

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.06.025

东江咸潮上溯特征及盐度输运机理浅析

陈 晖^{1,2,3,4}, 黄广灵^{1,2,3,4}, 谭 超^{1,2,3,4}, 刘 达^{1,2,3,4}, 黄本胜^{1,2,3,4}, 邱 静^{1,2,3,4}

(1. 广东省水利水电科学研究院, 广东 广州 510635; 2. 广东省水动力学应用研究重点实验室, 广东 广州 510635; 3. 河口水利技术国家地方联合工程实验室, 广东 广州 510635; 4. 广东省水安全科技协同创新中心, 广东 广州 510635)

摘要:针对东江咸潮入侵问题,基于三维数值模拟成果,分析了东江南支流咸潮上溯特征及盐度输运机理。结果表明:东江咸潮上溯与潮位相位变化基本一致,在一个大、中、小潮周期内,盐度最大值出现在大潮期间;东江南支流总体处于盐度充分混合至部分混合状态,盐度垂向分布均匀;东江咸潮上溯主要是径流和潮流动力强弱对抗的结果,基本不存在垂向环流的输运,增大下泄径流量是减轻东江咸潮入侵的最有效措施。

关键词:咸潮上溯;输运机理;盐度;数值模拟;东江南支流

中图分类号:P731.12;TV213.4 文献标志码:A 文章编号:1004-6933(2023)06-0195-09

Analysis of saltwater intrusion characteristics and salinity transport mechanism in the Dongjiang River//CHEN

Hui^{1,2,3,4}, HUANG Guangling^{1,2,3,4}, TAN Chao^{1,2,3,4}, LIU Da^{1,2,3,4}, HUANG Bensheng^{1,2,3,4}, QIU Jing^{1,2,3,4}

(1. Guangdong Research Institute of Water Resources and Hydropower, Guangzhou 510635, China; 2. Guangdong Key Laboratory of Hydrodynamic Research, Guangzhou 510635, China; 3. State and Local Joint Engineering Laboratory of Estuarine Hydraulic Technology, Guangzhou 510635, China; 4. Guangdong Provincial Science and Technology Collaborative Innovation Center for Water Safety, Guangzhou 510635, China)

Abstract: To solve the problem of saltwater intrusion, the saltwater intrusion characteristics and salinity transport mechanism in the south branch of the Dongjiang River were analyzed based on three-dimensional numerical simulation. The results show that the change of saltwater intrusion in the Dongjiang River has the same periodicity as that of tidal level, and the maximum salinity occurs during the spring tide in a period of spring, moderate, and neap tides. The south branch of the Dongjiang River is generally in a state of full mixing to partial mixing of salinity, and the salinity distribution is uniform in the vertical direction. The occurrence of saltwater intrusion in the Dongjiang River depends on the contrast between the effects of runoff and tidal current, and there is almost no vertical circulation transport. Therefore, increasing the runoff discharge is the most effective measure to reduce the saltwater intrusion in the Dongjiang River.

Key words: saltwater intrusion; transport mechanism; salinity; numerical simulation; south branch of the Dongjiang River

珠江三角洲是我国经济最发达的地区之一,粤港澳大湾区已成为继纽约湾区、旧金山湾区、东京湾区后的第四大湾区。随着经济社会的快速发展和人口的高度密集,资源越来越成为制约粤港澳大湾区发展的瓶颈,其中以咸潮上溯导致的淡水资源供应不足问题最为突出^[1-2]。早在20世纪80年代,廖喜庭^[3]就针对珠江三角洲河口区的咸潮活动规律进行了全面研究,分析了河口区含氯度时空变化特征及人类活动的影响。2003年入秋以来,连续强咸潮对以磨刀门水道为主要水源地的珠海和澳门供水安

全造成了巨大影响,国家防汛抗旱总指挥部连续两年实施“珠江压咸补淡应急调水”工程^[4]。此后的一段时期内,针对珠江河口咸潮入侵研究热度持续攀升,胥加仕等^[5-7]从上游径流量减少、取供水量增加、河口及河道地形变化、河道分流比改变以及海平面上升等方面分析了珠江三角洲咸潮活动的特点;陈水森等^[8]提出了上游流量与咸潮入侵范围的经验公式,为咸潮入侵快速决策提供了依据;高时友等^[9]提出河口分层特点是影响咸潮上溯的重要因素;欧素英等^[10]基于1962—1988年长序列观测数

基金项目:广东省自然科学基金项目(2021A1515012077)

作者简介:陈晖(1992—),男,工程师,硕士,主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail:chhui127@163.com

通信作者:黄广灵(1986—),男,教授级高级工程师,硕士,主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail:243220867@qq.com

