

潮优型河口动力对水深变化的响应机制研究——以葡萄牙 Guadiana 河口为例*

张萍^{1,2,3,4}, 谢梅芳^{1,2,3,4}, 杨昊^{1,2,3,4}, 蔡华阳^{1,2,3,4}, 欧素英^{1,2,3,4}, 杨清书^{1,2,3,4}

1. 中山大学海洋工程与技术学院河口海岸研究所, 广东 广州 510275;

2. 河口水利技术国家地方联合工程实验室, 广东 广州 510275;

3. 广东省海岸与岛礁工程技术研究中心, 广东 广州 510275;

4. 南方海洋科学与工程广东省实验室, 广东 珠海 519082

摘要: 强人类活动(如航道疏浚)和自然气候变化(如海平面上升)对近岸河口环境不同影响的辨识是目前河口海岸学研究的热点和难点问题。在地形概化和动力简化条件下, 解析模型能够快速辨识强人类活动和自然气候变化对河口环境的影响, 它是探讨河口动力过程对外界干扰的响应机制的重要工具。本文基于前人对葡萄牙 Guadiana 河口不同分潮之间非线性相互作用的研究, 采用一维水动力解析模型探讨河口不同分潮潮波传播过程对水深变化(模拟航道疏浚和河道淤积过程)的响应机制。研究结果表明: 平均水深 \bar{h} 的变化影响无量纲河口地形参数 γ 和摩擦参数 χ , 进一步影响河口动力参数包括潮波振幅参数 ζ 、流速振幅参数 μ 、波速参数 λ 、潮波振幅增大/衰减率参数 δ 以及流速与水位之间的相位差 ϕ 等; 平均水深变化对河口口下游段($x=0\sim 60\text{km}$)的潮汐动力影响较大, 而对河口上游段($x=60\sim 78\text{km}$)影响较弱; 主要半日分潮(M_2 、 S_2 、 N_2)对水深变化的响应略大于全日分潮(K_1 、 O_1); 航道疏浚幅度小于 2m 时, 对河口潮汐动力格局影响不大, 而当疏浚幅度大于 2m 时, 将对河口潮汐动力格局及水环境(如盐水入侵等)产生较大影响; 河道淤积将导致潮汐动力减弱, 流速振幅、潮波振幅及传播速度减小, 流速和水位之间的相位差也减小。

关键词: 潮汐动力、航道疏浚、河道淤积、解析模型、Guadiana 河口

中图分类号: P731 文献标识码: A 文章编号: 1009-5470(2020)01-0001-11

Response of tidal dynamics to the variation of water depth: case study of Guadiana estuary in Portugal

ZHANG Ping^{1,2,3,4}, XIE Meifang^{1,2,3,4}, YANG Hao^{1,2,3,4}, CAI Huayang^{1,2,3,4}, Ou Suying^{1,2,3,4},
YANG Qingshu^{1,2,3,4}

1. Institute of Estuarine and Coastal Research, School of Marine Sciences, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275 China;

2. State and Local Joint Engineering Laboratory of Estuarine Hydraulic Technology, Guangzhou 510275 China;

3. Guangdong Provincial Engineering Research Center of Coasts, Islands and Reefs, Guangzhou 510275 China;

4. Southern Laboratory of Ocean Science and Engineering, Zhuhai 519082, China

Abstract: Quantifying the impacts of human-induced (such as dredging for navigational channels) or natural (such as global

收稿日期: 2019-04-09; 修订日期: 2019-05-31。孙淑杰编辑

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0402600); 国家自然科学基金项目(5170928); 河口海岸学国家重点实验室开放课题基金资助项目(SKLEC-KF201809); 广东省自然科学基金项目(2017A030310321); 广东省水利科技创新项目(2016-20)

作者简介: 张萍(1995—), 女, 广东省韶关市人, 硕士研究生, 主要从事河口海岸动力学研究。E-mail: zhangp256@mail2.sysu.edu.cn

*感谢所有对本文付出努力的人, 感谢各位审稿专家对本文提出的宝贵建议。

Received date: 2019-04-09; **Revised date:** 2019-05-31. Editor: SUN Shujie

Foundation item: National Key Research and Development Program of China(2016YFC0402600); National Natural Science Foundation of China (5170928); Open Research Found of State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research (SKLEC-KF201809); Guangdong Provincial Natural Science Foundation of China (2017A030310321); the Water Resource Science and Technology Innovation Program of Guangdong Province (2016-20)

Corresponding author: CAI Huayang, E-mail: caihy7@mail.sysu.edu.cn

sea level rise) interventions on estuarine environment is an important issue for estuary and coastal studies. For given simplified geometry and dynamics, analytical models are capable of rapidly identify the influence of human-induced or natural interventions on estuarine environment, which are invaluable tools for exploring response of tidal dynamics to external forcing. In this study, a one-dimensional hydrodynamic analytical model was used to explore the response of tidal dynamics in terms of different constituents to variation of tidally averaged water depth (mimicking the channel dredging and deposition) in the Guadiana estuary in Portugal, building on previous studies on nonlinear frictional interaction between different tidal constituents. The results show that the influence of variable depth on tidal dynamics in the seaward reach ($x=0-60$ km) is stronger compared to that in the landward reach ($x=60-78$ km). In particular, the influence of variable depth on the predominant semi-diurnal tides (M_2 , S_2 , N_2) is larger than that on diurnal tides (K_1 , O_1). Analytical results also indicate that the basic tidal dynamic pattern along the estuary is more or less the same for a less intensive dredging of less than 2 m, while the pattern may substantially change for an intensive dredging activity. In addition, the channel bed deposition will weaken the tidal dynamics with a decrease of tidal amplitude, velocity amplitude, tidal wave celerity, and the phase lag between velocity and the elevation also decreases.

Key words: tidal dynamics; channel dredging; channel deposition; analytical model; Guadiana estuary

潮汐动力是潮优型河口物质沿河流方向上溯的主要动力,其时空变化直接影响河口区域泥沙、营养盐、污染物、盐度等要素的输运及扩散过程(Falcão et al, 2009; Bonaldo et al, 2014; 丁芮等, 2016)。因此,研究潮汐传播的变化过程及机制对河口的防洪、灌溉、航运和生态系统的保护等具有重要的指导意义。一维潮波传播解析模型作为一种重要的数学工具,已被广泛应用于探究河口潮汐动力的基本过程及机制。研究表明,潮波在沿河道向上传播的过程中,将受到底床摩擦、河道地形及径流等的非线性作用,主要潮波传播变量(如潮波振幅、流速振幅、传播速度、流速和水位之间的相位差等)具有明显的多时空尺度变化(Cai et al, 2018b)。大多数解析模型基于线性化的圣维南方程组,仅考虑单一主要分潮(如 M_2 分潮)的传播过程,然而,其他天文分潮(如 N_2 、 S_2 、 K_1 、 O_1)与主要分潮之间的非线性相互作用及其产生的潮流不对称作用是尚待深入的基础前沿问题。

为研究不同分潮的非线性相互作用,通常对一维动量守恒方程中的二次流速项 $u|u|$ (u 为断面平均流速)进行级数展开并近似截断,例如傅里叶级数展开(Dronkers, 1964; Pingree, 1983; Inoue et al, 2007)。部分学者认为,假如潮波仅由一个主要分潮和一个次要分潮构成,且次要分潮的振幅远小于主要分潮,那么次要分潮所受的有效摩擦要比主要分潮大 50%(Jeffreys, 1970; Heaps, 1978; Prandle, 1997)。随后,不同学者不断提高分潮有效摩擦表达式的准确性,并允许同时考虑多个分潮的非线性相互作用(Pingree, 1983; Fang, 1987; Inoue et al, 2007)。Pingree(1983)通过傅里叶方法探究了 M_2 和 S_2 分潮

