位数据收集情况见表 1。统计的潮位站点分别位于长江口口门(长江口站)、北槽段(横沙站—牛皮礁站)、长江口南港段(吴淞站)及长江口徐六泾节点(徐六泾站)(见图 1)。

潮位资料采样时间间隔为 1 h,本文分析的水位成果均换算到吴淞基面。

采用 Pawlowcz 等^[27]开发的潮位调和分析工具 t-tide 获取长江口主要分潮的调和常数信息。综合考虑长江口潮波模拟所采用的天文分潮,基于已有长江口潮波模拟成果^[28],选取长江口 6 个主要分潮(天文分潮振幅前 5: M2、N2、S2、K1、O1 分潮及 1 个代表性浅水分潮 M4)开展长江口主要分潮潮波传播特征研究。

表 1 搜集的潮位站点情况						
Tab. 1 Collection of tidal level station information						
年份	徐六泾	吴淞	横沙	北槽中	牛皮礁	长江口
2014	√		√	√	√	√
2015			√	√	√	
2016	√		√	√	√	√
2017	√	√	√	√	√	√
2018	√	√	√	√	√	√
2019		√	√	√	√	√
2020				√	√	

为了观察上游径流的季节变化对各分潮产生的影响, 本研究以月为时间窗口, 对整月的连续潮汐数据进行调和与分析, 得到月平均下的各分潮调和参数, 并分析各分潮在年内的时空变化特征。

此外, 为综合反应河道水深及含沙浓度对河道沿程阻力的影响, 综合已有研究成果, 推导给出能反映河道水深、水体含沙浓度对河道阻力的半经验半理论公式。首先采用张浩等^[29]基于高含沙水流试验结果建立的河道阻力系数(λ)半理论半经验公式:

$$\lambda = \frac{8}{\left(\frac{1}{\kappa} \ln \frac{H}{\Delta} + A - \frac{1}{\kappa} \right)^2} \quad (1)$$

式中: κ 为卡门系数, 取 0.4; H 为实际水深(m); A 为近底对数流速分布尾流常数, 本文取 0; Δ 为绝对糙度, 取 0.000 03 m^[30]。已有研究^[29]表明, 水体含沙量大小会影响近底垂向流速分布及河床阻力, 可进一步通过计算考虑含沙量影响下的卡门系数来反映近底高含沙水体的影响。考虑含沙浓度影响下的卡门系数计算式为^[31]:

$$K = K_0 \left[1 - 4.2 \sqrt[3]{S_v} (0.365 - S_v) \right] \quad (2)$$

$$S = \gamma_s S_v \quad (3)$$

式中: S_v 为体积比含沙量; γ_s 为泥沙密度, 取 2 650 kg/m³; S 为浑水中泥沙的质量浓度(kg/m³)。基于式(1)、(2)、(3), 使用控制变量法, 结合长江口拦门沙段洪、枯季水深及含沙浓度差异, 可定量评估水深与含沙浓度变化对阻力影响大小。

2 潮汐基本特征分析

2.1 月均潮差时空分布特征

图 2 为 2017—2018 年各潮位站月均潮差统计结果。统计结果表明:

(1) 长江口牛皮礁站潮差最大, 其月均潮差为 2.67~2.88 m。其余站点按月均潮差由高至低排序, 依次为北槽中站(2.54~2.82 m)、长江口站(2.53~2.72 m)、横沙站(2.42~2.68 m)、吴淞站(2.20~2.39 m)及上游徐六泾站(2.10~2.24 m)。

(2) 时间上, 各站点月均潮差大小在年内分布存在一定差异。其中, 长江口站处, 最大潮差发生在 3 月, 最小潮差发生在 12 月; 牛皮礁站 3 月与 9 月潮差最大, 12 月潮差最小; 而在其上游站点(如吴淞、横沙、徐六泾与北槽中), 最大潮差发生于洪季的 8—10 月, 最小潮差发生在 2 月。

(3) 空间上, 长江口潮差自徐六泾向下游逐渐增大, 至牛皮礁处达到最大值。自牛皮礁至下游长江口站处, 潮差沿程逐渐减小。此外, 横沙站年内月均潮差最大、最小值差异最大, 年内月均潮差变幅可达 0.26 m, 其次牛皮礁站为 0.21 m, 吴淞站及长江口站为 0.19 m, 徐六泾站为 0.14 m。

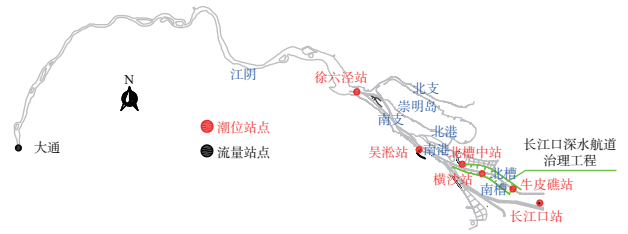


图 1 长江口站点位置示意

Fig. 1 Schematic representation of the location of the Changjiang Estuary station

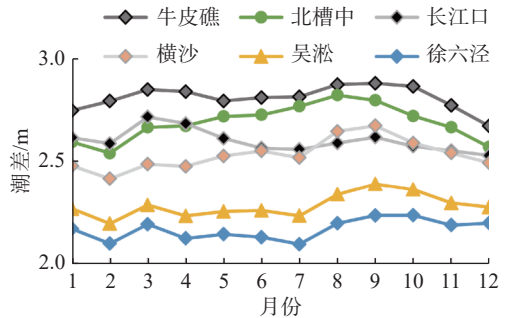


图 2 各站点月平均潮差变化趋势

Fig. 2 Monthly average tidal range variation trend at each station

2.2 主要分潮振幅频谱分析

以 2018 年潮位数据进行谐波分析, 得出 2018 年长江口主要分潮频率和振幅分布情况(见图 3)。图 3 中, 红色为本文考虑的振幅排名前 5 的天文分潮以及 M4 浅水分潮, 频率单位为 cph(circle per hour)。