据以及 2001 年和 2004 年两次珠江三角洲大范围同步观测数据,采用聚类分析方法,按咸潮活动将河口类型分为潮优型和径控型;刘斌等^[11]基于 2005—2015 年实测数据,分析了磨刀门水道咸界变化特征。近年来,随着计算机技术的快速发展,数值模拟成为科学研究中不可或缺的工具。邹华志等^[12]采用 FVCOM (finite-volume community ocean model) 模拟了磨刀门水道咸潮上溯过程;程香菊等^[13]同样采用 FVCOM 分别对疏挖磨刀门拦门沙和建设人工潜坝之后磨刀门水道的工况进行数值模拟,研究了控制性工程措施对咸潮上溯的影响;刘祖发等^[14]采用 MIKE3 模型对磨刀门水道咸潮上溯进行了研究,指出分层导致水体密度差,进而影响垂向环流,致使盐度分布出现异常,该过程对盐度的累积作用不可忽视;尹小玲等^[15]研究了分层型河口咸水上溯规律;王彪等^[16]建立了枯水期磨刀门水道日平均盐度与潮汐和径流量关系的统计模型。

目前针对珠江河口咸潮上溯的研究大多集中在径控型河口,如磨刀门河口等,主要研究高度分层至部分混合环境条件下咸潮入侵过程及机理,而针对潮控型河口,如虎门河口及其上游东江三角洲等区域的研究相对较少^[17-18]。自 2020 年秋季以来,虎门河口上游左岸的东江流域遭遇连续特枯水情,发生了自 1963 年以来最严重的旱情,严重威胁了深圳、东莞等城镇取用水和对港供水安全^[18]。本文以东江流域的东江南支流为重点研究区域,通过数值模拟的方法,对咸淡水充分混合型的河道咸潮上溯特征和动力机制进行系统研究,研究成果对掌握潮控型河口咸潮上溯规律、上游取水安全以及水资源优化配置均具有重要意义。

1 东江咸潮上溯历史及现状

东江流域源于江西、广东两省接壤边陲,是珠江流域三大水系之一,与西、北江三角洲共同构成珠江三角洲^[19-20]。流域下游东江三角洲区域历来受到咸潮影响,以多年月平均最大盐度 0.5PSU 的分布界线作为平水年咸潮上溯界线,以历年最大盐度 0.25PSU 作为大旱年咸水入侵界线。按照这一标准,1960—1980 年,平水年咸水入侵界线为碧头—太平—厚街赤岑—朱平沙—南洲—黄埔—狮子洋西侧化龙—石基—蕉门新沙—洪奇沥万顷沙(西北)—横门东;大旱年份的咸水入侵界线为东莞长安—虎门寨—厚街—莞城(南)—铁涌—新塘—南岗—白鹤潭—西村水厂(硬颈海)—鹤洞—大石—沙湾—横档—张家边。20 世纪 90 年代以前,东江三角洲网河石龙北的东江北干流水道的咸水界在南

洲至倒运海入口之间河段变动,石龙南的东莞水道的咸水界未上溯越过莞城^[21],2004 年咸潮前锋已靠近新建的浏渥洲取水口^[5],2005 年 12 月 15—29 日,东莞第二水厂连续 16 d 停水避咸,其上游不到 5 km 的第三水厂,日产自来水 110 万 m^3 ,取水口氯化物含量严重超过饮用水水质标准。2009 年,东江南支流咸潮上溯至莞穗路大王洲桥,2011 年为近年来受咸潮影响较为严重的年份,东江北干流咸潮上溯至莞穗路江南大桥。受 2020 年入秋之后上游来水持续严重偏少的影响,2021 年东江流域遭遇了 1963 年以来最为严重的秋冬春夏连旱,为 1963 年以来咸潮上溯最严重的年份,东江流域来水减少 70%,骨干水库最枯时有效蓄水率仅为 5%,新丰江水库突破死水位以下 0.2 m,基本面临无水可调的局面。2021 年 9—12 月,以东江三角洲河道为水源的东莞市各水厂取水口氯化物质量浓度超标时长累计高达 1 232 h,氯化物质量浓度最高超过 1 200 mg/L,水厂暂停取水累计总时长达 700 h^[18]。

2 模型构建及分析区域

2.1 控制方程及计算方法

采用 SCHISM (semi-implicit cross-scale hydro-science integrated system model) 建立研究区水动力数值模型。SCHISM 是一个三维斜压、跨尺度环流模型,模型水平方向采用非结构网格,垂向采用 SZ 混合坐标(即在浅水区和深水区的上部为地形拟合坐标,在深水区的下部为等平面坐标),在地形侧边界和底边界的处理上更加精确、贴合实际。在计算方法上,该模式采用半隐式有限元欧拉-拉格朗日法求解 Navier-Stokes 方程,使计算更加稳定。模型基于静压近似及 Boussinesq 方程近似求解三维浅水方程和盐度输运方程,求解的主要变量包括自由水面高度、流体速度和盐度矢量等。