之间的非线性相互作用,推导出主要分潮 M_2 的二阶有效摩擦系数和次要分潮 S_2 的四阶有效摩擦系数。另一些学者利用二次流速项 $u|u|$ 是奇函数的特性,采用 Chebyshev 多项式分解方法将 $u|u|$ 分解为 2 个或 3 个表达式,如 $\alpha u + \beta u^3$ 或者 $\alpha u + \beta u^3 + \xi u^5$, 其中 α 、 β 和 ξ 均是数值常数(Doodson, 1924; Dronkers, 1964; Godin, 1991, 1999)。线性项 αu 代表不同分潮的线性叠加,而不同分潮的非线性相互作用主要用三阶项 βu^3 和五阶项 ξu^5 来表示。最近, Cai 等(2018b)基于 Chebyshev 多项式分解方法推导出不同分潮的有效摩擦公式,采用迭代法计算不同分潮之间的非线性相互作用,并应用于葡萄牙 Guadiana 和西班牙 Guadalquivir 两个典型的潮优型河口,成功反演主要分潮的传播过程及其机制。

影响潮汐动力的因素众多,其中航道疏浚及全球海平面上升引起的沿程水深变化对潮汐动力(如分潮振幅、相位、河口环流等)(刘俊勇等, 2006; Chernetsky et al, 2010; Ensing et al, 2015; Zhu et al, 2015)、泥沙输运(如悬沙浓度、最大浑浊带形成变化等)(刘伟东等, 2007; 郑志华等, 2008)及河口水环境(如盐淡水混合、分层、盐水入侵等)(庞启秀等, 2005; Zhu et al, 2015)的影响备受关注。针对潮汐动力变化,大量研究表明水深增大将导致河口有效摩擦减小,进而引起潮汐动力增强,包括潮差及潮波传播速度的沿程增大,如英国的 Thames 河口(Amin, 1983), 荷兰的 Rhine-Meuse 河口(Vellinga et al, 2014), 德国的 Elbe 河口和 Ems 河口, 法国的 Loire 河口(Winterwerp et al, 2013), 美国的 Delaware 河口、Columbia 河口(Jay et al, 2011)、Cape Fear 河口(Familkhalili et al, 2016)、Newark 湾, (Chant et al,

2018)、Hudson 河口(Ralston et al, 2019)以及中国的珠江河口(Cai et al, 2018a)和钱塘湾河口(李薇等, 2018)。受潮汐动力增强的影响, 部分河口的悬沙浓度明显增大, 且最大浑浊带显著往河口上游方向移动(Talke et al, 2009; de Jonge et al, 2014; Jalón-Rojas et al, 2016), 甚至导致河口性质发生异变(Winterwerp, 2011)。虽然针对水深变化引起的潮汐动力时空变化问题已经取得相当丰硕的研究成果, 但不同天文分潮对水深变化的响应机制仍然是有待进一步深入研究的科学问题。

本文基于 Cai 等(2018b)对葡萄牙 Guadiana 河口不同分潮之间非线性相互作用的研究, 进一步采用一维水动力解析模型探讨半封闭潮优型河口主要天文分潮的潮波传播过程及其对水深变化(模拟人为航道疏浚与河道淤积)的响应机制。研究成果可为河口区综合整治及水资源高效开发利用等提供理论科学依据。

1 研究方法

1.1 一维潮波传播解析模型

Cai 等(2018b)提出的一维潮波传播解析模型是基于地形概化与简化动力条件得到的: 在河口潮汐动力简化方面, 假定潮波传播的解析解是由主要天文分潮(M_2 、 N_2 、 S_2 、 K_1 、 O_1)线性叠加而成, 不考虑科氏力、密度梯度力(或盐度影响)以及上游下泄径流流量的影响; 在地形概化方面, 假定河道沿程宽度和横截面积呈指数规律减小。因此, 该解析模型适用于科氏力、密度梯度以及径流流量对潮波传播影响较小的潮优型河口。在该一维潮波传播解析模型中, 假定半封闭河口的平均横截面积 \bar{A} 与平均横截面宽度 \bar{B} 呈指数函数变化:

$$\bar{A} = \bar{A}_0 \exp\left(-\frac{x}{a}\right) \quad (1)$$

$$\bar{B} = \bar{B}_0 \exp\left(-\frac{x}{b}\right) \quad (2)$$

式中 \bar{A}_0 和 \bar{B}_0 为河口口门处的潮平均横截面积和宽度, a 和 b 分别代表横截面积和宽度的收敛长度, x 表示从口门(即外海边界)向上游延伸的距离, 规定向陆方向为正。假定横截面为矩形, 则潮平均水深为 $\bar{h} = \bar{A}/\bar{B}$ 。

忽略斜压梯度(即密度梯度)的影响, 一维动量守恒方程表示为:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + g \frac{\partial z}{\partial x} + g \frac{u|u|}{K^2 h^{4/3}} = 0 \quad (3)$$

式中的 u 、 g 、 h 、 z 、 K 分别表示断面平均流速、重

力加速度、水深、自由水面高程和 Manning-Strickler 摩擦系数(即曼宁系数的倒数)。

假定上游下泄流量可忽略, 且潮波振幅相对于平均水深为极小量, 忽略惯性加速度项 $u \frac{\partial u}{\partial x}$, 但保留由非线性摩擦项所产生的不同分潮之间的非线性相互作用, 得到线性化的动量守恒方程:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + g \frac{\partial z}{\partial x} + \kappa u|u| = 0 \quad (4)$$

式中摩擦系数 κ 为:

$$\kappa = \frac{g}{K^2 h^{4/3}} \quad (5)$$

潮波进入河口后, 假设水质点做简谐波运动, 描述潮波特征的物理量有: 潮波传播速度 c 、潮波振幅 η 、流速振幅 v 。Toffolon 等(2011)指出, 在半封闭河口, 主要潮汐动力变量可由地形(河宽和水深)和口门潮汐动力因素(潮波振幅和频率)表示的无量纲参数决定, 如无量纲潮波振幅 ζ 、河口形状参数 γ 、摩擦参数 χ 、流速振幅参数 μ 、波速参数 λ 、潮波振幅增大/衰减率参数 δ 以及流速与水位之间的相位差 ϕ 等。其中, γ 和 χ 是自变量, 而 μ 、 λ 、 δ 和 ϕ 为因变量。自变量的表达式如下:

$$\gamma = \frac{c_0}{\omega a} \quad (6)$$

$$\chi = r_s \zeta \frac{c_0 g}{K^2 \omega h^{4/3}} \quad (7)$$

式中 $\omega = 1/T$ 为潮波频率(T 为潮波周期), c_0 和 ζ 的定义分别为:

$$c_0 = \sqrt{g \bar{h} / r_s} \quad (8)$$

$$\zeta = \frac{\eta}{h} \quad (9)$$

式中 \bar{h} 表示潮平均水深, r_s 表示高潮时纳潮通道的河宽 B_s 与潮平均河宽 \bar{B} 之比。无量纲因变量的表达式如下:

$$\mu = \frac{1}{r_s} \frac{v \bar{h}}{\eta c_0} \quad (10)$$

$$\lambda = \frac{c_0}{c} \quad (11)$$

$$\delta = \frac{1}{\eta} \frac{d\eta}{dx} \frac{c_0}{\omega} \quad (12)$$

$$\phi = \phi_V - \phi_A \quad (13)$$

式中 ϕ_V 和 ϕ_A 分别表示流速和水位的相位。

1.2 不同分潮之间的非线性相互作用

为探讨不同分潮之间的非线性相互作用, 采用

Chebyshev 多项式分解方法线性化二次流速项并与仅考虑单一主要分潮的潮波传播解析模型相结合, 二次流速项可用如下 Chebyshev 多项式进行展开 (Godin, 1991, 1999):

$$u|u| = \hat{v}^2 \left[\alpha \left(\frac{u}{\hat{v}} \right) + \beta \left(\frac{u}{\hat{v}} \right)^3 \right] \quad (14)$$

