

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.02.001

河口盐水入侵动力机制解析与应用

徐龔文^{1,2},唐苏轩²,张蔚^{1,2}

(1. 河海大学水灾害防御全国重点实验室; 2. 河海大学港口海岸与近海工程学院)

摘要: 基于一维盐度对流扩散模型,推导了规则半日潮河口盐通量输运机制的解析表达式,并分析了径流、盐度、潮汐振幅、潮流振幅、潮流与潮汐相位差、水深和河口宽度等因素对盐度扩散的影响,定量揭示了潮汐河口盐水入侵过程中的物理机制,并利用该解析解对珠江口虎门盐度输运机制各分量的重要性进行了解释。结果表明:欧拉输运机制受控于上游径流,斯托克斯漂流输运机制则受控于潮汐、潮流振幅及两者的相位差,而潮泵效应则是潮汐脉动、潮流脉动与盐度脉动三者相互作用的结果;虎门小潮期半日潮特征明显,平流输运是主要动力机制,欧拉余流输运占主导,潮泵效应不明显,除口门区域外,潮周期内盐通量整体呈现向海输运趋势;虎门局部区域受潮汐捕获机制的控制,在漳澎与麻涌站之间,盐水下泄受阻,进一步加剧了虎门的盐水入侵现象。

关键词: 盐度输运;盐通量输运机制分解;盐水入侵;珠江口;虎门

Analysis of dynamic mechanism of estuarine saltwater intrusion and its applications

Xu Yanwen^{1,2}, Tang Suxuan², Zhang Wei^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University;
2. College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University)

Abstract: Based on a one-dimensional salinity advection-diffusion model, an analytical expression for the salt flux transport mechanism in a regular semi-diurnal tidal estuary was derived. The effects of factors such as runoff, salinity, tidal amplitude, tidal current amplitude, phase difference between tidal current and tide, water depth, and estuary width on salinity diffusion were analyzed, quantitatively revealing the physical mechanism of the saltwater intrusion process in tidal estuaries. Furthermore, this analytical solution was utilized to explain the importance of each component of the salinity transport mechanism in Humen of the Pearl River Estuary. The results show that the Eulerian transport mechanism is controlled by upstream runoff; the Stokes drift transport mechanism is controlled by the tidal amplitude, tidal current amplitude, and their phase difference, and the tidal pumping effect is the result of the interaction among tidal pulsation, tidal current pulsation, and salinity pulsation; during the neap tide period in Humen, the semi-diurnal tidal characteristics are prominent; the advection transport is the main dynamic mechanism; the Eulerian residual flow transport is dominant, and the tidal pumping effect is not obvious; except for the mouth area, the salt flux generally shows a seaward transport trend during the tidal cycle; local areas of Humen are controlled by the tidal trapping mechanism, and between Zhangpeng and Machong stations, the downward discharge of saltwater is obstructed, which further intensifies the saltwater intrusion phenomenon in Humen.

Key words: salinity transport; salt flux transport mechanism decomposition; salt water intrusion; the Pearl River Estuary; Humen

在气候变化和人类活动的影响下,世界范围内河口盐水入侵都有明显加剧趋势,盐水入侵作为新时期河口面临的威胁之一,正在迅速地、大范围地侵蚀着河口三角洲生态系统^[1]。河口盐度输运扩散的动力学机制研究是深入理解河口盐水入侵过程的关键科学问题之一。目前分析盐度输运动力机制的一种较为经典的方法是盐通量输运机制分解方法,其是分析盐水入侵动力机制的一种重要手段^[2],通过对大量实测盐度数据的统计分析,将盐通量输运分解为多个物理过程作用的结果。

河口盐通量输运机制的分解,最早是通过基于实测盐度和流速的横向、垂向变化资料的相关分析和经验方法,来描述河口盐、淡水混合机制的^[3]。随着研究不断深入,盐通量输运机制分解日趋细化,且由横向、垂向切变所产生的盐度输运分量已被成功分离^[4]。然而,水深变化的影响却未被纳入考量,直至 20 世纪 80 年

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC3001000);中央高校基本科研业务费专项资金项目(B240201003);国家自然科学基金项目(42006155)

作者简介: 徐龔文(1988—),女,副教授,博士,主要从事河口海岸水动力环境研究。E-mail:yanwenxu@hhu.edu.cn

通信作者: 张蔚(1979—),男,教授,博士,主要从事河口海岸水动力学研究。E-mail:w.zhang@hhu.edu.cn

代中期,浅水区潮汐随水深变化的效应才成为机制分解中的重要考虑因素^[5]。其中最主要的输运机制包括欧拉余流输运、重力环流输运、斯托克斯漂流输运、潮汐捕获输运、潮泵输运等。河口盐通量通常会依据不同混合机制拆分为若干项进行组合评估,属于经验分析。然而,现有盐通量输运机制分解法对实测资料依赖性较高,同一河口采用不同组合机制的经验公式开展分析时,所得结果往往存在差异,由此带来较强的不稳定性与较大的不确定性^[6]。同时,由于河口是一个地形特征、动力条件极其复杂的系统,即使在同一河口内不同河段也会出现主导机制的突变。以梅里马克河口为例,其口门束窄,潮泵作用是盐通量输运的主要机制,而其河口内部盐通量输运则受潮汐不对称性的影响^[7]。同理,在同一河口不同时段内的盐通量输运机制也会发生改变。以珠江三角洲磨刀门为例,其在大潮期流速切变引发的盐度输运作用强,而在小潮期潮汐振荡输运机制则更为强势^[8]。强潮型河口受潮汐动力主控,潮汐振荡输运通常为其主导机制;以哥伦比亚河口为例,超过半数的陆向盐通量由潮汐振荡输运贡献^[9]。相比之下,哈德逊河口的盐度输运则以垂向剪切作用为主导,其对盐通量的贡献远大于潮汐振荡输运^[10]。