2.2 计算区域及网格划分

本文研究范围为东江三角洲,研究区域如图 1 所示,重点关注河段为东江南支流(黄色实线标注河段)。沿东江南支流布置 4 个分析断面,分别为沙田泗盛(CS1)、大公洲(CS2)、京港澳高速桥(CS3)以及刘屋断面(CS4)。

采用 SCHISM 建立范围覆盖珠江网河—河口湾—近海陆架的水动力数值模型,考虑珠江流域东、西、北江上游来流与外海潮流相互作用的影响,模型计算范围扩展到整个珠江三角洲,为 $112.6^{\circ}\text{E} \sim 113.6^{\circ}\text{E}$, $21^{\circ}\text{N} \sim 23.6^{\circ}\text{N}$ 。模型上边界选取西江的高要、北江的石角、东江的博罗、流溪河老鸦岗及潭江石咀,考虑到老鸦岗和石咀在潮流界内,在模拟过



图1 研究范围

Fig.1 Sketch of study area

程中将其流量边界各上延 35 km,并对上延河道做概化处理,减小其对计算结果的影响,模型下边界取约 100 m 等深线大陆架附近。模型网格及计算范围如图 2 所示,模型采用全三角形的非结构网格,能够比较精确地贴合复杂河岸边界。模型网格共 101 265 个节点,172 246 个网格单元,网格单元边长为 10 ~ 12 000 m。模型在垂向上采用 Sigma 坐标,共分 10 层,均分当地水深,分层厚度随水深变化。模型中珠江三角洲网河地形采用 2020 年实测大范围组合地形,河口湾及近岸海区地形采用 2016—2019 年海图数字化成果,外海陆架地形采用 ETOPO1 全球海洋地形数据。

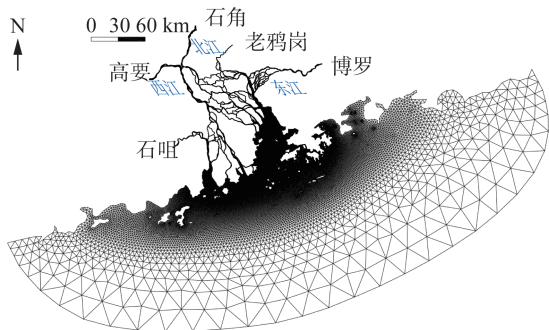


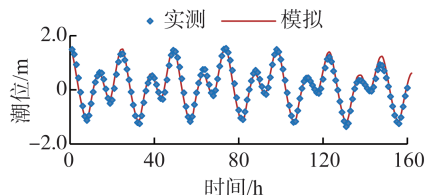
图2 模型计算范围

Fig.2 Sketch of numerical simulation area

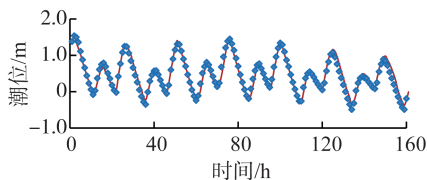
模型由上游流量边界和外海潮位边界共同驱动。外海潮汐调和常数由中国海域潮汐预报软件 Chinatide 计算得到,共选取了珠江口海区 9 个主要分潮,即 Q1、O1、P1、K1、N2、M2、S2、K2 和 SA 的调和常数计算结果。模型上游边界均采用流量边界,由水文站实测资料给定。模型采用斜压模式进行计算,其中外海盐度边界取 34PSU(取值依据为边界点处的 WOA09 盐度资料的年平均值),上游开边界盐度均设置为 0。河道糙率主要依据以往计算经验以及率定的结果综合给定,经实测资料率定后确定糙率取值范围为 0.025 ~ 0.045。

2.3 模型率定与验证

模型采用 2016 年 12 月枯季水文观测数据进行率定,其中潮位选取沙田泗盛和石龙(二),流速选取石龙南和石龙北观测数据进行率定,根据率定结果(图 3、图 4),模型潮位与实测数据最大偏差为 0.21 m,流速总体一致。采用 2019 年 3 月东江三角洲大虎、沙田泗盛、南丫、沉洲、杨公洲、乌沙 6 个监测位置对应的盐度数据对模型进行率定(图 5),采用绝对平均误差对模拟结果进行统计,盐度误差在 20% 以内,满足相关技术要求。采用 2021 年 4 月东江下游沙田泗盛、大盛 2 个位置潮位以及东莞第二水厂、第三水厂、第四水厂和万江水厂等 4 个水厂取水口盐度数据对模型进行验证,模拟计算的潮位过程与实测过程基本一致,潮位最大偏差为 0.18 m;采用绝对平均误差对模拟结果进行统计,盐度误差在 10% 以内,满足相关技术要求,因此,模型可用于进一步分析计算。率定及验证位置见图 1。