式中 \hat{v} 为所有天文分潮的振幅之和, $\alpha = \frac{16}{15\pi}$ 和

$\beta = \frac{32}{15\pi}$ 为 Chebyshev 多项式数值常数。

对于 n 个 ($n-2$) 分潮情况, 二次流速项可扩展为:

$$u|u| \cong \frac{8}{3\pi} \hat{v}^2 \sum_{i=1}^n F_i \varepsilon_i \cos(\omega_i t) \quad (15)$$

式中 ε_i 表示振幅与最大流速之比, F_i 为有效摩擦系数:

$$F_i = \frac{3\pi}{8} \left\{ \alpha + \beta \left[\sum_{i=1, i \neq j}^n \varepsilon_i^2 - \frac{3}{4} \varepsilon_j^2 \right] \right\} \quad (16)$$

其中 $\sum_{i=1}^n \varepsilon_i = 1$ 。第 i 个天文分潮的线性化动量守恒方程表示为:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + g \frac{\partial z_i}{\partial x} + f_i r_i u_i = 0 \quad (17)$$

式中 $r_i = \kappa \frac{8}{3\pi} v_i$ 。基于一维动量守恒方程进行理论推导, 相比仅考虑单一主要分潮, 为正确反演不同分潮的潮波传播过程, 需引入有效摩擦的更正系数:

$$f_i = \frac{F_i}{\varepsilon_i} \quad (18)$$

对于次要分潮, 由于 ε_i 较小导致其有效摩擦的更正系数值 f_i 较大。

1.3 半封闭河口潮波传播解析解

根据 Toffolon 等(2011)半封闭河口潮波传播解析模型, 潮波振幅和相位的解析解如下:

$$\eta = \zeta_0 \bar{h}_0 |A^*|, \quad v = r_s \zeta_0 c_0 |V^*| \quad (19)$$

$$\tan(\phi_A) = \frac{\Im(A^*)}{\Re(A^*)}, \quad \tan(\phi_V) = \frac{\Im(V^*)}{\Re(V^*)} \quad (20)$$

式中 \Re 和 \Im 分别表示实部和虚部, A^* 和 V^* 为沿无量纲坐标 $x^* = x/(c_0 T)$ 的振幅复变函数, 其表达式分别为:

$$A^* = a_1^* \exp(\omega_1^* x^*) + a_2^* \exp(\omega_2^* x^*) \quad (21)$$

$$V^* = v_1^* \exp(\omega_1^* x^*) + v_2^* \exp(\omega_2^* x^*) \quad (22)$$

经过一系列的代数运算((详细推导见 Toffolon

等(2011)和 Cai 等(2016)), 方程(21)和(22)中未知变量的解析解为:

$$a_1^* = \left[1 + \exp\left(\Lambda L^*\right) \frac{\Lambda + \gamma/2}{\Lambda - \gamma/2} \right]^{-1}, \quad v_1^* = \frac{-i a_1^*}{\Lambda - \gamma/2}, \quad \omega_1^* = \gamma/2 + \Lambda \quad (23)$$

$$a_2^* = 1 - a_1^*, \quad v_2^* = \frac{-i(1 - a_1^*)}{\Lambda + \gamma/2}, \quad \omega_2^* = \gamma/2 - \Lambda \quad (24)$$

式中 Λ 为复数变量, 表达式为:

$$\Lambda = \sqrt{\frac{\gamma^2}{4} - 1 + i\hat{\chi}}, \quad \hat{\chi} = \frac{8}{3\pi} \mu \chi \quad (25)$$

L^* 为河口向陆边界的距离, 定义为:

$$L^* = L_e^* - x^* \quad (26)$$

其中 L_e^* 为河口总长度, 基于计算得到 A^* 和 V^* , 主要无量纲潮波变量可通过以下表达式计算得到:

$$\mu = |V^*| \quad (27)$$

$$\mu = \Re\left(\frac{1}{A^*} \frac{dA^*}{dX^*}\right) \quad (28)$$

$$\lambda = \Im\left(\frac{1}{A^*} \frac{dA^*}{dX^*}\right) \quad (29)$$

此外, 在半封闭河口, 潮波振幅的反射系数可定义为:

$$\psi_A = \left| \frac{a_1^*}{a_2^*} \right| \quad (30)$$

2 解析模型在 Guadiana 河口中的应用

2.1 研究区域

Guadiana 河口位于西班牙和葡萄牙之间的南部边界, 总长度为 78km, 连接 Guadiana 和 Cardiss 湾, 其位置如图 1 所示。由于 Guadiana 河口的地形相对简单, 由单一狭窄的河道组成, 沿程水深变化相对较缓慢, 且受上游拦潮坝的径流调节, 河口纳潮量显著大于径流流量, 在径流流量较小的情况下, 河口混合均匀且潮汐动力为主导, 因此, 该河口适合于探究平均水深变化对河口潮汐动力的影响研究。河口的平均横截面积 \bar{A} 与平均横截面宽度 \bar{B} 可由指数函数(1)和(2)拟合, 其拟合参数(即横截面积和宽度的收敛长度)分别为 $a=31\text{km}$ 和 $b=38\text{km}$ (Cai et al, 2018b)。河口沿程水深为 4~8m, 平均水深为 5.5m。由于上游大坝的流量调节, 河口的涨潮流量比径流量高出几个数量级, 径流对潮波传播的影响较小。在低流量条件下, 河口充分混合, 其河口动力过程主要受潮汐动力驱动。Guadiana 河口表现为规则半