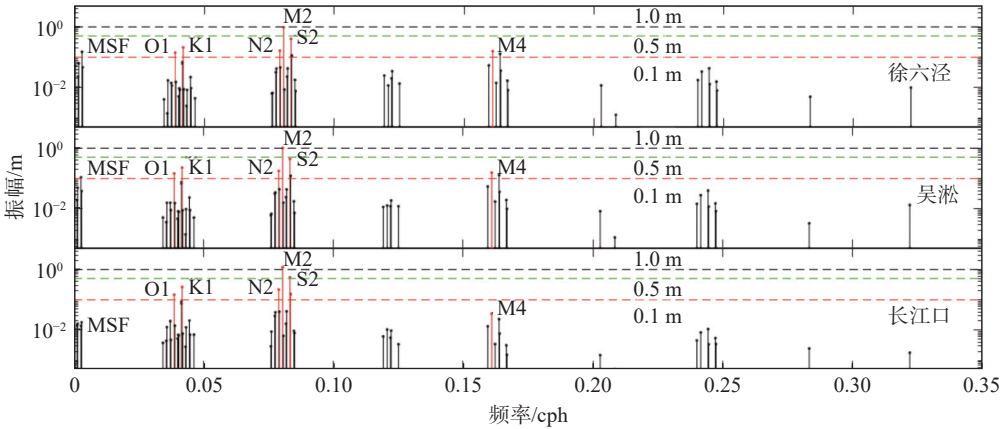


图 3 徐六泾、吴淞和长江口三站 2018 年各分潮振幅和频谱分布

Fig. 3 Amplitude and spectrum distribution of tidal constituents at Xuliujing, Wusong, and the Changjiang Estuary in 2018

分析图 3 可知:

(1)长江口处振幅较大的分潮有半日分潮(M2、K2、S2、N2)、全日分潮(K1、O1)及四分之一日浅水分潮(M4)。在主要天文分潮中, M2 分潮振幅最大, 振幅范围为 0.96~1.19 m; 其次为 S2 分潮, 其振幅为 0.40~0.55 m。其余分潮振幅由大到小排列为 K1(0.21~0.26 m)、N2(0.16~0.22 m)、O1(0.15~0.17 m)、K2(0.11~0.15 m)及 M4(0.04~0.16 m)。低频混合分潮 MSF 振幅为 0.01~0.15 m。

(2)长江口潮波向上游传播过程中, 受径流及河床摩擦影响, 天文潮波能量向低频潮波及高频分潮转移, 半日潮及全日潮能量减小。其中, 主要天文分潮 M2、S2、K1、O1、N2、K2 振幅分别减少约 0.22、0.15、0.06、0.01、0.05 与 0.04 m, 低频潮 MSF 和高频潮 M4 的振幅则分别增加了 0.14 和 0.12 m。潮波自长江口站向上传播过程中, K2 分潮振幅逐渐小于浅水分潮 M4, MSF 分潮振幅一直小于 M4 分潮振幅。

3 主要分潮的时空分布特征

3.1 时间分布特征

以月为时间窗口, 分析 2014—2020 年各月主要天文分潮振幅的时间变化特征并与每月平均大通站流量的变化趋势作对比(图 4)。分析表明:

(1)时间上, 长江口各站点分潮振幅均体现出年内的周期性波动特征, 且各主要分潮振幅的年内波动特征存在一定差异。M2、M4 分潮振幅年内呈现“先增后减”的单峰变化特征, 振幅变化的周期特征与大通站流量周期性变化特征一致, 两种分潮振幅年内最大值出现于 6—7 月, 年内最小值出现于 12—1 月。S2、K1、O1 分潮振幅年内呈现双峰特征, 且周期较为固定。S2 分潮振幅年内最大值出现于 3 和 9 月, 振幅较小值出现于 6 和 12 月; K1 分潮振幅较大值出现于 7 和 12 月, 振幅较小值出现于 3 和 9 月; O1 分潮振幅较大值出现于 2 和 8 月, 振幅较小值出现在 5 和 12 月; N2 分潮振幅年内也呈现双峰特征, 但双峰出现的时间不固定。

(2)长江口各站点分潮振幅在不同站点的年内变幅也存在一定差异, 其中以 M2、M4 分潮振幅的年内变幅最为显著。M2 分潮年内变幅在长江口口内(徐六泾站)及河口口门(长江口站)处较小, 在河口拦门沙水域处最大。在口内徐六泾及口门长江口站处, M2 分潮年内振幅最大变幅分别为 0.137 和 0.057 m; 在河口拦门沙附近的北槽中站处, M2 分潮振幅年内最大变幅达 0.161 m。M4 浅水分潮年内分潮变幅在口内徐六泾站处最大(0.058 m), 在口门长江口站最小(小于 0.030 m)。