(a) 沙田泗盛



(b) 石龙(二)

图3 潮位率定结果

Fig.3 Results of tidal level calibration

3 研究方法

3.1 分层系数

盐淡水混合过程受径流、潮流、风、波浪、地形地貌等多种因素影响,一般依据盐淡水混合特征分析其动力结构。分层系数是判别水体动力结构的重要参数,其计算公式为

$$n = (S_b - S_s) / \bar{S} \quad (1)$$

式中: n 为分层系数; S_b 、 S_s 分别为测点底层与表层的盐度; $\bar{S}$ 为测点平均盐度值。

一般来说,分层系数 n 越小,则混合越均匀,反之分层明显。根据 Prandle 理论^[22],当 $n < 0.15$ 时可认为水体处于盐度充分混合状态,当 $0.15 \leq n \leq 0.32$ 时

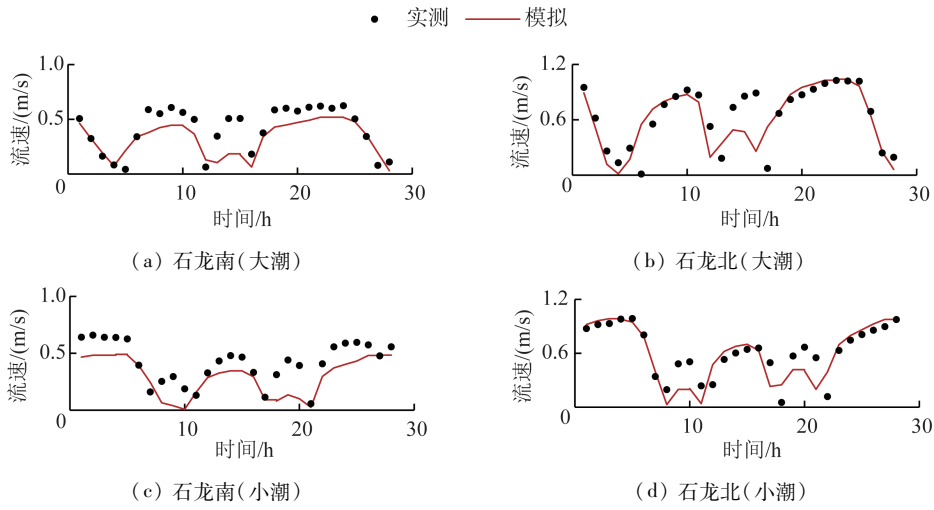


图4 流速率定结果

Fig.4 Results of velocity calibration

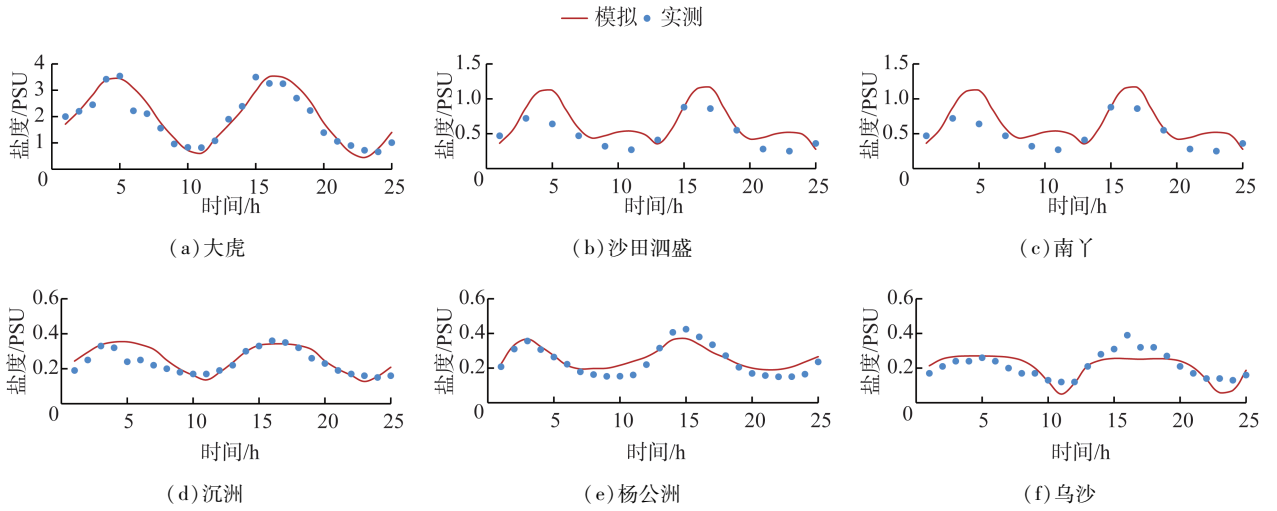


图5 盐度率定结果

Fig.5 Results of salinity calibration

水体处于盐度部分混合状态,或称为缓混合状态,当 $n > 0.32$ 时水体处于盐度高度分层状态。

3.2 输运机理

采用物质输运分解公式计算物质净通量^[23]。若不计流速 u 的脉动项,则瞬时速度可以分解为垂向平均量 $\bar{u}$ 和其偏差量 u' ,即 $u = \bar{u} + u'$ 。 $\bar{u}$ 和 u' 又可分为潮平均量之和和潮变化量,即 $\bar{u} = \bar{u}_0 + \bar{u}_t$, $u' = u'_0 + u'_t$,因此, $u = \bar{u}_0 + \bar{u}_t + u'_0 + u'_t$ 。同理,盐度 S 也可以表示为 $S = \bar{S}_0 + \bar{S}_t + S'_0 + S'_t$ 。水深 h 可表示为 $h = h_0 + h_t$,其中 h_0 为水深的潮平均量, h_t 为水深的潮变化量。

单宽潮周期平均输水量为

$$\langle Q \rangle = \int_0^T \int_0^1 u h dz dt / T = \bar{u}_0 h_0 + \langle \bar{u}_t h_t \rangle = h_0 \bar{u}_L \quad (2)$$

其中 $\bar{u}_L = \bar{u}_E + \bar{u}_S$