盐通量输运机制分解方法的应用研究虽多^[4,10-11],但仍存在一定的局限性:①现有的机制分解方法对水文数据依赖性高;②作为半经验公式无法获知在动力机制中起实际作用的物理因子,缺乏较可靠的解析理论支撑^[6]。针对上述不足,本文基于河口盐水入侵非稳态解析解,推导盐通量输运机制的解析表达式,从基本物理过程与数学方程出发,更深入揭示盐度扩散动力机理中的关键物理因子及其相互作用关系;并以珠江口虎门为例,结合实测盐度与水文资料,分析虎门盐度输运机制各分解项的贡献大小与主次关系,识别盐水入侵的主导动力机制,以为典型强潮河口盐水入侵机理认知与调控提供理论依据。

1 盐通量机制解析模型

1.1 盐水入侵非稳态解析解

盐度对流扩散理论解析模型是一种深入剖析盐水入侵物理过程的有效手段,且在研究珠江口盐度空间分布特征方面有较为出色的表现^[12-13]。然而,现有理论解析研究多基于忽略时间效应的对流扩散方程。该方法虽能刻画涨急、涨憩等特定时刻的盐度扩散物理特征,但在阐释潮波全周期运动过程中的盐水入侵机制时仍存在明显局限。为此,首先恢复方程中的时间项,构建兼顾时空属性的非稳态解析模型^[14],以更真实地反映河口盐水入侵的时空演变过程。

在对一维盐度对流扩散方程进行建模时,本文充分考虑了河口盐水入侵过程的真实动力条件。盐水混合与径流、潮汐动力密切相关,尤其在枯季及强潮环境下,河口常呈现充分混合状态,盐度纵向扩散特征更为突出。对于强潮河口而言,纵向一维模型能够更为准确地刻画盐度扩散的物理过程。因此,本文选取河口纵向维度开展分析,旨在揭示强潮河口典型的盐水入侵动力机制。一维盐度对流扩散方程可表示为:

$$\frac{\partial(As)}{\partial t} + \frac{\partial(Aus)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(AD \frac{\partial s}{\partial x} \right) \quad (1)$$

式中: A 为河口断面面积; s 为河口断面平均盐度; t 为时间; u 为河口断面平均流速; x 为从口门起始的沿程距离,原点位于河口口门位置,向上游方向为正; D 为盐度纵向扩散系数,可假设为与时间无关的常数项^[15]。

河口形态对盐水入侵过程具有显著影响,径流与潮汐两大主要动力对河口地形变化均存在敏感的动力响应。为此,一类描述冲积河口自然地形演变的指数收敛型解析模型得到学界广泛认可与应用^[5]。本文假定河口断面面积沿程呈指数收敛衰减,其表达式为:

$$A = A_0 \exp(-x/a) \quad (2)$$

其中

$$A_0 = B_0 [\bar{h}_0 + \eta \sin(\omega t + \varphi + \varepsilon)] = \bar{A}_0 + \eta B_0 \sin(\omega t + \varphi + \varepsilon)$$

式中: A_0 为口门处的横断面面积($x=0$); a 为断面面积的收敛长度,可以通过断面面积数据反演拟合确定; B_0 为口门断面平均宽度; $\bar{h}_0$ 为口门潮周期平均水深; η 为潮汐振幅; ω 为角频率; φ 为迟角; ε 为潮位和潮流速过程的相位差; $\bar{A}_0$ 为口门处潮周期平均断面面积。一般情况下河口口门的水深较大,当潮汐振幅相对水深较小时($\eta/\bar{h}_0 < 0.1$),取河口的潮周期横断面平均面积 $\bar{A}$ 近似作为 A 。对 s 进行一阶傅里叶级数展开:

$$s = \bar{s} + s_1 \cos(\omega t + \varphi) + s_2 \sin(\omega t + \varphi) \quad (3)$$

式中: $\bar{s}$ 为潮汐周期平均盐度; s_1 、 s_2 分别为盐度在潮频率下余弦项和正弦项的幅值系数。假定潮波是一个随

时间变化的余弦波 $u_1 = v \cos(\omega t + \varphi)$, 其中 v 为潮流流速振幅, 为正值, 上游径流流速 u_f (为负值, 反映径流流量和断面面积的关系) 被假定表示为 $u_f = Q_f / A \approx Q_f / \bar{A} = \bar{u}_f$, 其中 Q_f 为上游径流量, $\bar{u}_f$ 为上游径流对应的潮周期平均断面流速, 则

$$u = u_f + v \cos(\omega t + \varphi) \quad (4)$$

将式(3)(4)代入式(1), 并根据等式两边对应项相等化为一个方程组:

$$\begin{cases} -\omega s_1 + \bar{u}_f \frac{\partial s_2}{\partial x} = D \frac{\partial^2 s_2}{\partial x^2} - \frac{D}{a} \frac{\partial s_2}{\partial x} \\ \omega s_2 + \bar{u}_f \frac{\partial s_1}{\partial x} + v \frac{\partial \bar{s}}{\partial x} = D \frac{\partial^2 s_1}{\partial x^2} - \frac{D}{a} \frac{\partial s_1}{\partial x} \\ \bar{u}_f \frac{\partial \bar{s}}{\partial x} + \frac{v}{2} \frac{\partial s_1}{\partial x} = D \frac{\partial^2 \bar{s}}{\partial x^2} - \frac{D}{a} \frac{\partial \bar{s}}{\partial x} \end{cases} \quad (5)$$

根据盐度对流扩散方程稳态解的形式, 假设 $\bar{s}$ 、 s_1 、 s_2 分别为:

$$\bar{s} = \bar{s}_0 \exp\{[m[\exp(x/a) - 1]]\} \quad s_i = c_i \exp\{m[\exp(x/a) - 1]\} \quad (i = 1, 2) \quad (6)$$