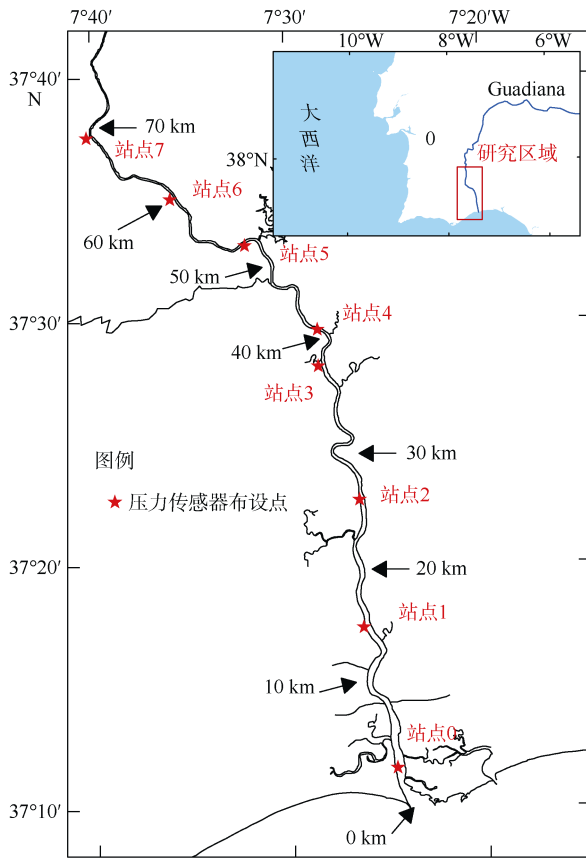


图1 Guadiana 河口位置图

Fig. 1 Sketch map of Guadiana estuary

日中潮河口, 平均潮差为 2m, 大、小潮平均潮差分别为 2.56m 和 1.28m(Garel et al, 2009)。

2.2 半封闭河口解析模型的率定与验证

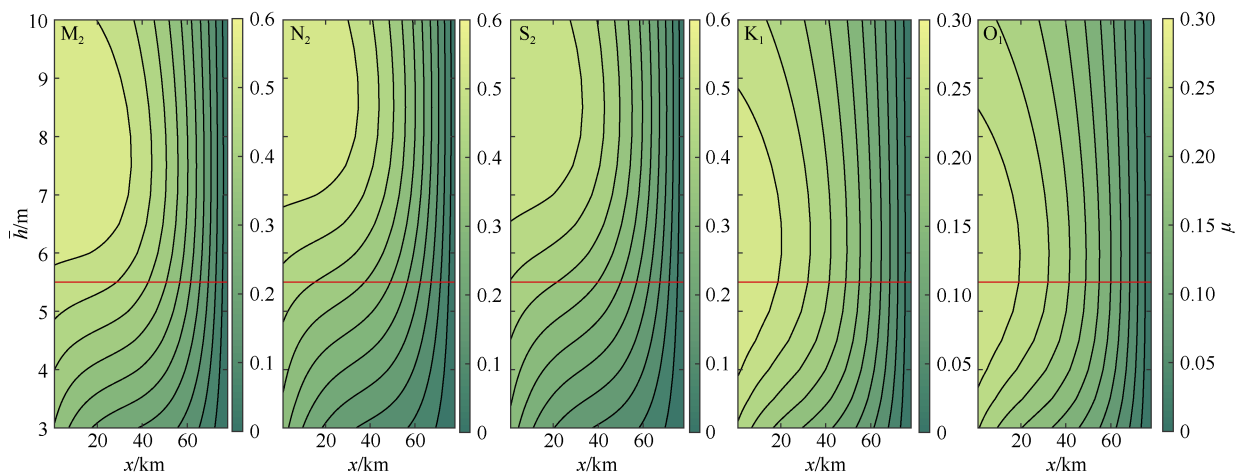
Guadiana 河口的实测潮水位数据是由 8 个压力

传感器实测得出, 它们分别布设在相隔大约 10km 的站点。传感器记录时间为 2015 年 7 月 31 日至 9 月 25 日, 观测时间处于可忽略径流影响的枯季时段(该时段的月均径流量小于 $20\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)。各站点的实测水位数据使用基于 MATLAB 编写的调和工具箱 U-TIDE 模型进行分析, 得到主要分潮的振幅与相位(Codiga, 2000), 解析模型采用河口沿程平均水深(即 5.5m), 且假定 $r_s=1$ (即高潮时纳潮通道的宽度 B_s 等于潮平均河宽 \bar{B})。对比主要天文分潮振幅和相位计算值与实测值的吻合度, 得到模型率定和验证的参数, 即 $K=42\text{m}^{1/3}\cdot\text{s}^{-1}$ 。率定和验证过程可参考 Cai 等(2018b)。

2.3 河口主要潮波变量对平均水深变化的响应过程

在保持模型率定参数(即 Manning-Stricker 摩擦系数 K)不变的条件下, 通过改变河口的平均水深 \bar{h} (变化范围为 3~10m), 分析主要天文分潮(M_2 、 S_2 、 N_2 、 K_1 和 O_1)的无量纲潮波变量(包括流速振幅参数 μ 、波速参数 λ 、潮波振幅增大/衰减率参数 δ 以及流速与水位之间的相位差 ϕ)的沿程变化(图 2—图 5)。图 2—图 5 显示在河口下游($x=0\sim 60\text{km}$)处, 各个分潮主要潮波变量随距离和平均水深的等值线分布较为密集, 表明河口下游潮波变量受河口平面形态(即河宽)变化的影响较大。

各个分潮流速振幅参数 μ 随距离和平均水深变化的等值线分布图如图 2 所示, μ 值越大表明河口流速振幅相对无摩擦矩形河口的流速振幅越大(见公式 9)。在河口下游($x=0\sim 60\text{km}$), 随着平均水深的增

图2 Guadiana 河口主要天文分潮(M_2 、 S_2 、 N_2 、 K_1 、 O_1)流速振幅参数 μ 随着平均水深变化的等值线分布图

红色实线代表实际平均水深 $\bar{h}=5.5\text{m}$

Fig. 2 Contour plot of velocity number μ for main tidal constituents (M_2 , S_2 , N_2 , K_1 , O_1) under different mean water depth conditions, with the red line indicating the actual mean depth $\bar{h}=5.5\text{ m}$

加, 半日分潮族(M_2 、 S_2 和 N_2)的流速振幅参数 μ 逐渐增大, 而全日分潮族(K_1 和 O_1)呈现先增大后减小的变化规律。而在河口上游($x=60\sim 78\text{km}$), 各个分潮的流速振幅参数 μ 几乎不受平均水深变化的影响, 且均为较小值(上游封闭端 $\mu=0$)。此外, 由图 2 还可知, 平均水深的变化对半日分潮族的影响大于全日分潮族, 这是由于全日分潮族的流速振幅与潮波振幅之比(即 v/η)远小于半日分潮族。

图 3 为各个分潮的潮波振幅增大/衰减率参数 δ 随距离和平均水深变化的等值线分布图。 $\delta>0$ 表示潮波振幅沿程增大, $\delta<0$ 表示潮波振幅沿程衰减, 而 $\delta=0$ 表

示潮波振幅沿程不变(见公式 10)。由图可见, 随着平均水深增加, 半日分潮族和全日分潮族的潮波振幅增大/衰减率参数 δ 逐渐增大, 但在河口上游($x=60\sim 78\text{km}$), 潮波振幅增大/衰减率参数 δ 基本趋于不变。图 3 中蓝色实线下部 δ 为负值(表示潮波振幅沿程衰减), 而蓝色实线上部为正值(表示潮波振幅沿程增大)。随着平均水深的增大, 图 3 中蓝色实线与红色实线的交点横坐标逐渐减小, 表明各个分潮沿程振幅最小值在河口沿程出现的位置逐渐向海方向推移, 但当水深增加超过某临界值后(如平均水深大于 7m 时, $\delta_{M_2}=0$), 河口潮波振幅沿程增大, 此时口门处潮波振幅最小。

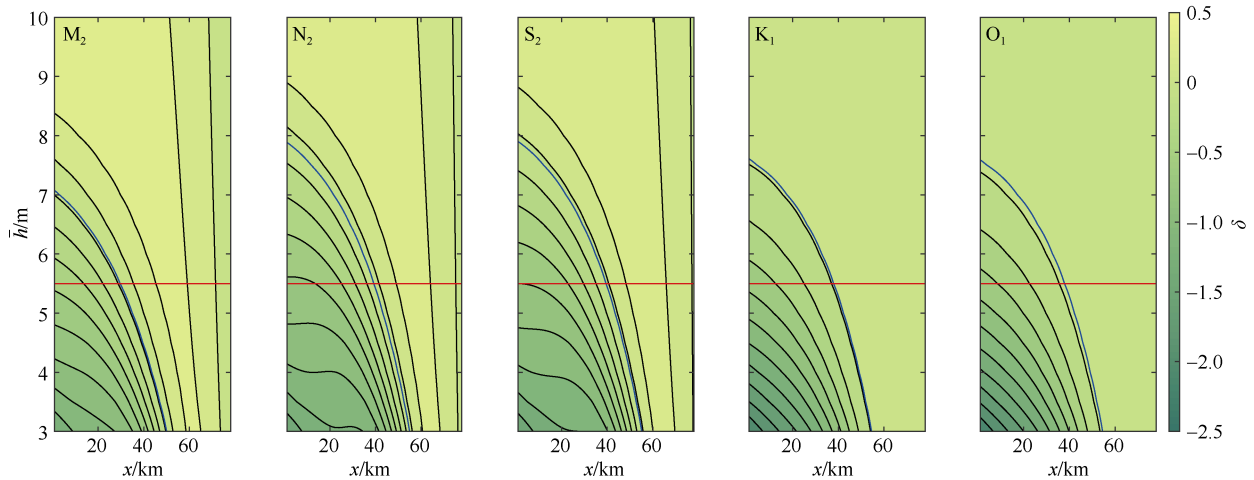


图 3 Guadiana 河口主要天文分潮(M_2 、 S_2 、 N_2 、 K_1 、 O_1)衰减率参数 δ 随平均水深变化的等值线分布图

红色实线代表河口实际平均水深 $\bar{h}=5.5\text{m}$; 蓝色线条为 $\delta=0$

Fig. 3 Contour plot of damping number δ for main tidal constituents (M_2 , S_2 , N_2 , K_1 , O_1) under different mean water depth conditions. The red line indicates the actual mean depth $\bar{h}=5.5\text{ m}$, and the blue line indicates $\delta=0$