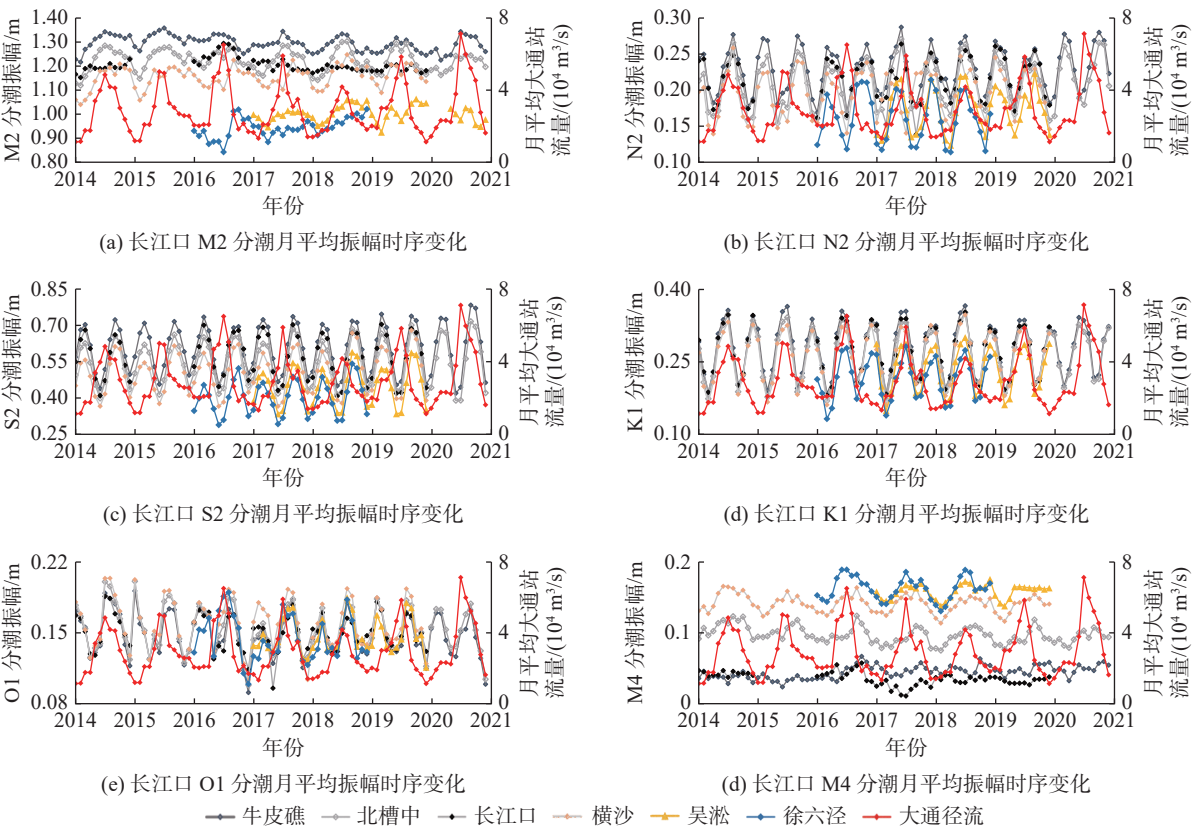


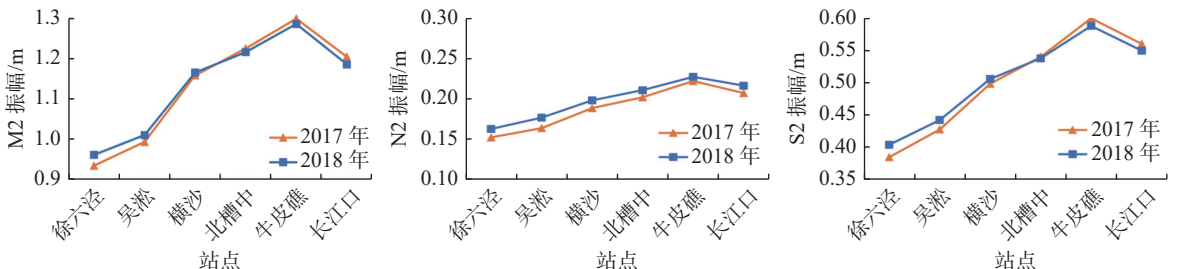
图 4 长江口主要分潮月平均振幅的时序变化

Fig. 4 Temporal variation of monthly average amplitude of major tidal constituents at the Changjiang Estuary

3.2 空间分布特征

统计 2017—2018 年长江口徐六泾、吴淞、横沙、北槽中、牛皮礁及长江口等 6 个站点各主要分潮振幅的空间分布特征,以年为时间窗口,统计分析各主要分潮振幅的空间分布特征,统计结果见图 5 和 6。分析表明:

(1)长江口主要半日分潮及全日分潮(M2、N2、S2、K1、O1)振幅自长江口口门至上游徐六泾均呈现“先增后减”的分布特征,且各年之间的空间分布特征基本一致。主要半日分潮及全日分潮(M2、N2、S2、K1)年最大振幅均出现在牛皮礁站处,自牛皮礁站至上游徐六泾站,M2、N2、S2、K1 分潮振幅分别年平均衰减了 27%、30%、34% 与 23%;而自牛皮礁站至下游长江口站,M2、N2、S2、K1 的分潮振幅分别年平均衰减了 7%、6%、7% 与 3%。全日分潮 O1 沿程振幅变化较小,自长江口至上游徐六泾站,O1 分潮振幅年平均衰减了 3%(图 5(a)~(e))。



(a) 长江口区域年 M2 分潮振幅空间变化 (b) 长江口区域年 N2 分潮振幅空间变化 (c) 长江口区域年 S2 分潮振幅空间变化

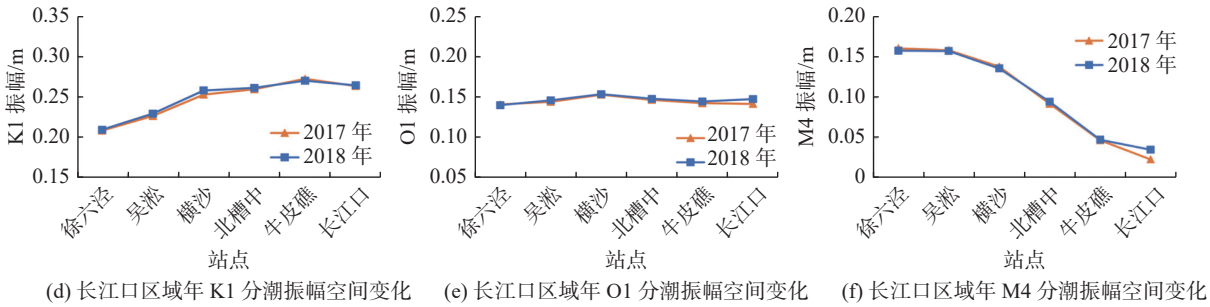


图 5 长江口各站年平均分潮振幅空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of annual average amplitude of tidal constituents at the Changjiang Estuary stations