式中: $\bar{s}_0$ 为口门潮周期平均盐度; c_1 、 c_2 、 m 为待求解的参数。假设 c_1 和 c_2 关于 x 的变化很小可忽略, 将式(6)代入式(5), 求解可得:

$$\begin{cases} c_1 = \frac{\left[\bar{u}_f - \frac{Dm}{a} \exp\left(\frac{x}{a}\right) \right] \frac{m}{a} \exp\left(\frac{x}{a}\right)}{\omega} c_2 \\ c_2 = \frac{-v \frac{m}{a} \exp\left(\frac{x}{a}\right) \omega}{\omega^2 + \left[\bar{u}_f - \frac{Dm}{a} \exp\left(\frac{x}{a}\right) \right]^2 \frac{m^2}{a^2} \exp\left(\frac{2x}{a}\right)} \bar{s}_0 \\ m = \frac{\bar{u}_f a \exp\left(-\frac{x}{a}\right)}{D} = \frac{Q_f a}{DA_0} \end{cases} \quad (7)$$

将式(6)(7)代入式(3)可得盐水入侵非稳态解析解的表达式为:

$$s = \bar{s}_0 \exp\left\{ \frac{Q_f a}{DA_0} \left[\exp\left(\frac{x}{a}\right) - 1 \right] \right\} \left[1 - \frac{v \bar{u}_f}{D \omega} \sin(\omega t + \varphi) \right] \quad (8)$$

1.2 盐通量机制分解解析方法

基于盐水入侵非稳态解析模型, 推导了非稳态盐度在规则半日潮河口的函数表达式(式(8))。假设垂向完全掺混, 不考虑垂向偏差, 针对周期变化特性, 可将盐度分解为两部分:

$$s = \bar{s}_0 \exp\left\{ \frac{Q_f a}{DA_0} \left[\exp\left(\frac{x}{a}\right) - 1 \right] \right\} + \bar{s}_0 \exp\left\{ \frac{Q_f a}{DA_0} \left[\exp\left(\frac{x}{a}\right) - 1 \right] \right\} \left(-\frac{v \bar{u}_f}{D \omega} \right) \sin(\omega t + \varphi) = \bar{s} + S_1 \quad (9)$$

其中 $S_1 = \bar{s}(-v \bar{u}_f / D \omega) \sin(\omega t + \varphi)$

式中: S_1 为随潮周期变化盐度。假设水深为 $h = \bar{h} + \eta \sin(\omega t + \varphi + \varepsilon)$, 则河口断面面积表示为:

$$A = Bh = \bar{A} \left[1 + \frac{\eta}{\bar{h}} \sin(\omega t + \varphi + \varepsilon) \right] \quad (10)$$

式中: B 为河口断面平均宽度; $\bar{h}$ 为潮周期平均水深。河口断面面积受潮动力的影响, 随潮汐振幅变化呈现周期变化特征, 表示为:

$$A = \bar{A} + A_1 = \bar{A} + B \eta \sin(\omega t + \varphi + \varepsilon) \quad (11)$$

式(11)中 A_1 指随潮周期变化断面面积, 表示河口断面面积受到潮汐影响作周期规律变化。按定义径流流速是指上游径流量与河口断面面积之比, 径流流速即可近似表示为:

$$u_f = \frac{Q_f}{A} = \frac{Q_f \left[1 - \frac{\eta}{\bar{h}} \sin(\omega t + \varphi + \varepsilon) \right]}{B \bar{h} \left[1 - \left(\frac{\eta}{\bar{h}} \right)^2 \sin^2(\omega t + \varphi + \varepsilon) \right]} = \kappa \bar{u}_f - \kappa \bar{u}_f \frac{\eta}{\bar{h}} \sin(\omega t + \varphi + \varepsilon) \quad (12)$$

其中

$$\kappa = \left[1 - \left(\frac{\eta}{h} \right)^2 \sin^2(\omega t + \varphi + \varepsilon) \right]^{-1}$$

当式(12)分母项中的 $(\eta/\bar{h})^2 \sin^2(\omega t + \varphi + \varepsilon)$ 量级小于 0.01, κ 偏离 1 的幅度很小, 可近假取为 1。此时, u_f 可近似分为两部分, 第一部分 $\kappa \bar{u}_f$ 在该近似下可视为非潮汐变化的余流, 称作欧拉余流, 第二部分 $-\kappa \bar{u}_f \eta \sin(\omega t + \varphi + \varepsilon)/\bar{h}$ 表征随潮变化的漂流。将式(12)代入式(4)得:

$$u = \kappa \bar{u}_f + v \cos(\omega t + \varphi) - \kappa \bar{u}_f \frac{\eta}{h} \sin(\omega t + \varphi + \varepsilon) = \bar{u} + U_1 \quad (13)$$

式中: $\bar{u}$ 为潮周期平均流速; U_1 为潮汐振荡流速分量。盐通量是指时间段内通过某断面的盐输运量, 则潮周期内平均盐通量可以表示为:

$$F = \frac{1}{T} \int_0^T \int_A u s dA dt \quad (14)$$

式中: T 为潮周期; F 为潮周期盐通量。盐通量的输运机制可以分解为不同的动力过程对盐度的贡献, 将式(9)(11)(13)代入式(14), 可得:

$$F = \kappa \bar{s} \bar{u}_f \bar{A} + \bar{s} \frac{1}{T} \int_0^T A_1 U_1 dt + \kappa \bar{u}_f \frac{1}{T} \int_0^T A_1 S_1 dt + \bar{A} \frac{1}{T} \int_0^T U_1 S_1 dt + \frac{1}{T} \int_0^T A_1 U_1 S_1 dt = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_5 \quad (15)$$

式(15)中 F_1 受作用于欧拉余流, F_2 代表斯托克斯漂流引起的盐度输运, F_1 和 F_2 共同作用代表平流输运^[4], 称作拉格朗日输运。 F_3 、 F_4 和 F_5 表征潮汐的潮泵机制作用。对于规则半日潮河口, 考虑半日潮 M2 作用, 则盐通量输运机制各贡献分量的解析表达式分别为:

$$F_1 = \kappa \bar{s}_0 \exp \left\{ \frac{Q_f a}{DA_0} \left[\exp \left(\frac{x}{a} \right) - 1 \right] \right\} \bar{u}_f \bar{A} \quad (16)$$

$$F_2 = \frac{B \eta}{2} \bar{s}_0 \exp \left\{ \frac{Q_f a}{DA_0} \left[\exp \left(\frac{x}{a} \right) - 1 \right] \right\} \left(v \sin \varepsilon - \kappa \bar{u}_f \frac{\eta}{h} \right) \quad (17)$$