由公式 11 可知, $\lambda<1$ 表示实际潮波传播速度大于无摩擦矩形河口潮波传播速度(即 $c>c_0$, $c_0=\sqrt{gh/r_s}$), 反之 $\lambda>1$ 表示 $c<c_0$, 而 $\lambda=1$ 表示 $c=c_0$ (见公式 11)。图 4(各个分潮的波速参数 λ 随距离和平均水深变化的等值线分布图)说明随着平均水深增大, 各分潮波速参数 λ 逐渐减小, 表明潮波传播速度逐渐增加。在上游封闭端 $\lambda=0$, 表示潮波传播速度趋于无穷大, 这主要是由于入射波与反射波叠加, 在封闭端形成驻波引起的。当河口为无限长时(不考虑封闭端反射波影响), 波速参数 λ 用潮波振幅增大/衰减率参数 δ 表示为 $\lambda=\sqrt{1-\delta(\gamma-\delta)}$, 因此, 当 $\lambda<1$ 时 $\delta>0$, 而当 $\lambda>1$ 时 $\delta<0$ 。对比图 3、4 可知, 波速参数 λ 与潮波振幅增大/衰减率参数 δ 对水深变化的响应规律基本相反, 变化趋势恰好相反, 曲线形状相似但不完全相同, 主要是由于河口潮波传播还受上游封闭端反射波的影响。图 4 中蓝色实线以

下 $\lambda>1$, 蓝色实线以上 $\lambda<1$, 而蓝色实线表示 $\lambda=1$ 。随着平均水深增大, 各分潮潮波传播速度临界值出现的位置(即 $\lambda=1$ 处)逐渐向海方向推移, 但当超过某个临界水深值后(如平均水深大于 8m 时, $\lambda_{M_2}=1$), 河口潮波传播速度均大于无摩擦矩形河口潮波传播速度, 且传播速度的最小值出现在口门处。

由各个分潮流速与水位之间的相位差 ϕ 随距离和平均水深变化的等值线分布图(图 5)可知, 随着平均水深的增加, 相位差 ϕ 逐渐增大, 表明潮波性质逐渐趋于驻波。在河口上游($x=60\sim 78\text{km}$), 流速与水位之间的相位差接近 90° (驻波), 主要受反射波与入射波叠加的影响, 且反射波在河口上游的影响强于河口下游(Cai et al, 2018b)。对比图 5 中半日分潮族与全日分潮族的相位差变化情况, 可知全日分潮族的相位差大于半日分潮族, 且平均水深的变化对半日分潮的影响大于全日分潮。根据 Cai(2014)的一

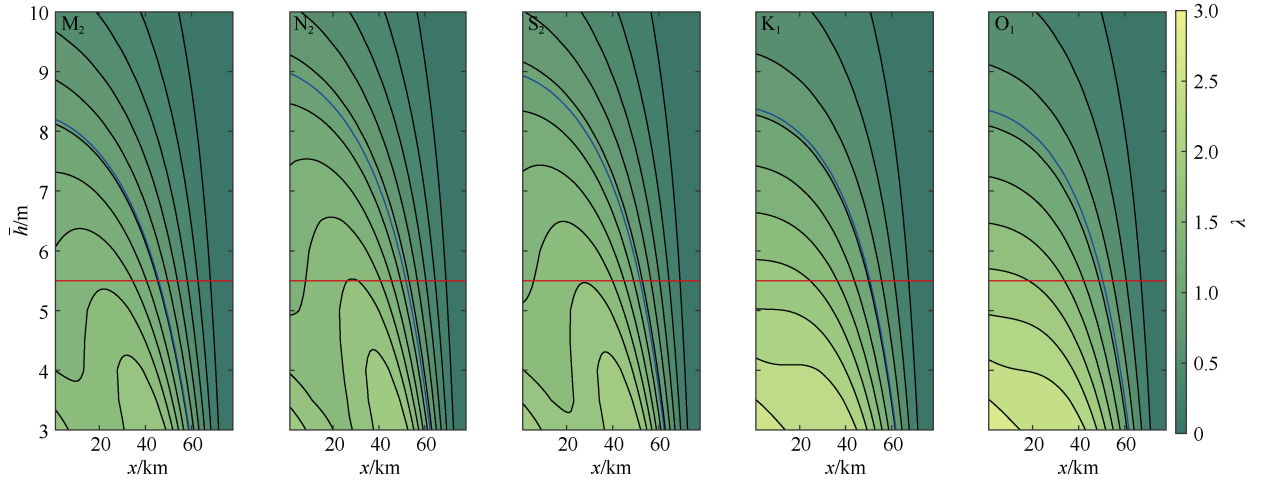


图 4 Guadiana 河口主要天文分潮(M_2 、 S_2 、 N_2 、 K_1 、 O_1)波速参数 λ 随平均水深变化的等值线分布图

红色实线代表河口实际平均水深 $\bar{h}=5.5\text{m}$ 。蓝色线条为 $\lambda=1$

Fig. 4 Contour plot of celerity number λ for main tidal constituents (M_2 , S_2 , N_2 , K_1 , O_1) under different mean water conditions. The red line indicates the actual mean depth $\bar{h}=5.5\text{ m}$, and the blue line indicates $\lambda=1$

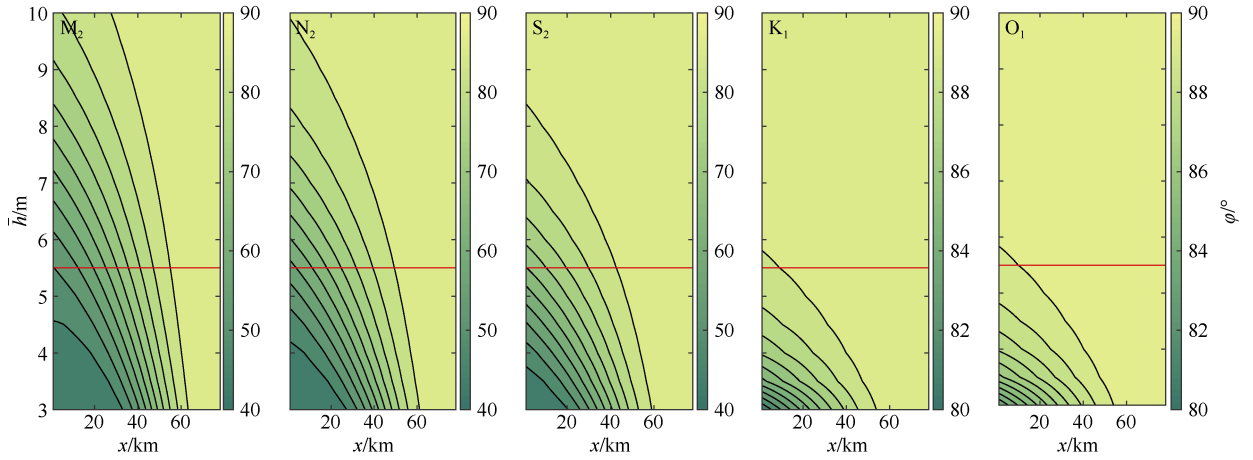


图 5 Guadiana 河口主要天文分潮(M_2 、 S_2 、 N_2 、 K_1 、 O_1)流速与水位之间的相位差 ϕ 随着平均水深变化的等值线分布图

红色实线代表河口实际平均水深 $\bar{h}=5.5\text{m}$

Fig. 5 Contour plot of phase difference between current and elevation for main tidal constituents (M_2 , S_2 , N_2 , K_1 , O_1) under different mean water depth condition. The red line indicates the actual mean depth $\bar{h}=5.5\text{ m}$