式中: $\langle \rangle$ 表示潮周期平均; z 为相对水深, $0 \leq z \leq$

1; T 为潮周期; $\bar{u}_0 h_0$ 为平均流项; $\langle \bar{u}_t h_t \rangle$ 为潮汐与潮流相关项,也称为斯托克斯漂移效应; $\bar{u}_L$ 为垂向平均拉格朗日余流; $\bar{u}_E$ 为垂向平均欧拉余流; $\bar{u}_S$ 为垂向平均斯托克斯漂移。

单宽潮周期平均盐度输移量为

$$\int_0^T \int_0^1 u h S dz dt / T = \sum_{i=1}^8 C_i \quad (3)$$

式中: C_1 为欧拉余流输运项, $C_1 = h_0 \bar{u}_0 \bar{S}_0$; C_2 为潮汐与潮流相关项,即斯托克斯输运项, $C_2 = \langle \bar{u}_t h_t \rangle \bar{S}_0$; C_3 为潮汐与盐度的潮变化项, $C_3 = \langle h_t \bar{S}_t \rangle \bar{u}_0$; C_4 为潮流场与盐度的潮变化项, $C_4 = \langle h_t \bar{u}_t \bar{S}_t \rangle$; C_5 为流速与盐度垂向变化相关项, $C_5 = h_0 \bar{u}'_0 \bar{S}'_0$,其中 $\bar{u}'_0$ 、 $\bar{S}'_0$ 分别为 u'_0 和 S'_0 的垂向平均值; C_6 为垂直重力净环流导致的剪切效应项, $C_6 = \langle h_t u'_0 S'_t \rangle$; C_7 为潮周期内速度剖面 and 盐度剖面间的差别项, $C_7 = \langle h_t u'_t S'_0 \rangle$; C_8 为垂向潮振动切变项, $C_8 = \langle h_t u'_t S'_t \rangle$ 。 $C_1 + C_2$ 为平流输运; $C_3 + C_4 + C_5$ 为潮泵效应。

4 结果与分析

4.1 东江咸潮上溯时空变化规律

4.1.1 盐度随时间变化规律

取模型稳定运行后的 10 d,即 2019 年 4 月 2 日 0 时至 2019 年 4 月 11 日 23 时进行分析,潮汐变化过程为小潮—中潮—大潮。东江上游边界采用博罗站日均流量,流量为 268 ~ 755 m³/s,平均流量为 448 m³/s。以沙田泗盛(CS1)断面作为潮动力参考断面,选取涨急、涨憩、落急、落憩 4 个潮汐特征时刻,如图 6 所示(图中 A、B、C、D 点分别对应 4 个潮汐特征时刻)。