$$F_3 = \frac{1}{2} \kappa B \eta \bar{s}_0 \exp \left\{ \frac{Q_f a}{DA_0} \left[\exp \left(\frac{x}{a} \right) - 1 \right] \right\} \left(-\frac{v \bar{u}_f^2}{D \omega} \right) \cos \varepsilon \quad (18)$$

$$F_4 = -\frac{\eta \kappa Q_f}{2h} \bar{s}_0 \exp \left\{ \frac{Q_f a}{DA_0} \left[\exp \left(\frac{x}{a} \right) - 1 \right] \right\} \left(-\frac{v \bar{u}_f}{D \omega} \right) \cos \varepsilon \quad (19)$$

$$F_5 = \frac{\bar{s} B \eta}{T} \left(-\frac{v u_f}{D \omega} \right) \int_0^T [\cos \varepsilon - \cos(2\omega t + 2\varphi + \varepsilon)] \left[v \cos(\omega t + \varphi) - \kappa \bar{u}_f \frac{\eta}{h} \sin(\omega t + \varphi + \varepsilon) \right] dt = 0 \quad (20)$$

由式(16)~(20)可知, F_1 是由潮周期平均盐度和潮周期平均流速控制, 上游径流直接控制欧拉输运机制作用的大小; 影响 F_2 的因素众多, 包括 $\bar{s}$ 、 B 、 η 、 v 、 ε , 虽然式(17)中有参数 $\bar{u}_f$, 但是如式(12)所示 $\bar{u}_f \eta/\bar{h}$ 代表的是由于潮汐振幅引起的断面面积变化对径流流速形成的影响, 故其本质依旧可视作潮汐作用, 所以斯托克斯漂流输运机制受控于潮汐、潮流振幅和两者的相位差。 F_3 为潮汐脉动和盐度脉动的相互作用响应, F_4 为潮流脉动和盐度脉动的相互作用响应, 但是两者结果相同, 方向相反, 所以输运作用相互抵消。 F_5 为潮汐脉动、潮流脉动和盐度脉动三者间的相互作用响应, 是真正影响盐度输运的潮泵作用因子, F_5 在此解析理论中(潮流和盐度相位差为 90°)为 0, 这与前人通过大量实测资料分析的结论一致^[15]。值得注意的是, 在一些经典理论中^[5], F_4 和 F_5 会被合在一起视作一项机制讨论动力作用:

$$F_4 + F_5 = \bar{A} \frac{1}{T} \int_0^T U_1 S_1 dt + \frac{1}{T} \int_0^T A_1 U_1 S_1 dt = \frac{1}{T} \int_0^T B h U_1 S_1 dt \quad (21)$$

一方面因为从实测数据统计分析的角度, 直接考虑实测水位变化便于计算, 另一方面, F_3 是潮汐脉动和盐度脉动作用变化项, 其数值一般较小^[14], 三者常放于一起计算讨论, 表征潮汐潮泵效应。

2 实例应用

2.1 研究区概况

通过分析本文模型在珠江三角洲虎门河口的应用情况, 论证非稳态解析模型及其机制分析方法在规则

半日潮河口的实用性。珠江口位于中国南海的北部边界处,上游西江、北江和东江三大支流在河网中汇流后,径流呈 8 条放射状排列的分流水道从 8 个口门流入南海。虎门紧邻伶仃洋,每年来自虎门的约 600 亿 m³ 的径流量汇入伶仃洋,其上游主要淡水来源为东江、北江和流溪河,如图 1 所示。八口门虎门潮差最大,最大潮差为 3.66 m,平均潮差 1.70 m,且涨落潮量在八口门中居首^[16-17]。虎门是一个不规则半日潮河口,每天有两个不等的高潮和低潮出现,小潮期半日分潮作用占优,主要表现为规则半日潮河口潮汐规律特征;而在大潮期,潮动力受全日分潮的影响增强,表现出较显著的时空不对称性^[14]。

2.2 研究数据

本文采用的实测数据来自 2005 年西江、北江及珠江三角洲网河区枯水期同步水文测验。测验自 2005 年 1 月 18 日开始,2 月 5 日结束,共进行了 32 个完整的周潮同步水文测验,并对咸潮进行了监测。2005 年,珠江三角洲遭遇了当时自 1985 年以来最严重的咸潮灾害,相关部门通过统筹上游水库调度,加大下泄淡水量,以抑制下游咸潮上溯。上游红水河天生桥等水库来水于 2005 年 1 月 29 日到达三水站,所以 1 月 29 日以后,各测验河道的日均流量都有增加,主要河道增幅明显,马口站水流量增幅 70%,三水站水流量增幅 161%。在正常来流年份,枯季虎门盐淡水混合充分,河口处于完全混合状态^[18]。值得注意的是,2005 年枯水季节,珠江三角洲正遭遇连续 3 年的特大干旱^[19-22],流域径流量较正常年份减少了 30%~50%,因而虎门在本文研究期间未出现显著的盐淡水分层现象。

选取 1 月 26 日的数据作为大潮期代表,1 月 31 日的数据作为小潮期的代表,对虎门盐水入侵在大、小潮期的周期变化特性进行了对比分析。由图 2 可知,非稳态模型(式(8))能够在一定程度上反映盐度的周期变化。然而,大潮期盐度周期变化存在显著的不对称性特征,简单的单频非稳态模型难以完全重现盐度变化过程。进一步分析发现,小潮期虎门主要受半日潮作用,其潮动力特征与规则半日潮河口较为一致;而在大潮期,虎门盐度变化呈现显著的不对称特性,表现为典型的不规则半日潮河口特征,受全日潮与半日潮混合潮动力的共同作用。可见,本文提出的非稳态解析模型在规则半日潮河口表现优异,可准确刻画盐度在半日潮动力作用下的变化过程。因此,选用枯季小潮期(2005 年 1 月 31 日)的实测数据进行分析,研究采用的测量站点包括 6 个:大虎、泗盛濠、漳澎、麻涌、大盛和黄埔右(图 1)。