维潮波理论模型，河口下游(此区域反射波的影响可近似忽略)流速与水位之间的相位差可近似表达为 $\tan \phi = (\gamma - \delta) / \lambda$ (无限长河口相位差表达式)，表明相位差主要受不同分潮的潮波振幅增大/衰减率参数 δ 、波速参数 λ 和河口的形状参数 γ 的控制。由河口形状参数 γ 的定义(6)可知，半日分潮的频率近似为全日分潮的两倍，因此其 γ 值约为全日分潮的 $1/2$ 。

2.4 河口主要潮波变量的沿程平均变化量及变化率
平均水深引起的河口主要潮波变量(即流速参数 μ 、潮波振幅衰减率参数 δ 、波数参数 λ 以及流速与水位之间的相位差 ϕ)的沿程变化量 ψ 以及变化率 σ 可用如下公式计算：

$$\psi_i = \tau_i - \tau, \quad (i=1,2,3,4) \quad (31)$$

$$\sigma_i = (\tau_i - \tau) / \tau, \quad (i=1,2,3,4) \quad (32)$$

式中 τ 代表真实水深情况 $\bar{h}=5.5\text{m}$ 条件下的主要潮波变量， τ_i ($i=1,2,3,4$) 分别代表水深 $\bar{h}=3.5\text{m}$ 、 $\bar{h}=6.5\text{m}$ 、 $\bar{h}=7.5\text{m}$ 和 $\bar{h}=10\text{m}$ 条件下的主要潮波变量。表 1 为不同水深变化条件下半日分潮族和全日分潮族的主要潮波变量相对河口实际平均水深基本条件下的变化量和变化率。由表 1 可见，半日分潮族的主要潮波变量的变化量与变化率总体大于全日分潮族。当平均水深 $\bar{h}=3.5\text{m}$ 时，流速参数 μ 、潮波振幅增大/衰减率参数 δ 以及流速与水位之间的相位差 ϕ 相对河口实际平均水深的变化量均为负值，波

数参数 λ 变化量为正值, 即平均水深减小导致潮汐动力减弱, 流速振幅、潮波振幅及传播速度减小, 流速和水位之间的相位差也减小。此外, 主要天文分潮潮波变量随平均水深增大的变化呈现明显的非线性, 尤其是 M_2 分潮的流速参数 μ 在平均水深从 $\bar{h}=3.5\text{m}$ 逐渐增大至 $\bar{h}=6.5\text{m}$ 、 $\bar{h}=7.5\text{m}$ 时, 相对实际水深的变化率逐渐增大, 但当平均水深变化至 $\bar{h}=10\text{m}$ 时, 其变化率反而减小至 4.99%, 表明平均水深增大导致流速振幅增大, 但当平均水深增大超过一定阈值后流速振幅减小。该现象的出现和水深

超过一定阈值潮波性质趋于驻波(即 $\phi=90^\circ$)有关(如图 5 所示)。另外, 由表 1 中各个主要潮波振幅参数的相对变化率可知, 平均水深增大(模拟航道疏浚的影响)幅度等于 1m ($\bar{h}=6.5\text{m}$) 时, 各个参数的变化率均在 20% 以下, 当平均水深增大幅度等于 2m 时 ($\bar{h}=7.5\text{m}$), 各个参数的变化率约为变化幅度等于 1m 时的 2 倍(即 $\psi_3 \approx 2\psi_2$), 其数值较大, 甚至高达 70%。因此, 小幅度的航道疏浚对河口整体的潮汐动力格局影响不大, 但当平均水深增大幅度大于 2m 时, 将对河口潮动力格局及水环境(如盐水入侵等)产生较大影响。

表 1 Guadiana 河口主要天文分潮(M_2 、 S_2 、 N_2 、 K_1 、 O_1)无量纲潮波变量参数相对河口实际平均水深条件下的变化量 ψ (单位: m)和变化率 σ (单位: %)

Tab. 1 Change range (units: m) and relative change (units: %) in the main dimensionless parameters due to the depth variation when compared with the cause of actual mean water depth for different tidal constituents (M_2 , S_2 , N_2 , K_1 , O_1)

		半日分潮			全日分潮	
		M_2	N_2	S_2	K_1	O_1
流速参数(μ)	ψ_1/σ_1	-0.14/-35.89	-0.13/-39.92	-0.12/-39.07	-0.04/-21.07	-0.03/-18.30
	ψ_2/σ_2	0.04/10.74	0.06/17.90	0.05/16.36	0.002/0.78	-0.001/-0.36
	ψ_3/σ_3	0.06/14.76	0.10/30.82	0.08/27.34	-0.003/-1.75	-0.007/-3.49
	ψ_4/σ_4	0.02/4.99	0.10/31.15	0.08/25.88	-0.02/-12.55	-0.03/-14.48
潮波振幅衰减率参数(δ)	ψ_1/σ_1	-0.37/-15.95*	-0.40/-3.01*	-0.41/-2.91*	-0.49/-4.87*	-0.48/-5.16*
	ψ_2/σ_2	0.13/5.66*	0.17/1.259*	0.17/0.18*	0.12/-1.22*	0.12/-1.23*
	ψ_3/σ_3	0.22/9.46*	0.30/2.27*	0.29/2.10*	0.19/1.93*	0.18/1.92*
	ψ_4/σ_4	0.29/12.36*	0.44/3.32*	0.43/3.04*	0.25/2.47*	0.23/2.45*
波速参数(λ)	ψ_1/σ_1	0.28/28.96	0.28/24.86	0.30/25.90	0.56/46.13	0.60/48.86
	ψ_2/σ_2	-0.17/-16.81	-0.16/-14.14	-0.17/-14.67	-0.26/-21.12	-0.26/-21.57
	ψ_3/σ_3	-0.34/-34.19	-0.34/-30.07	-0.35/-30.87	-0.48/-39.70	-0.49/-40.23
	ψ_4/σ_4	-0.67/-68.13	-0.732/-65.03	-0.75/-65.48	-0.87/-71.11	-0.87/-71.41
水位与流速之间的 相位差(ϕ)	ψ_1/σ_1	-9.50/-12.85	-11.84/-15.08	-12.45/-15.04	-1.50/-1.67	-1.07/-1.19
	ψ_2/σ_2	4.27/5.76	4.32/5.50	3.28/3.97	0.16/0.18	0.12/0.13
	ψ_3/σ_3	7.79/10.53	7.15/9.10	4.99/6.03	0.24/0.27	0.42/0.19
	ψ_4/σ_4	12.86/17.39	10.04/12.78	6.51/7.86	0.32/0.35	0.23/0.26

注: “*”表示倍数关系。

2.5 平均水深变化对不同分潮潮波传播的影响机制

本文所用的河口潮波传播解析理论可用于揭示平均水深变化对不同分潮潮波传播的影响机制。平均水深 \bar{h} 的变化首先影响自变量 γ 和 χ , 进而影响主要的潮波变量(因变量)。此外, 半封闭河口上游封闭端的反射作用及其大小(用反射系数 ψ_A 表示)亦是控制潮波传播过程的主要因素。图 6 为主要天文分潮的地形参数 γ 和摩擦参数 χ 的沿程平均值随平均水深 \bar{h} 增大的变化情况。由图 6 可知, 随平均水深增大, γ 逐渐增大(即河道辐聚效应增强), 而 χ 逐渐减小(即底床摩擦效应减弱), 表明水深增大有利于增强潮汐动力。对于地形参数 γ (见式 6), 由于全日分潮族的

频率约为半日分潮族的一半, 因此, 平均水深增大对半日分潮族的影响小于全日分潮族。对于摩擦参数 χ (见式 7), 由于半日分潮族的振幅明显大于全日分潮族, 因此, 平均水深增大对半日分潮族的影响大于全日分潮族, 尤其是主要的半日分潮 M_2 。