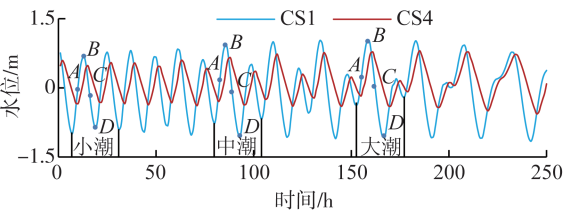


图 6 CS1 和 CS4 断面潮位过程

Fig. 6 Tidal level processes of CS1 and CS4 sections

图 7 给出了 CS1、CS2、CS3、CS4 断面分层系数随时间变化过程。从图 7 可以看出,各断面分层系数均较小,大部分时刻分层系数在 0.15 以内,CS1、CS2、CS3、CS4 断面分层系数最大值分别为 0.21、0.08、0.15 和 0.60,说明水体总体处于盐度充分混合至部分混合状态。从分层系数随时间变化特征来看,CS1 断面分层系数最大值出现在落潮阶段的落急时刻,但分层系数随大、中、小潮过程变化不明显,小潮期间的分层系数和大潮期间的分层系数相差不大;CS2 断面分层系数总体较小,波动不明显,分层

系数的峰值同样出现在落潮阶段的落急时刻,但在中潮的涨急阶段也会出现分层系数的高值;CS3 断面分层系数也相对较小,基本不超过 0.1,分层系数的峰值出现在涨急时刻;CS4 断面分层系数相对较大,最大值可达到 0.6,此时水体处于盐度高度分层状态,分层系数的峰值大多出现在落急后接近最低潮位时刻。

各断面表、底层盐度随时间变化过程如图 8 所示。从盐度总体变化来看,CS1 断面底层盐度为 2.5 ~ 4.6 PSU 之间,表层盐度为 2.5 ~ 4.5 PSU;CS2 断面底层盐度为 2.7 ~ 3.2 PSU,表层盐度为 2.6 ~ 3.2 PSU;CS3 断面底层盐度为 1.3 ~ 2.4 PSU,表层盐度为 1.3 ~ 2.5 PSU;CS4 断面表层盐度为 0 ~ 0.7 PSU,底层盐度为 0 ~ 0.7 PSU。表、底层盐度变化过程与潮位变化过程基本一致,两者之间约有 0.5 ~ 1 h 的时间滞后,但总体仍表现为随着涨潮过程,表、底层盐度值不断增大;随着落潮过程,表、底层盐度值不断减小。这与盐度的一般变化规律一致,涨潮时,外海盐度较高的海水随涨潮过程向上游入侵,潮位最高时,盐度较高的海水入侵到最远的距离,此时各断面盐度值达到最大;落潮时,上游淡水随落潮过程不断向外海推移,潮位最低时,各断面盐度值达到最小。从小潮—中潮—大潮的变化过程可以看出,表、底层盐度值除了随涨落潮变化,与潮型具有一定的关系,在本次所选取的典型潮周期过程中,盐度峰值均出现在大潮的最高潮位附近。