2.3 结果与分析

2.3.1 虎门盐水入侵非稳态解析模型率定

依据冲积河口自然地形演变的指数收敛型解析模型,潮周期平均的河口断面面积 $\bar{A}$ 、河口宽度 $\bar{B}$ 以及水深 $\bar{h}$ 沿程变化函数表达式为:

$$\begin{cases} \bar{A} = \bar{A}_0 \exp(-x/a) \\ \bar{B} = \bar{B}_0 \exp(-x/b) \\ \bar{h} = \bar{h}_0 \exp(-x/d) \end{cases} \quad (22)$$

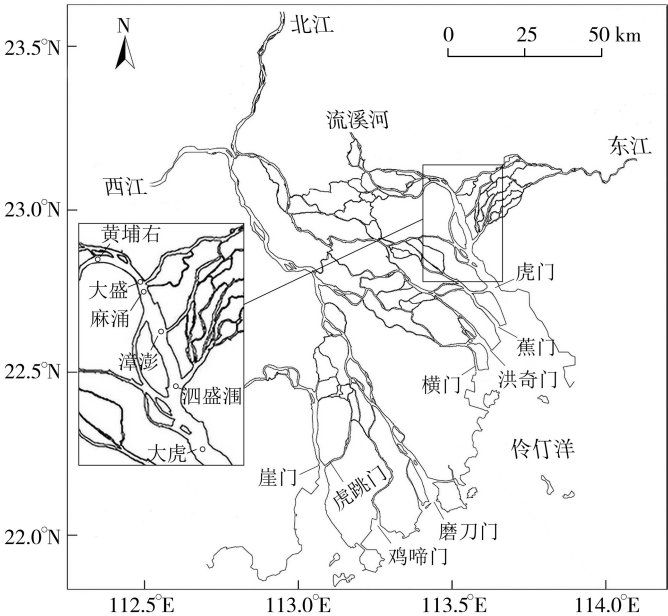


图 1 研究区域及相关站点

Fig. 1 Study area and related stations

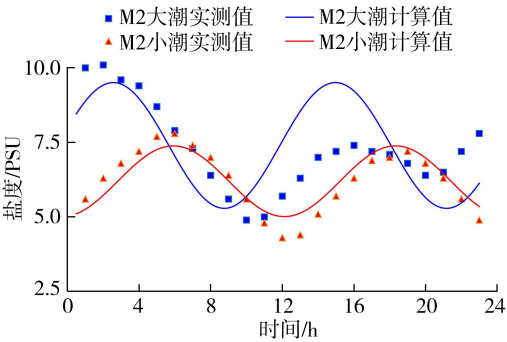


图 2 虎门黄埔右站盐度潮周期变化

Fig. 2 Tidal cycle variation of salinity at Huangpuyou Station in Humen

式中: $\bar{B}_0$ 为口门潮周期平均宽度; b 、 d 分别为河口断面宽度、水深的收敛长度。

本文不考虑潮对水道宽度的影响,故 $\bar{B}$ 直接用 B 表示。虎门形状参数采用实测水文数据拟合率定^[13]:虎门的 $\bar{A}_0$ 为37822 m²,河口的 a 为16.7 km;口门宽度 B_0 为3288 m, b 为25.7 km; $\bar{h}_0$ 为11.5 m, d 为50 km。

口门的潮振幅通过1月31日的水位过程率定^[13]:振幅 η 取0.7 m,初始相位 $\varphi+\varepsilon$ 为0,水深随时间变化为 $h=\bar{h}+0.7\sin(\omega t)$,小潮期作半日潮特征,且 $v=E\pi/T$, E 为潮程,则河口盐度的时空变化过程为:

$$s=\bar{s}_0\exp\left\{\frac{Q_1a}{DA_0}\left[\exp\left(\frac{x}{a}\right)-1\right]\right\}\left\{1+\frac{E}{2a}\left[-\frac{Q_1a}{DA_0}\exp\left(\frac{x}{a}\right)\right]\sin(\omega t+\varphi)\right\}$$

(23)

式(23)中,潮程、扩散系数、初始相位等相关参数可用实测数据率定^[15],盐度率定结果如图4所示。通过盐度实测资料率定,确定小潮期虎门潮流速为0.6 m/s,流速的初始相位 φ 为-0.7 rad,则潮流与潮汐相位差 ε 为0.7 rad。

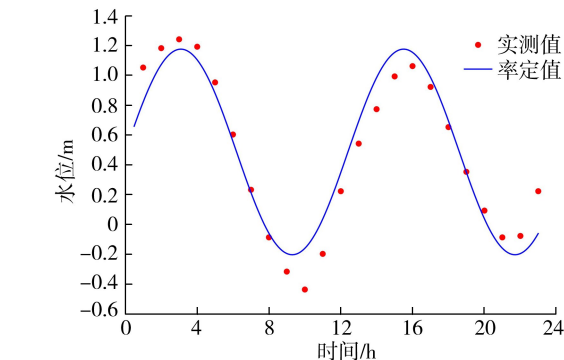


图3 小潮期大虎站水位过程率定

Fig.3 Calibration of water level process at Dahu Station during neap tide

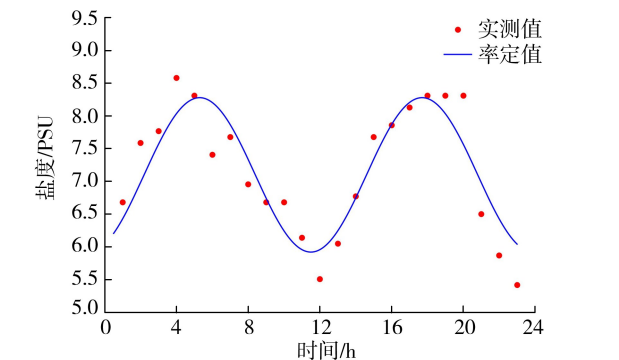


图4 小潮期大盛站点盐度过程率定

Fig.4 Calibration of salinity process at Dasheng Station during neap tide

2.3.2 虎门盐水入侵机制沿程变化特征

由式(15)可知,盐通量机制可分解为两个部分:径流作用引起的平流扩散 F_L ,包括欧拉余流 F_1 和斯托克斯漂流 F_2 两部分;潮泵作用 F_p ,包括 F_3 、 F_4 和 F_5 。选定2005年1月31日的数据为小潮代表数据,沿程选定站点大虎、泗盛濶、漳澎、麻涌、大盛、黄埔右,分别用式(16)~(20)计算在一个半日潮周期内盐通量机制的变化,结果见表1。