图 7 为 Guadiana 河口主要天文分潮(M_2 、 S_2 、 N_2 、 K_1 、 O_1)反射系数 ψ_A 在河口上游顶端处($x=78\text{km}$)以及沿程平均值随平均水深 \bar{h} 增大的变化图。由图 7a 可见, 随平均水深增大, 河口上游封闭端处($x=78\text{km}$)半日分潮族的反射系数 ψ_A 逐渐增大且其值接近 1, 说明半日分潮族在半封闭河口上游封闭端具有较强的反射作用, 这种现象表明反射波受底

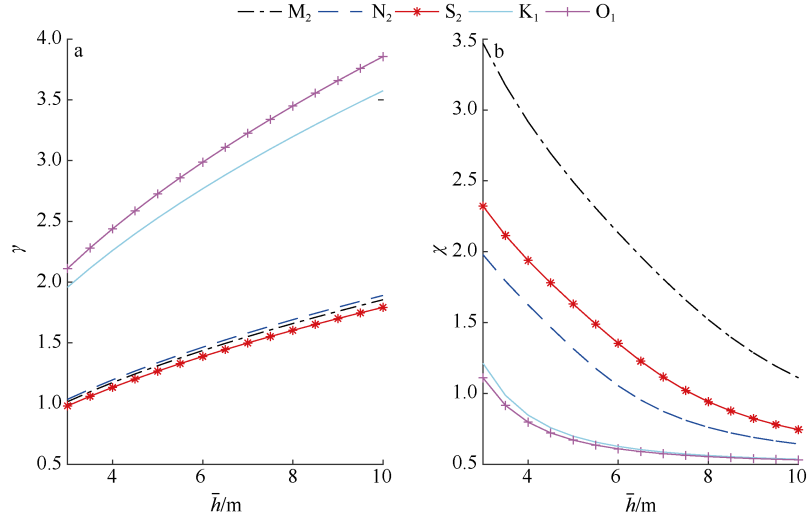


图 6 Guadiana 河口主要天文分潮(M_2 、 S_2 、 N_2 、 K_1 、 O_1)沿程的平均形状参数 γ (a)和摩擦参数 χ (b)随平均水深 \bar{h} 增大的变化图

Fig. 6 Variations of spatially averaged shape number γ (a) and friction number χ (b) for the main tidal constituents (M_2 , S_2 , N_2 , K_1 , O_1) with the increase of mean water depth

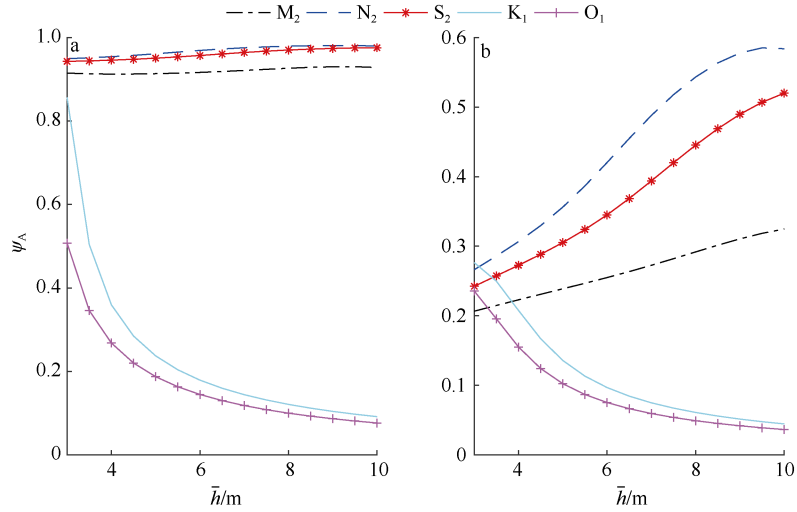


图 7 Guadiana 河口主要天文分潮(M_2 、 S_2 、 N_2 、 K_1 、 O_1)反射系数 ψ_A 在河口上游($x=78\text{km}$)(a) 和沿程平均值 (b) 随平均水深增大的变化图

Fig. 7 Variations of the reflection coefficient ψ_A in the upstream boundary ($x=78\text{km}$) (a) and its spatially averaged value (b) for the main tidal constituents (M_2 , S_2 , N_2 , K_1 , O_1) with increase of mean water depth

床摩擦的减弱效应强于河道地形的辐聚效应(见图 6)。而全日分潮族的反射系数 ψ_A 随平均水深增大逐渐减小, 但平均水深越大反射系数 ψ_A 减小的速率越慢, 当平均水深 \bar{h} 增大至 10m 时其值小于 0.1, 这种现象表明反射波受河道地形的辐散效应强于底床摩擦的减弱效应(图 6)。类似上游封闭端处, 由图 7b 可见, 随平均水深 \bar{h} 增大, 半日分潮族反射系数 ψ_A 的沿程平均值逐渐增大, 但主要半日分潮 M_2 的增大幅度最小, 而全日分潮族的 ψ_A 值逐渐减小。

3 结论

全球气候变化背景下强人类活动(如航道疏浚)对河口环境将产生显著影响, 而河口在受到强人类活动干扰后, 河口区域的潮汐动力格局可能会发生较大变化。本文选取葡萄牙 Guadiana 河口作为研究区域, 应用解析模型分析河口平均水深变化对主要天文分潮的传播过程, 并揭示其响应机制, 主要得出以下几点结论:

1) 平均水深变化对潮汐动力的影响主要体现在河口下中游段($x=0\sim 60\text{km}$), 而对河口上游段($x=60\sim 78\text{km}$)的影响较弱。平均水深的增加导致各分

潮流速振幅、潮波振幅、潮波的传播速度以及流速和水位之间的相位差增大。

2) 相同水深变化引起的主要潮波变量变化幅度, 主要半日分潮(M_2 、 S_2 、 N_2)大于全日分潮(K_1 、 O_1)。

3) 当水深大于实际水深时(模拟人为航道疏浚), 相对实际水深变化大于 1m ($\bar{h}=6.5\sim 10\text{m}$)时, 主要分潮的流速振幅参数 μ 、潮波振幅增大/衰减率参数 δ 、波速参数 λ 的最大变化幅度总体大于相对实际水深

变化小于 2m ($\bar{h}=5.5\sim 6.5\text{m}$)时。即航道疏浚幅度小于 2m 时, 对河口潮汐动力格局影响不大; 而当疏浚幅度大于 2m 时, 将对河口潮汐动力格局及水环境(如盐水入侵等)产生较大影响。