(2)四分之一日浅水分潮 M4 的振幅呈现自口门(长江口)向口内(徐六泾)逐渐增大的分布特征,这是因为浅水分潮的能量产自于天文分潮非线性摩擦过程。随着天文分潮受底部摩擦作用时间的增长,浅水分潮潮波能量逐渐增加。自长江口站至徐六泾站,M4 分潮振幅增加了 477%(图 5(f))。

(3)洪、枯季长江口 M2 分潮在北槽拦门沙水域自下游向上传播过程中,分潮振幅沿程衰减速度差异显著。洪季条件下,M2 分潮振幅自牛皮礁站向上游衰减速度明显小于枯季条件下的衰减速度。统计牛皮礁站至横沙站河段数据可见,2017 年及 2018 年洪季 M2 分潮振幅沿程衰减分别为 0.081 和 0.155 m,而枯季 M2 分潮振幅沿程衰减可达 0.147 和 0.161 m(图 6)。

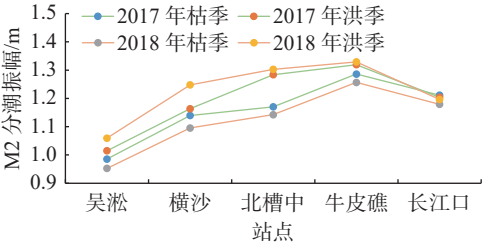


图 6 吴淞—长江口站 M2 分潮振幅洪分布

Fig. 6 Flood distribution of M2 tidal constituent amplitude at the Wusong – the Changjiang Estuary station

4 讨 论

长江口潮波自河口口门向口内传播过程受径潮流相互作用和河口高浑浊带等因素影响。以“长江口站—北槽中站—上游徐六泾站”为例,分别从上游径流影响、河口近底高含沙影响两方面分析长江口潮波变化的内在成因。

4.1 径流因素影响

为定量分析径流大小对各主要分潮潮波振幅的影响,基于上述实测数据,统计分析了 2014 年 1 月—2020 年 12 月内月均大通站流量与长江口各主要分潮月均振幅的相关性(图 7),图中 R 代表回归方程(即图中灰色曲线)对数据的拟合度。统计结果表明,各主要分潮振幅与大通站流量相互关联程度差异显著,其中 M2 分潮与大通站流量变化的相关度最高。

分析上述径潮流相互作用下各分潮振幅变化的原因:一方面,径流与潮流直接相互顶冲,导致天文潮波能量的耗散,致使天文分潮振幅的减小(反作用)^[32],且潮汐能量消散与潮差的 3 次方成正比^[33];另一方面,由于径流作用抬高了河口平均水位,使得河床近底摩擦作用减弱,进而增加了天文分潮振幅(正作用)^[23]。径潮流影响下正、反作用的相互制衡是造成不同站点下长江口各分潮振幅随径流量增加而表现出不同的变化特征,具体在长江口表现为:

(1)当天文分潮的振幅较小时(如 N2、K1、O1 分潮),分潮产生的潮流动力也较弱,因而因底摩擦而损耗的潮汐能量很小,加之径流和潮流相互顶冲过程中消耗的潮波能量也很小,造成此类分潮振幅受径流变化影响的敏感性不强,变化趋势曲线基本呈水平直线态势(图 7(b)、(d)、(e))。