4.1.2 盐度随空间变化规律

以 CS1 ~ CS4 断面的沿程剖面为研究对象,选取大、中、小潮过程各阶段中涨急、涨憩、落急、落憩 4 个潮汐特征时刻,分析盐淡水的混合特征。沿程

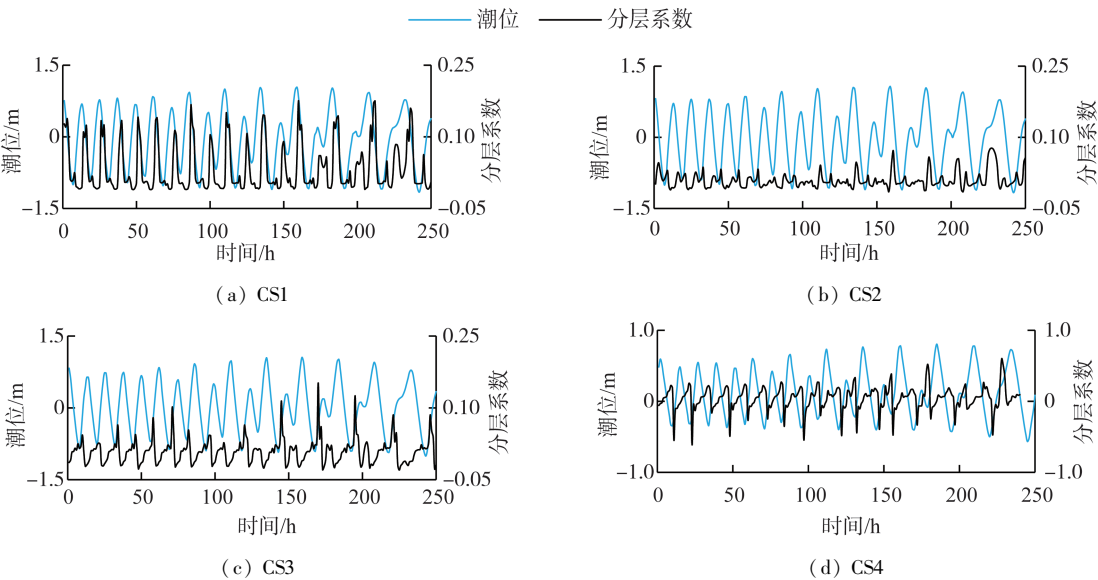


图 7 各断面分层系数随时间变化过程

Fig. 7 Variations of stratification coefficient of different sections

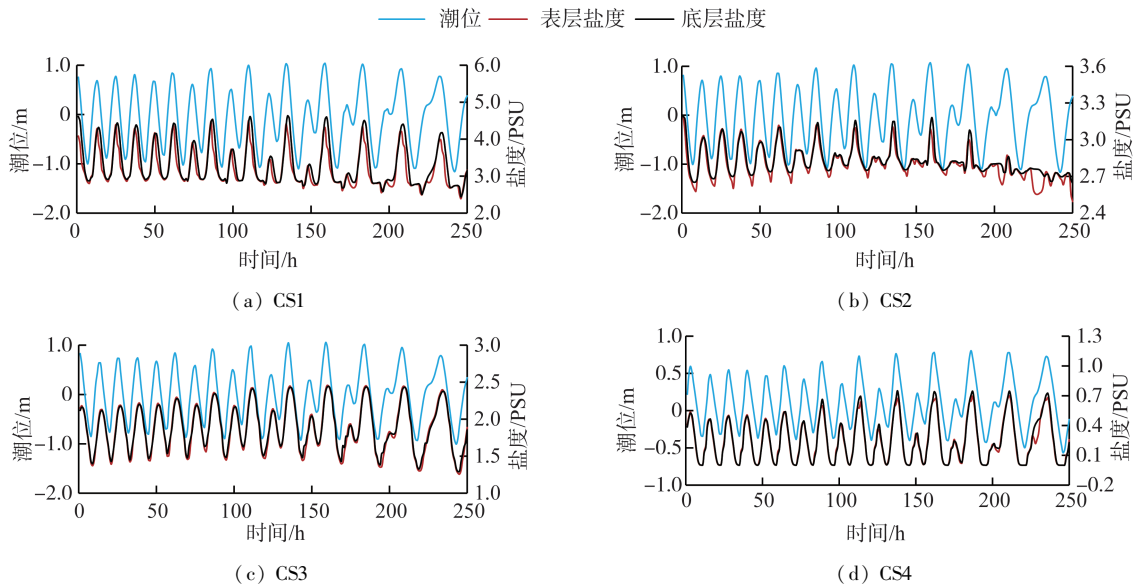


图 8 各断面盐度和潮位时间过程

Fig. 8 Salinity and tidal level processes of different sections

纵断面位置如图 1 中黄色实线所示,从虎门河口内的狮子洋至其上游东江南支流和北干流的分界点,全长约 45 km。图 9 为小潮阶段沿东江南支流纵剖面盐度分布,包含了一个潮周期内涨急、涨憩、落急、落憩 4 个潮汐特征时刻,图中横坐标为距外海距离(向上游为正)。

小潮涨急时刻,外海盐度开始增大,最大盐度约为 4.5 PSU,表、底层盐度没有明显的分层,此时 0.5 PSU 盐度等值线(换算为氯化物质量浓度约为 250 mg/L,GB 5749—2022《生活饮用水卫生标准》规定生活饮用水的总氯化物质量浓度不应超过 250 mg/L)距离 CS4 断面约 5 km。随着涨潮过程,外海高盐度海水向上游推进,至涨憩时刻,相同位置的盐度值增大,纵断面最大盐度达到约 5.8 PSU,此时 0.5 PSU 盐度等值线向上游移动明显,距离 CS4 断

面仅约 2 km,但盐度在垂向上分布均匀,没有明显的分层。随后 CS1 断面处开始落潮,至落急时刻(落急时刻和涨憩时刻相差约 2 h),河口处盐度明显降低,最大盐度下降至约 5.0 PSU。但由于涨落潮时刻的差异,在 CS1 断面处落潮时,上游断面仍处于涨潮过程,因此,0.5 PSU 盐度等值线继续向上游移动接近 CS4 断面,表明在该段时间内,位于 CS4 断面附近的第三水厂所取原水含氯度有超标的风险。之后,河口外高盐度水退却,河道沿程断面盐度均明显降低,0.5 PSU 等值线下移至距离 CS4 断面下游约 4.5 km 的位置。至此,整个小潮过程结束。