2005年1月29日,西江调水压咸,表1中欧拉余流项反映了一定程度的压咸效果。口门大虎站潮汐运动引起的斯托克斯漂流作用较欧拉余流作用更大,总体盐通量向陆,这主要是由于口门径流流速较小。1月31日小潮期,虎门平流输运是主导动力输运机制,潮汐潮泵作用几乎为0。小潮期,虎门的潮泵效应相对于平流输运作用对盐通量的影响很小,其中,盐度脉动和潮流脉动引起的输运与潮汐脉动引起的输运大小相近,方向相反。

表1 小潮期虎门盐通量输运机制分解

Table 1 Decomposition of salt flux transport mechanism in Humen during neap tide

单位:PSU·m³/s
unit: PSU·m³/s

站点	F_1	F_2	F_L	F_3	F_4	F_5	F_p	盐通量
大虎	-5553.45	6704.82	1151.37	-13.31	13.31	0	0	1151.37
泗盛濶	-4970.78	3996.15	-974.63	-13.78	13.79	0	0.01	-974.62
漳澎	-4216.94	4164.55	-52.39	-23.21	23.25	0	0.04	-52.35
麻涌	-3402.21	2072.90	-1329.31	-11.95	11.95	0	0	-1329.31
大盛	-2619.90	1080.24	-1539.66	-7.71	7.73	0	0.02	-1539.64
黄埔右	-961.00	417.52	-543.48	-5.43	5.43	0	0	-543.47

欧拉余流输运的盐通量从口门沿程逐渐变小,主要是由潮动力的衰减致使上游盐度减小所起。由图5可知,欧拉余流引起的盐通量输运衰减率在口门处较小,随后从口门的10%增加到大盛站的23%,此变化规律跟前文所述的盐水入侵过程中盐度衰减规律一致,可证明欧拉余流效应衰减是受盐度沿程变化过程特征的影响。特别是在黄埔右站,欧拉余流输运的盐通量出现了急速的衰减,盐通量减少超过60%,这正是由虎

门多源径流的动力特征引起,东江径流作用减弱致使余流的减小直接导致黄埔右盐度输运量的锐减。

斯托克斯漂流输运的盐通量沿程变化趋势基本也是保持单调的衰减过程,其在漳澎处存有奇异点(图 5),由式(17)可知,此处的突变很可能是漳澎河道断面宽度的不规则变化(水面突然增宽)引起。斯托克斯漂流作用输运的盐通量沿程衰减较快,主要跟虎门水道断面基本成指数衰减的规律相关。由图 5 可知,下游平流输运盐通量沿程变化规律与斯托克斯漂流输运盐通量变化规律较为一致,说明小潮期虎门下游盐通量沿程输运变化与河口地貌特征相关性更大。

值得注意的是,虽然上游的大盛站和黄埔右站的盐通量输运方向均为向海,但存在上游(麻涌)盐通量输运高于下游(漳澎)的现象。这表明,上游的盐度在潮周期内未能随落潮及时下泄,而是被“困在”漳澎与麻涌之间。麻涌站位于东江与狮子洋的汇流区域,受多源汇流动力的复杂作用。然而,其盐度输运特征与距其上游 2.6 km 的大盛站并不一致。为进一步分析麻涌站盐通量向下游输运减小的原因,比较了麻涌站和大盛站的日均净流量(图 6,图中负值表示向海方向的流量)。由图 6 可知,麻涌站的日均净流量均为正值,表明咸潮上溯至此未能散去。这可能是由于咸水在该区域受到地形“束缚”,无法随潮汐及时排出,导致整个潮周期内均被盐水控制。这种现象很可能由潮汐捕捉机制引起,同时也是虎门上游盐水难以退去的原因之一。相比之下,大盛站位于东江主要的淡水下泄通道口,其潮周期内的动力主要受径流控制,表现出与麻涌站截然不同的特征。为更清晰地分析动力因子对盐度输运的直接作用,尽量忽略断面收敛的地貌效应对盐通量输运的影响,计算了小潮期虎门单宽盐通量沿程的输运机制变化过程,结果见表 2。

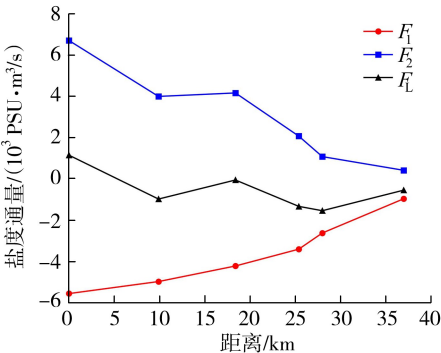


图 5 小潮期盐通量沿程变化规律

Fig. 5 Along-channel variation law of salt flux during neap tide

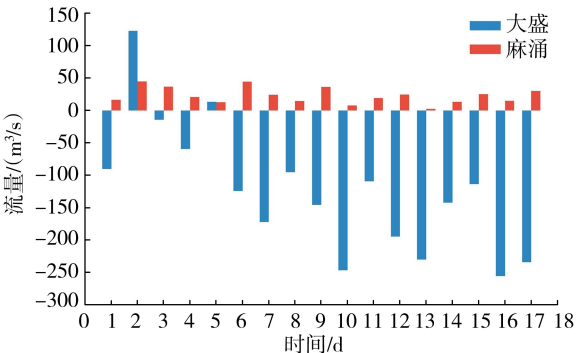


图 6 麻涌和大盛站日净流量变化(1月19日至2月4日)

Fig. 6 Daily net discharge variation at Machong and Dasheng stations (data from January 19 to February 4)