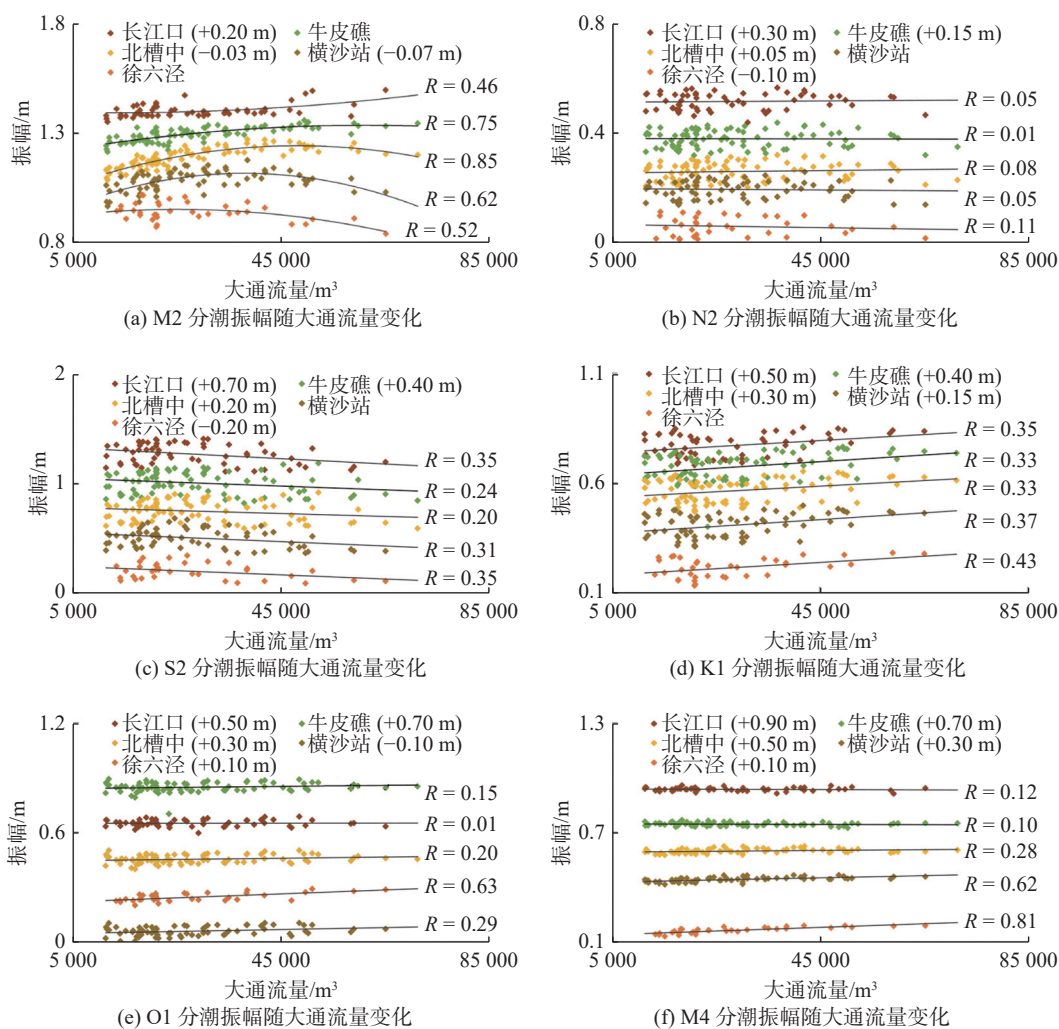


图7 长江口各站点月均分潮振幅随大通站流量变化关系

Fig. 7 Correlation between monthly-averaged tidal component amplitude and the corresponding Datong discharge

(2)当天文分潮的振幅较大时(如 M2 及 S2 分潮),由于径流产生的河口上、下游泄流动力差异,不同站点径潮流正、反作用的占比不同,使得不同站点 M2 或 S2 分潮振幅随流量变化的特征趋势不同(图 7 (a)、(c))。一般而言,局地由径流产生的泄流动力相较于涨落潮流速不可忽略时,径潮流相互作用而产生潮波能量耗散的反作用占比较大,反之,由于水波的传播速度远大于流体动能的传递速度,即由径流产生的泄流流速忽略不计,但径流仍一定程度上改变了河口水位,使得径潮流作用下底摩擦减弱的正作用占比增加。

长江口站位于河口口门水域(图 1),口门河道放宽率急剧放大,大通站流量所产生的下泄动力难以直接对口门涨落潮流造成显著影响,大通站流量自枯季 $15\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 增加至洪季 $45\,000\text{ m}^3/\text{s}$,长江口口门流速增幅仅 $0.002\,8\text{ m/s}$ ^[34],大通站径流难以直接对长江口站涨落潮动力造成直接影响。因而,长江口站点处,随着流量增加, M2 分潮振幅呈现单调增加的趋势(图 7(a))。对于上游徐六泾站点,大通站流量所产生的泄流速度增幅可达 0.15 m/s 以上^[34],因而,径流对潮波的耗散作用远大于因水位抬升而造成底部阻力减小的作用,徐六泾站 M2 分潮振幅随流量增加而减小(图 7(a))。此外,统计发现,当大通站流量大于 $40\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时,大通站流量所产生的泄流流速增加将直接影响长江口北槽内潮波能量消耗(横沙—牛皮礁),引起北槽内 M2 分潮振幅的减小(图 7(a))。

长江口 S2 天文分潮各站点均表现为:超过某一较小临界流量后,随着流量增加, S2 分潮振幅呈明显减

小趋势。分析原因,是由于 S2 分潮振幅小于 M2 分潮,当长江口上游大通站流量约大于 30 000 m³/s 时, S2 产生的潮流动力影响不可忽略,径潮流相互顶冲下潮波能量消耗的反作用占比增加。

(3)M4 浅水分潮产自于径潮流相互作用及河床底摩擦过程,因此越靠近上游,径潮流相互作用的强度越大,进而使得 M4 分潮振幅随流量增加而增加的趋势更明显(图 7(f))。

4.2 长江口拦门沙近底高含沙影响

长江口属于高浊度河口,河口浑浊带含沙浓度近年来虽呈现减小趋势,但长江口拦门沙洪、枯含沙量浓度分布差异仍较显著,且北槽航槽中段悬沙浓度略有增加^[23]。如图 8 所示,2018 年长江口北槽中潮位站附近洪(8 月)、枯(2 月)季含沙量垂线分布差异巨大,洪季大、小潮平均近底含沙量可达 4.5 kg/m³,而枯季仅有 1.01 kg/m³。洪季条件下,北槽中站平均潮位达 2.33 m,枯季条件下,北槽中站平均潮位为 1.88 m(表 2,图 2)。因此,长江口拦门沙洪、枯季潮波能量沿程消耗的差异(图 7)不仅受洪、枯季平均水位差异的影响,也受近底高含沙量减阻的影响。

为了定量描述长江口拦门沙段洪、枯季近底含沙量和水深变化对潮波传递阻力的影响,基于实测的洪、枯季长江口北槽中水域潮位及含沙量数据,结合式(1)和(2)的计算结果,定量统计了北槽河段河道阻力受近底含沙量及平均水位变化的影响大小。影响大小以如下变化率指标体现,即:

$$V = \frac{\lambda_1 - \lambda_0}{\lambda_0}$$

(4)

式中: V 为河道阻力系数变化率; λ_0 为枯季实际的阻力系数; λ_1 为其他工况条件下的河道阻力系数,分别考虑洪季含沙浓度及平均水位后的阻力系数。统计结果详见表 2,其中 S 为体积比含沙质量。由表 2 可见:

- (1)初步估算,2018 年北槽中洪季阻力系数相较于枯季阻力系数下降了 7.14%,说明洪季时河口拦门沙水域河床阻力小于枯季。这也是造成洪季条件下, M2 分潮振幅自牛皮礁站向上沿程下降速度明显小于枯季时下降速度的主要原因(图 6)。
- (2)从水深及含沙量变化对河床阻力影响敏感性分析看,当枯季水深不变,仅枯季含沙量增加至洪季含沙水平时,河床阻力系数较枯季降低了 6.68%。当枯季水体含沙量不变,仅枯季平均水位增高至洪季相当平均水位时,河床阻力系数仅降低了 0.49%。由此可见,在长江口拦门沙水域,含沙量的变化对河床阻力系数的影响更大,近底高含沙量减阻效应对长江口潮波传播影响不可忽略(表 2)。