4) 当水深小于实际水深时(模拟河道淤积), 各个分潮流速振幅、潮波振幅、潮波传播速度以及流速和水位之间的相位差减小, 说明河道淤积会导致河口潮汐动力减弱。

参考文献 References

- 丁芮, 陈学恩, 曲念东, 2016. 珠江口及邻近海域潮汐环流数值模拟 ——河口水交换和物质输运分析[J]. 中国海洋大学学报, 46(7): 1–10. DING RUI, CHEN XUEEN, QU NIANDONG, 2016. Three-dimensional high-resolution numerical study of the tide and circulation in the Pearl River Estuary and its adjacent waters Part I: estuarine mass transport and water exchange[J]. Periodical of Ocean University of China, 46(7): 1–10 (in Chinese with English abstract).
- 李薇, 苏正华, 徐弋琅, 等, 2018. 考虑泥沙减阻效应的潮波理论模型及其在钱塘江河口的应用[J]. 应用基础与工程科学学报, 26(5): 954–964. LI WEI, SU ZHENGHUA, XU YILANG, et al, 2018. Analytical study of tidal wave movement based on sediment-induced drag reduction and its application to the Qiantang estuary[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 26(5): 954–964 (in Chinese with English abstract).
- 刘伟东, 张心凤, 蒋星科, 2007. 珠海港高栏港区疏浚对港区泥沙回淤的影响分析[J]. 人民珠江, 28(2): 15–16, 42. LIU WEIDONG, ZHANG XINFENG, JIANG XINGKE, 2007. Analysis of the dredging work influence on the siltation in Gaolan Area of Zhuhai Harbor[J]. Pearl River, 28(2): 15–16, 42 (in Chinese with English abstract).
- 刘俊勇, 徐峰俊, 2006. 广州港出海航道疏浚工程对珠江口水动力及河势稳定影响研究[J]. 人民珠江, 27(4): 11–14. LIU JUNYONG, XU FENGJUN, 2006. Influence study of Guangzhou harbor seagoing waterway dredging work on the hydrodynamic situation and the river stability of the Pearl River Mouth [J]. Pearl River, 27(4): 11–14 (in Chinese with English abstract).
- 庞启秀, 徐金环, 2005. 河口疏浚对环境的影响[J]. 中国港湾建设, (2): 8–10. PANG QIXIU, XU JINHUAN, 2005. Influence of estuarine dredging on environment[J]. China Harbour Engineering, (2): 8–10 (in Chinese with English abstract).
- 郑志华, 徐碧华, 2008. 航道疏浚中悬浮泥沙对海水水质和海洋生物影响的数值研究[J]. 上海船舶运输科学研究所学报, 31(2): 105–110. ZHENG ZHIHUA, XU BIHUA, 2008. Numerical study of suspended particulate matter impact on sea water quality and marine creatures in process of waterway dredging[J]. Journal of SSSRI, 31(2): 105–110 (in Chinese with English abstract).
- AMIN M, 1983. On perturbations of harmonic constants in the Thames Estuary[J]. Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 73(3): 587–603
- BONALDO D, BENETAZZO A, BERGAMASCO A, et al, 2014. Sediment transport modifications induced by submerged artificial reef systems: a case study for the Gulf of Venice[J]. Oceanological and Hydrobiological Studies, 43(1): 7–20.
- CAI HUAYANG, 2014. A new analytical framework for tidal propagation in estuaries[D]. Delft, the Netherlands: Delft University of Technology.
- CAI HUAYANG, TOFFOLON M, SAVENIJE H H G, 2016. An analytical approach to determining resonance in semi- closed convergent tidal channels[J]. Coastal Engineering Journal, 58(3): 1650009.
- CAI HUAYANG, HUANG JINGZHENG, NIU LIXIA, et al, 2018a. Decadal variability of tidal dynamics in the Pearl River Delta: spatial patterns, causes, and implications for estuarine water management[J]. Hydrological Processes, 32(25): 3805–3819.
- CAI HUAYANG, MARCO T, SAVENIJE H H G, et al, 2018b. Frictional interactions between tidal constituents in tide-dominated estuaries[J]. Ocean Science, 14(4): 769–782.
- CHANT R J, SOMMERFIELD C K, TALKE S A, 2018. Impact of channel deepening on tidal and gravitational circulation in a highly engineered estuarine basin[J]. Estuaries and Coasts, 41(6): 1587–1600.
- CHERNETSKY A S, SCHUTTELAARS H M, TALKE S A, 2010. The effect of tidal asymmetry and temporal settling lag on sediment trapping in tidal estuaries[J]. Ocean Dynamics, 60(5): 1219–1241.
- CODIGA D, 2000. "UTide" unified tidal analysis and prediction functions[M]. Environmental Decision Making for New

- Developments: An Alternative Approach.
- DE JONGE V N, SCHUTTELAARS H M, VAN BEUSEKOM J E E, et al, 2014. The influence of channel deepening on estuarine turbidity levels and dynamics, as exemplified by the Ems estuary[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 139: 46–59.
- DOODSON A T, 1924. Perturbations of Harmonic Tidal Constants[J]. *Proceedings of the Royal Society A: Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, 106(739): 513–526.
- DRONKERS J J, 1964. Tidal computations in rivers and coastal waters[M]. Amsterdam: North Holland Publishing Company.
- ENSING E, DE SWART H E, SCHUTTELAARS H M, 2015. Sensitivity of tidal motion in well-mixed estuaries to cross-sectional shape, deepening, and sea level rise: an analytical study[J]. *Ocean Dynamics*, 65(7): 933–950.
- FALCÃO M, SANTOS M N, DRAGO T, et al, 2009. Effect of artificial reefs (southern Portugal) on sediment–water transport of nutrients: importance of the hydrodynamic regime[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 83(4): 451–459.
- FAMILKHALILI R, TALKE S A, 2016. The effect of channel deepening on tides and storm surge: a case study of Wilmington, NC[J]. *Geophysical Research Letters*, 43(17): 9138–9147.
- FANG GUOHONG, 1987. Nonlinear effects of tidal friction[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 6(S1): 109–126.
- GAREL E, PINTO L, SANTOS A, et al, 2009. Tidal and river discharge forcing upon water and sediment circulation at a rock-bound estuary (Guadiana estuary, Portugal)[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 84(2): 269–281.
- GODIN G, 1991. Compact approximations to the bottom friction term, for the study of tides propagating in channels[J]. *Continental Shelf Research*, 11(7): 579–589.
- GODIN G, 1999. The propagation of tides up rivers with special considerations on the upper saint Lawrence River[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 48(3): 307–324.
- HEAPS N S, 1978. Linearized vertically-integrated equations for residual circulation in coastal seas[J]. *Deutsche Hydrografische Zeitschrift*, 31(5): 147–169.
- INOUE R, GARRETT C, 2007. Fourier representation of quadratic friction[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 37(3): 593–610.
- JALÓN-ROJAS I, SCHMID S, SOTTOLICHIO A, et al, 2016. Tracking the turbidity maximum zone in the Loire Estuary (France) based on a long-term, high-resolution and high-frequency monitoring network[J]. *Continental Shelf Research*, 117: 1–11.
- JAY D A, LEFFLER K, DEGENS S, 2011. Long-term evolution of Columbia River tides[J]. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 137(4): 182–191.
- JEFFREYS H S, 1970. The earth: its origin, history and physical constitution[M]. 4th ed. London: Cambridge University Press.
- PINGREE R D, 1983. Spring tides and quadratic friction[J]. *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*, 30(9): 929–944.
- PRANDLE D, 1997. The influence of bed friction and vertical eddy viscosity on tidal propagation[J]. *Continental Shelf Research*, 17(11): 1367–1374.
- RALSTON D K, TALKE S, GEYER W R, et al, 2019. Bigger tides, less flooding: effects of dredging on barotropic dynamics in a Highly Modified Estuary[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 124(1): 196–211.
- TALKE S A, DE SWART H E, DE JONGE V N, 2009. An idealized model and systematic process study of oxygen depletion in Highly Turbid Estuaries[J]. *Estuaries and Coasts*, 32(4): 602–620.
- TOFFOLON M, SAVENIJE H H G, 2011. Revisiting linearized one-dimensional tidal propagation[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 116(C7): C07007.
- VELLINGA N E, HOITINK A J F, VAN DER VEGT M, et al, 2014. Human impacts on tides overwhelm the effect of sea level rise on extreme water levels in the Rhine–Meuse delta[J]. *Coastal Engineering*, 90: 40–50.
- WINTERWERP J C, 2011. Fine sediment transport by tidal asymmetry in the high-concentrated Ems River: indications for a regime shift in response to channel deepening[J]. *Ocean Dynamics*, 61(2–3): 203–215.
- WINTERWERP J C, WANG ZHENGBING, VAN BRAECKEL A, et al, 2013. Man-induced regime shifts in small estuaries—II: a comparison of rivers[J]. *Ocean Dynamics*, 63(11–12): 1293–1306.
- ZHU JUN, WEISBERG R H, ZHENG LIANYUAN, et al, 2015. Influences of channel deepening and widening on the tidal and Nontidal Circulations of Tampa Bay[J]. *Estuarine and Coast*, 38(1): 132–150.