表 2 小潮期虎门单宽盐通量输运机制分解 单位:PSU·m/s

Table 2 Decomposition of unit-width salt flux transport mechanism in Humen during neap tide unit: PSU·m/s

站点	F_1	F_2	F_L	F_3	F_4	F_5	F_P	盐通量
大虎	-1.69	2.04	0.35	0	0	0	0	0.35
泗盛濶	-2.27	1.83	-0.44	-0.01	0.01	0	0	-0.44
漳澎	-1.58	1.56	-0.02	-0.01	0.01	0	0	-0.02
麻涌	-2.06	1.26	-0.80	-0.01	0.01	0	0	-0.80
大盛	-2.35	0.97	-1.38	-0.01	0.01	0	0	-1.38
黄埔右	-1.98	0.86	-1.12	-0.01	0.01	0	0	-1.12

从小潮期虎门盐度单宽通量机制分解的变化规律看,口门处依旧是斯托克斯漂流作用占优,单宽盐通量向岸输运。去除水道断面变化影响后,斯托克斯漂流作用的单宽盐通量沿程变化呈现单调递减(图 7)。欧拉余流作用引起的单宽盐通量由径流流速和水深决定。口门单宽盐通量较小,主要是由于余流流速较小。沿程余流流速变化不大,而水深变化却因为挖沙等原因变得极不规律,在泗盛濶为 9.9 m,沿程向上漳澎为 5 m,麻涌为 7.85 m,大盛为 9.3 m,故欧拉余流效应输运的单宽盐通量同水深关系尚未判明。单宽盐通量也存在上游高于下游的情况,主要是水深效应引起。黄埔右站与其他站规律不同的原因在于多源动力造成的余流差异。

3 结 语

本文基于非稳态盐度扩散解析解,推求确定了盐通量输运机制的解析表达式。盐通量输运机制分为 5 项,分别为欧拉余流作用项、斯托克斯漂流作用项、盐度潮汐脉动作用项、盐度潮流脉动作用项、盐度潮流潮汐脉动作用项,前两者共同构成拉格朗日平流输运,后三者共同构成潮汐潮泵作用输运。分析输运机制的各解析式,发现盐度潮汐脉动作用项、盐度潮流脉动作用项两者的解析表达一致,且值的符号相反,说明这两种机制作用在盐度输运过程中相互抵消,盐度潮流潮汐脉动作用项即为盐度在输运过程中受到的潮汐潮泵作用的反映。研究发现在规则半日潮(全日潮)河口,盐度潮流潮汐脉动作用项对盐度的输运机制为 0,即无潮泵作用。虎门小潮期半日潮特征显著,取用其枯季小潮期实测水文、盐度数据计算分析发现,在虎门小潮平流输运为盐水入侵的主要动力机制,欧拉余流输运占优,无潮泵作用影响,除口门外潮周期盐通量整体向海输运。此外,研究发现虎门存在上游盐通量输运大于下游的现象,称作潮汐捕获,该动力机制会阻扰盐水的正常下泄,进一步加剧河口盐水入侵现象。

参考文献:

[1] 张钊汇,危小艳,张蔚. 三维理想河口盐水入侵对径潮驱动变化的响应[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(3): 96-102. (Zhang Zhaohui, Wei Xiaoyan, Zhang wei. Response of three-dimensional ideal estuarine salt intrusion to changes in river and tidal forcing[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024,52(3):96-102. (in Chinese))

[2] 王彪,朱建荣,吕爱琴. 珠江河口磨刀门枯水期盐度统计模型[J]. 水资源保护,2023,39(1):42-48. (Wang Biao, Zhu Jianrong, Lyu Aiqin. Salinity statistical model for Modaomen of Pearl River Estuary during dry season[J]. Water Resources Protection, 2023,39(1):42-48. (in Chinese))

[3] Dyer K R. The salt balance in stratified estuaries[J]. Estuarine and Coastal Marine Science, 1974,2(3):273-281.

[4] Hansen D V. Currents and mixing in the Columbia River estuary[J]. Ocean Science and Ocean Engineering, 1965,2:943-955.

[5] Fischer H. Mass transport mechanisms in partially stratified estuaries[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1972,53(4):671-687.

[6] Kjerfve B. Circulation and salt flux in a well-mixed estuary[C]//van de kreeke J. Physics of Shallow Estuaries and Bays. Berlin: Springer-Verlag, 1986:22-29.

[7] Savenije H H G. Salinity and tides in alluvial estuaries[M]. Amsterdam:Elsevier, 2005:197.

[8] Ralston D K, Geyer W R, Lerczak J A. Structure, variability, and salt flux in a strongly forced salt wedge estuary[J]. Journal of Geophysical Research, 2010,115:C06005.

[9] Gong W P, Shen J. The response of salt intrusion to changes in river discharge and tidal mixing during the dry season in the Modaomen Estuary, China[J]. Continental Shelf Research, 2011,31:769-788.

[10] Hughes R P, Rattray M. Salt flux and mixing in the Columbia River Estuary[J]. Estuarine and Coastal Marine Science, 1980,10: 479-494.

[11] Lerczak J A, Geyer W R, Chant R J. Mechanisms driving the time-dependent salt flux in a partially stratified estuary[J]. Journal of Physical Oceanography, 2006,36(12):2296-2311.

[12] Smith R. Buoyancy effects upon longitudinal dispersion in wide well-mixed estuaries[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London A:Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1980,296(1421):467-496.

[13] Xu Y W, Zhang W, Zhu Y L, et al. Analytical solution for salt intrusion in multiple-freshwater-source estuaries: application to Humen Estuary[J]. Environmental Earth Sciences, 2017,76(19):661.

[14] Xu Y W, Zhang W, Chen X, et al. Comparison of analytical solutions for salt intrusion applied to the Modaomen Estuary[J]. Journal of Coastal Research, 2015,31(3):735-741.

[15] Xu Y W, Hoitink A J F, Zheng J H, et al. Analytical model captures intratidal variation in salinity in a convergent, well-mixed estuary[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2019,23(10):4309-4322.