表 2 长江口北槽水域洪、枯季河道阻力估算结果

Tab. 2 Calculation parameters of flood and dry resistance in the north area of the Changjiang estuary

工况条件	水深/m	平均水位/m	$S/(\text{kg}/\text{m}^3)$	λ	$V/\%$	影响因素
枯季条件	13	1.88	1.01	0.008 208		
枯季下改变 S	13	1.88	4.5	0.007 659	-6.68	含沙量影响
洪季条件	13	2.33	4.5	0.007 622	-7.14	实际洪、枯季河道阻力差异
洪季下改变 S	13	2.33	1.01	0.008 168	-0.49	水位影响

注:表中变化率 V 均指相对于枯季河道阻力的变化。

5 结 语

本文基于 2014—2020 年长江口“下游口门—北槽—上游徐六泾”河段沿程 6 个潮位站多年潮位资

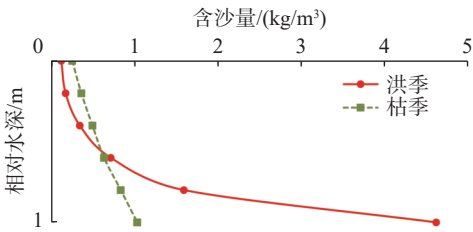


图 8 2018 年长江口北槽中附近水域洪(8 月)、枯(2 月)季含沙量垂向分布

Fig. 8 Vertical distribution of suspended sediment concentration near the Beicaozhong Station during the flood and dry season of 2018

料、北槽洪、枯季水文资料及大通站流量数据,综合利用潮位调和分析及河道阻力半理论半经验计算公式,研究了长江口主要分潮潮波振幅时空变化及内在成因,得到的相关认识和结论如下:

(1)长江口分潮主要由半日分潮(M2、S2、N2)、全日分潮(K1、O1)及四分之一日浅水分潮(M4)组成。其中,M2分潮振幅最大,S2分潮次之,其后依次为S2分潮、K1分潮、N2分潮、O1及M4分潮。

(2)长江口主要分潮振幅的时空变化呈现一定规律特征。时间上,长江口各站点主要分潮振幅均呈现年内的单峰或双峰分布特征。其中,M2、M4分潮振幅年内呈“先增后减”的单峰变化;S2、K1、O1、N2分潮振幅年内呈“双峰”分布。空间上,长江口主要半日分潮及全日分潮(M2、N2、S2、K1)振幅自长江口口门至上游徐六泾均呈“先增后减”的分布特征,分潮最大振幅出现在河口拦门沙处(牛皮礁站),日分潮O1沿程振幅变化较小,四分之一日浅水分潮M4的振幅自外海向上游逐渐增大。

(3)径潮流相互作用下,振幅较弱的天文分潮(N2、K1、O1)受径流影响小,而振幅较强的天文分潮(M2、S2)则相反。径、潮流相互作用下长江口各站点分潮振幅变化取决于其正、反作用相互制衡。径流对分潮振幅影响的正向作用表现为其引起的局地水位抬升而造成的分潮振幅增加,反向作用表现为其与潮流顶冲而引起的分潮振幅减小。越靠近口内,径流对分潮振幅的反向作用越显著;越靠口外,径流对分潮振幅的正向作用越显著。在两者之间的拦门沙过渡水域,分潮振幅(M2)随径流增加而呈“先增后减”的趋势,其临界径流量约为 $45\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 。S2分潮振幅普遍随径流增加而减小,且当大通站流量大于 $30\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 后,S2分潮振幅的减幅更显著。

(4)洪季条件下在北槽拦门沙水域,M2分潮振幅沿程衰减速度明显小于枯季条件下的振幅衰减速度。初步估算北槽洪枯季水沙条件变化对河道阻力影响发现,2018年北槽中洪季阻力系数相较于枯季阻力系数下降了7.14%,其中洪季含沙量变化引起枯季河床阻力系数降幅为6.68%,洪季潮位抬升导致枯季河床阻力系数降幅为0.49%,前者较后者影响更显著。因此,近底高含沙量减阻效应对长江口潮波传播影响不可忽略。

参 考 文 献:

- [1] SHEN Q, HUANG W R, WAN Y Y, et al. Observation of the sediment trapping during flood season in the deep-water navigational channel of the Changjiang Estuary, China[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2020, 237: 106632.
- [2] 沈淇,高钦钦,顾峰峰,等.长江口深水航道三期工程后北槽洪枯季水沙运动特征研究[J]. *海洋学报*, 2014, 36(7): 118-124. (SHEN Qi, GAO Qinqin, GU Fengfeng, et al. Analysis of the sediment motion at north passage in flood and dry season after 3rd phase engineering of the deep waterways in Changjiang Estuary[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2014, 36(7): 118-124. (in Chinese))
- [3] 杨春松,左书华,谢华亮,等.长江口12.5 m深水航道回淤变化及其影响因素[J]. *水运工程*, 2022(12): 77-83. (YANG Chunsong, ZUO Shuhua, XIE Hualiang, et al. Siltation change and influencing factors of 12.5 m deep-water channel of Yangtze Estuary[J]. *Port & Waterway Engineering*, 2022(12): 77-83. (in Chinese))
- [4] GALLO M N, VINZON S B. Generation of overtides and compound tides in Amazon Estuary[J]. *Ocean Dynamics*, 2005, 55(5): 441-448.
- [5] SASSI M G, HOITINK A J F. River flow controls on tides and tide-mean water level profiles in a tidal freshwater river[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2013, 118(9): 4139-4151.
- [6] ZHANG P, YANG Q S, WANG H, et al. Stepwise alterations in tidal hydrodynamics in a highly human-modified estuary: the roles of channel deepening and narrowing[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 597: 126153.
- [7] GUO L C, ZHU C Y, WU X F, et al. Strong inland propagation of low-frequency long waves in river estuaries[J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47(19).
- [8] 童朝锋,王俊杰,张青.兴化湾潮汐潮流特性及工程影响分析[J]. *水利水运工程学报*, 2015(1): 53-60. (TONG Chaofeng, WANG Junjie, ZHANG Qing. Tidal regime and impacts of works in Xinghua Bay on hydrodynamics[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2015(1): 53-60. (in Chinese))
- [9] 童朝锋,曹益铭,高祥宇,等.海南红塘湾潮汐不对称性分析[J]. *水利水运工程学报*, 2019(3): 9-15. (TONG Chaofeng, CAO

- Yiming, GAO Xiangyu, et al. Analysis of tidal asymmetry in Hongtang Bay, Hainan[J]. Hydro-Science and Engineering, 2019(3): 9-15. (in Chinese))
- [10] HORREVOETS A C, SAVENIJE H H G, SCHUURMAN J N, et al. The influence of river discharge on tidal damping in alluvial estuaries[J]. *Journal of Hydrology*, 2004, 294(4): 213-228.
- [11] SAVENIJE H H G, TOFFOLON M, HAAS J, et al. Analytical description of tidal dynamics in convergent estuaries[J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 2008, 113(C10): C10025.
- [12] CAI H Y, SAVENIJE H H G, YANG Q S, et al. Influence of river discharge and dredging on tidal wave propagation: Modaomen estuary case[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2012, 138(10): 885-896.
- [13] 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))
- [14] WU Y S, HANNAH C, MATTE P, et al. Tidal propagation in the Lower Fraser River, British Columbia, Canada[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2022, 264: 107695.
- [15] 王安琪, 张蔚, 诸裕良, 等. 流量调节对长江口潮流不对称的影响[J]. 长江科学院院报, 2023, 40(3): 18-24. (WANG Anqi, ZHANG Wei, ZHU Yuliang, et al. Influence of discharge regulation on tidal current asymmetry in the Changjiang River Estuary[J]. *Journal of Changjiang River Scientific Research Institute*, 2023, 40(3): 18-24. (in Chinese))
- [16] 张先毅, 杨昊, 黄竞争, 等. 强人类活动驱动下珠江磨刀门河口径潮动力的季节性异变特征[J]. 海洋与湖沼, 2020, 51(5): 1043-1054. (ZHANG Xianyi, YANG Hao, HUANG Jingzheng, et al. Impact of intensive human activity on seasonal variation in river-tide dynamics in the Modaomen estuary of Zhujiang (Pearl) River[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2020, 51(5): 1043-1054. (in Chinese))
- [17] 郭磊城, 朱春燕, 何青, 等. 长江河口潮波时空特征再分析[J]. 海洋通报, 2017, 36(6): 652-661. (GUO Leicheng, ZHU Chunyan, HE Qing, et al. Examination of tidal wave properties in the Yangtze River Estuary[J]. *Marine Science Bulletin*, 2017, 36(6): 652-661. (in Chinese))
- [18] 鲁盛, 吴志龙, 童朝锋. 基于实测资料的长江口潮波演变规律研究[J]. 人民长江, 2019, 50(9): 86-93. (LU Sheng, WU Zhilong, TONG Chaofeng. Study on tidal propagation characteristics in Yangtze River Estuary based on observed data[J]. *Yangtze River*, 2019, 50(9): 86-93. (in Chinese))
- [19] 黄竞争, 张先毅, 吴峥, 等. 长江感潮河段潮波传播变化特征及影响因素分析[J]. 海洋学报, 2020, 42(3): 25-35. (HUANG Jingzheng, ZHANG Xianyi, WU Zheng, et al. Investigation into the spatial and temporal tide-river dynamics and the underlying controlled factors along the tidal reach of the Changjiang River[J]. *Haiyang Xuebao*, 2020, 42(3): 25-35. (in Chinese))
- [20] 杨锋, 谭亚, 蒋体孝, 等. 长江口 Sa 分潮调和常数变化趋势研究[J]. 人民长江, 2014, 45(11): 44-47, 67. (YANG Feng, TAN Ya, JIANG Tixiao, et al. Study on change trend of harmonic constant of Sa tidal constituent at Yangtze River Estuary[J]. *Yangtze River*, 2014, 45(11): 44-47, 67. (in Chinese))
- [21] 路川藤, 陈志昌, 罗小峰. 长江口北槽潮波传播变化特征研究[J]. 长江科学院院报, 2015, 32(8): 9-14. (LU Chuanteng, CHEN Zhichang, LUO Xiaofeng. Variation characteristics of tidal wave propagation in the north channel of Yangtze Estuary[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2015, 32(8): 9-14. (in Chinese))
- [22] 钱明霞, 路川藤, 罗小峰, 等. 长江口北槽潮波对地形变化的响应研究[J]. 水利水运工程学报, 2016(5): 54-60. (QIAN Mingxia, LU Chuanteng, LUO Xiaofeng, et al. Response of tide waves in north channel of Yangtze Estuary to topographic variation[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2016(5): 54-60. (in Chinese))
- [23] 陈维, 毛晨浩, 顾一凡, 等. 长江口潮波对海平面上升的响应研究[J]. 中国航海, 2022, 45(1): 112-119. (CHEN Wei, MAO Chenhao, GU Yifan, et al. Impact of sea level rising on tidal wave at mouth of the Yangtze River[J]. *Navigation of China*, 2022, 45(1): 112-119. (in Chinese))
- [24] 杨锋, 谭亚, 王灶平, 等. 长江口 Sa 分潮数值模拟研究[J]. 水道港口, 2016, 37(4): 362-368. (YANG Feng, TAN Ya, WANG Zaoping, et al. Numerical simulation study on Sa partial tide in Yangtze Estuary[J]. *Journal of Waterway and Harbor*, 2016, 37(4): 362-368. (in Chinese))
- [25] 杨云平, 李义天, 孙昭华, 等. 长江口最大浑浊带悬沙浓度变化趋势及成因[J]. 地理学报, 2013, 68(9): 1240-1250. (YANG Yunping, LI Yitian, SUN Zhaohua, et al. Trends and causes of suspended sediment concentration variation in the turbidity