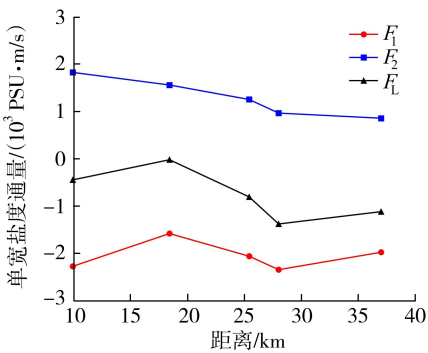


图 7 小潮期单宽盐通量沿程变化规律
Fig. 7 Along-channel variation law of unit-width salt flux during neap tide

[37] 张成才,彭凯,杨峰,等. 基于 SGD 和分类区域阈值结合的水库流域覆被变化遥感检测方法[J]. 水利水电技术(中英文), 2021,52(11):164-172. (Zhang Chengcai, Peng Kai, Yang Feng, et al. Remote sensing detection method for reservoir watershed cover change based on SGD and classification area threshold [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2021,52(11): 164-172. (in Chinese))

[38] Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1979, 9(1): 62-66.

[39] Martinis S, Tweie A, Voigt S. Unsupervised extraction of flood-induced backscatter changes in SAR data using Markov image modeling on irregular graphs[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010,49(1): 251-263.

[40] 周聂,陈华,胡朝阳,等. 遥感影像空间分辨率对河道水体识别影响[J]. 中国农村水利电, 2023(8):82-94. (Zhou Nie, Chen Hua, Hu Chaoyang, et al. The Influence of Spatial Resolution of Remote Sensing Image on River Water Identification[J]. China Rural Water and Hydropower, 2023(8):82-94. (in Chinese))

[41] Smith L C, Lsacks B L, Bloom A L, et al. Estimation of discharge from three braided rivers using synthetic aperture radar satellite imagery: potential application to ungaged basins[J]. Water Resources Research, 1996,32(7): 2021-2034.

[42] 姜磊鹏,丁建丽,包青岭,等. 低空遥感结合卫星影像的河道流量反演[J]. 干旱区地理, 2023,46(3): 385-396. (Jiang Leipeng, Ding Jianli, Bao Qingling, et al. Runoff estimation with low altitude remote sensing and satellite images[J]. Arid Land Geography, 2023,46(3):385-396. (in Chinese))

[43] Kurahashi T, Ikarashi K, Kenchi T, et al. Data Assimilation of water elevation in shallow water flow based on the extended kalman filter FEM using measurement data from image analysis[J]. International Journal of Computational Fluid Dynamics, 2022,36(2): 103-111.

[44] 徐恩松,陆文华,刘云飞,等. 基于卡尔曼滤波的数据融合算法与应用研究[J]. 计算机技术与发展, 2020,30(5):143-147. (Xu Ensong, Lu Wenhua, Liu Yunfei, et al. Research on data fusion algorithm and application based on Kalman filter[J]. Computer Technology and Development, 2020,30(5):143-147. (in Chinese))

[45] Gleason C J, Smith L C, Lee J. Retrieval of river discharge solely from satellite imagery and at-many-stations hydraulic geometry: Sensitivity to river form and optimization parameters[J]. Water Resources Research, 2014,50(12): 9604-9619.

[46] 李龙杰,杨永辉. 基于 Landsat 8 OLI 影像的常用水体指数法分类精度对比[J]. 中国科学院大学学报(中英文), 2024,41(6):755-765. (Li Longjie, Yang Yonghui. Comparison study on classification accuracy of 11 common water indices based on Landsat 8 OLI images[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2024,41(6):755-765. (in Chinese))

(收稿日期:2024 - 10 - 28 编辑:刘晓艳)

(上接第 8 页)

[16] 朱雅敏,陈子燊. 珠江口内伶仃洋河口湾盐度运输机理[J]. 海洋通报, 2008,27(1):29-34. (Zhu Yamin, Chen Zishen. Salinity transport of mechanism in Internal Lingdingyang Firth of the Pearl River Mouth[J]. Marine Science Bulletin, 2008,27(1):29-34. (in Chinese))

[17] 赵焕庭. 珠江三角洲的水文特征[J]. 热带海洋, 1983,2(2):108-117. (Zhao Huaning. Hydrological characteristics of the Zhujiang (Pearl River) Delta[J]. Journal of Tropical Oceanography, 1983,2(2):108-117. (in Chinese))

[18] 罗肇森. 珠江口伶仃洋深水航道开发方案的回淤研究[J]. 水利水运科学研究, 1995(2):110-118. (Luo Zhaosen. Study of siltation for development of deep water navigation channel of Lingdingyang in Pearl River Estuary [J]. Hydro-Science and Engineering, 1995(2):110-118. (in Chinese))

[19] 欧素英. 珠江三角洲咸潮活动的空间差异性分析[J]. 地理科学, 2009,29(1):89-92. (Ou Suying. Spatial difference about activity of saline water intrusion in the Pearl (Zhujiang) River Delta[J]. Scientia Geographica Sinica, 2009,29(1):89-92. (in Chinese))

[20] 陈晖,黄广灵. 东江咸潮上溯特征及盐度运输机理浅析[J]. 水资源保护, 2023,39(6):195-203. (Chen Hui, Huang Guangling. Analysis of saltwater intrusion characteristics and salinity transport mechanism in the Dongjiang River[J]. Water Resources Protection, 2023,39(6):195-203. (in Chinese))

[21] 吴志勇,林青霞. 西江流域水文干旱时空特征分析[J]. 水资源保护, 2016,32(1):51-56. (Wu Zhiyong, Lin Qingxia. Analysis on spatial and temporal characteristics of hydrological drought in Xijiang River Basin[J]. Water Resources Protection, 2016,32(1):51-56. (in Chinese))

[22] 谢凌峰,申其国,徐治中. 20 世纪 80 年代以来珠江三角洲网河区河性演变[J]. 水利水电科技进展, 2015,35(4):10-13. (Xie Lingfeng, Shen Qiguo, Xu Zhizhong. Evolution of river characteristics in river network of Pearl River Delta since [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015,35(4):10-13. (in Chinese))

(收稿日期:2024 - 11 - 28 编辑:刘晓艳)