- maximum zone at the Yangtze River Estuary[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(9): 1240-1250. (in Chinese))
- [26] 杨云平, 张明进, 邓金运, 等. 长江口悬沙浓度变化的同步性和差异性[J]. *地理学报*, 2014, 69(11): 1615-1627. (YANG Yunping, ZHANG Mingjin, DENG Jinyun, et al. The synchronicity and difference in the change of suspended sediment concentration in the Yangtze River Estuary[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(11): 1615-1627. (in Chinese))
- [27] PAWLOWICZ R, BEARDSLEY B, LENTZ S. Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE[J]. *Computers & Geosciences*, 2002, 28(8): 929-937.
- [28] 杨陇慧, 朱建荣, 朱首贤. 长江口杭州湾及邻近海区潮汐潮流场三维数值模拟[J]. *华东师范大学学报 (自然科学版)*, 2001(3): 74-84. (YANG Longhui, ZHU Jianrong, ZHU Shouxian. 3-D numerical simulation of tide and tidal current fields in the Changjiang Estuary, Hangzhou Bay and their adjacent sea[J]. *Journal of East China Normal University (Natural Science)*, 2001(3): 74-84. (in Chinese))
- [29] 张浩, 任增海. 明渠高含沙水流阻力规律探讨[J]. *中国科学 (A 辑)*, 1982(6): 571-577. (ZHANG Hao, REN Zenghai. Discussion on resistance law of high sediment concentration flow in open channel[J]. *Science in China (Ser A)*, 1982(6): 571-577. (in Chinese))
- [30] SHEN Q, HUANG W R, QI D M. Integrated modeling of typhoon damrey's effects on sediment resuspension and transport in the north passage of Changjiang Estuary, China[J]. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 2018, 144(6): 04018015.
- [31] 张红武. 黄河下游洪水模型相似律的研究[D]. 北京: 清华大学, 1995. (ZHANG Hongwu. The study of the law of similarity for models of flood flows of the lower reach of the Yellow River[D]. Beijing: Tsinghua University, 1995. (in Chinese))
- [32] 欧素英, 杨清书. 珠江三角洲网河区径流潮流相互作用分析[J]. *海洋学报*, 2004, 26(1): 125-131. (OU Suying, YANG Qingshu. Interaction of fluctuating river flow with a barotropic tide in river network of the Zhujiang Delta[J]. *Haiyang Xuebao*, 2004, 26(1): 125-131. (in Chinese))
- [33] GUO L C, VAN DER WEGEN M, JAY D A, et al. River-tide dynamics: exploration of nonstationary and nonlinear tidal behavior in the Yangtze River Estuary[J]. *Journal of Geophysical Research (Oceans)*, 2015, 120(5): 3499-3521.
- [34] 范明源, 李俊花, 万远扬, 等. 径流量变化对长江口水动力特性的影响[J]. *海洋工程*, 2020, 38(4): 81-90. (FAN Mingyuan, LI Junhua, WAN Yuanyang, et al. Effect of runoff change on hydrodynamic characteristics of the Yangtze River Estuary[J]. *The Ocean Engineering*, 2020, 38(4): 81-90. (in Chinese))

Preliminary exploration of the spatiotemporal variation characteristics and causes of the main tidal amplitude in the Yangtze Estuary

WANG Youming¹, SHEN Qi², LI Junhua³, GU Fengfeng², JIA Yushao⁴, YING Ming⁴

(1. *Shanghai Estuarine & Coastal Engineering Consultants Ltd., Shanghai 201201, China*; 2. *Key Laboratory of Estuarine & Coastal Engineering, Ministry of Transport, Shanghai Estuarine & Coastal Science Research Center, Shanghai 201201, China*; 3. *College of Ocean Science and Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China*; 4. *CCCC Shanghai Waterway Engineering Design and Consulting Co., Ltd., Shanghai 200120, China*)

Abstract: The process and intrinsic mechanism of tidal wave propagation in the Changjiang Estuary are very complex under the interaction of tidal current and the comprehensive impact of sediment trapping at the river mouth. Using long-term hourly tidal level data, North Channel flood and drought hydrological data, and upstream Datong flow data from six tidal gauge stations along the "downstream estuary gate - North Channel sediment trapping - upstream Xuliujing" section, the t-tide analysis tool and channel resistance coefficient formula were used to analyze the spatial and temporal variations and causes of the amplitudes of the main tidal constituents (M2, S2, N2, K1, O1, M4) in the Changjiang Estuary under the influence of runoff and sediment trapping at the river mouth. The study shows that the amplitudes of the major astronomical constituents in the Changjiang Estuary exhibit a characteristic of first increasing and then decreasing as the tidal waves enter the estuary from the open sea, and the amplitude of the shallow water constituent (M4) gradually increases. The positive effect of runoff on the amplitude of the tidal constituents is manifested by the local water level rise caused by runoff, which increases the amplitude of the tidal constituents, while the negative effect is reflected by the interaction between runoff and tidal currents, which reduces the amplitude of the tidal constituents. Due to the difference in the proportion of positive and negative effects of runoff and tidal currents in different water areas of the Changjiang Estuary, the negative (positive) effect of runoff on the amplitude of the tidal constituents becomes more significant as it gets closer to the estuary (outer estuary). In the transitional water area between the two, the amplitude of the tidal constituent (M2) shows a "first increasing and then decreasing" trend with the increase of runoff, and the critical runoff is approximately 45,000 m³/s. The maximum amplitude of the astronomical constituents is located in the sediment trapping area at the river mouth, and the amplitude of the tidal constituents in the flood season sediment trapping area decreases along the section at a slower rate than in the drought season. The effect of high sediment concentration near the bottom of the flood season sediment trapping area on the propagation of tidal waves in the Yangtze River Estuary should not be ignored.

Key words: the Yangtze Estuary; tidal constituent amplitude; spatial and temporal variations; harmonic analysis; channel resistance