对比分析 CS1 和 CS4 断面潮位随时间变化过程(图 6)可以看出,两者之间相位差约为 2 h,表明 CS1 断面处于落急时刻时,上游 CS4 断面为涨憩时刻,即为咸潮上溯最远距离的时刻,此时 CS4 断面

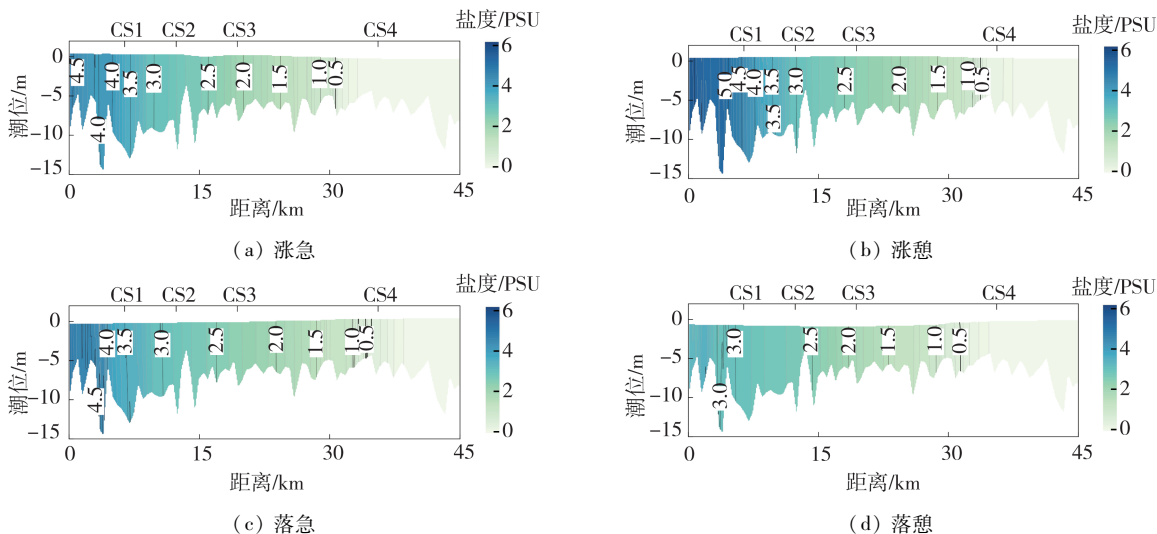


图 9 小潮阶段沿东江南支流纵剖面盐度分布

Fig. 9 Salinity distribution in longitudinal profile along south branch of the Dongjiang River in neap tide

的盐度可以代表受咸潮影响最显著的时刻。总体来看,小潮期间盐度在垂向上混合较为均匀,外海入侵的海水没有明显的盐水楔。沿纵剖面上,盐度存在明显的梯度,盐度值自下游向上游逐渐减小。从小潮过程各特征时刻盐度纵剖面变化来看,盐度随涨落潮存在明显的周期变化,涨憩时刻盐度达到最大值,落憩时刻盐度为最小值。

中潮阶段(图 10)盐度垂向分布仍较为均匀,从纵剖面来看仅表现出沿断面的梯度。在涨急、涨憩、落急、落憩 4 个时刻变化过程与小潮阶段相似,总体仍表现为涨憩时刻盐度值最大,河口外最高盐度值可达到约 6.0 PSU,较小潮阶段略有增大。在中潮阶段,0.5 PSU 盐度等值线上溯的距离更远,特别是 CS4 断面处于涨憩时刻时(此时 CS1 断面为落急时刻),0.5 PSU 盐度等值线越过了 CS4 断面,此时第

三水厂所取原水盐度将会超标。

大潮阶段(图 11)东江南支流盐度在纵剖面上变化规律与小潮和中潮阶段的变化规律相差不大,盐度垂向分布均匀,没有明显的盐水楔出现。下游最大盐度出现在涨憩时刻,达到约 6.2 PSU。盐水上溯的距离较小潮和中潮阶段有所增加,0.5 PSU 盐度等值线在两个时刻均越过了 CS4 断面,表明大潮阶段第三水厂取水受影响的时长将有所增加。

4.2 东江咸潮上溯输运机理研究

对研究时段内大、中、小潮阶段进行盐度输运分解计算,结果见表 1。从输运机制分解结果来看,各输运项对盐度净输运的总体贡献并不一致,其中欧拉余流输运项 C_1 、斯托克斯输运项 C_2 、潮汐与盐度的潮变化项 C_3 以及潮流场与盐度的潮变化项 C_4 对盐度输运的贡献较大,其他 4 项对盐度输运的贡献

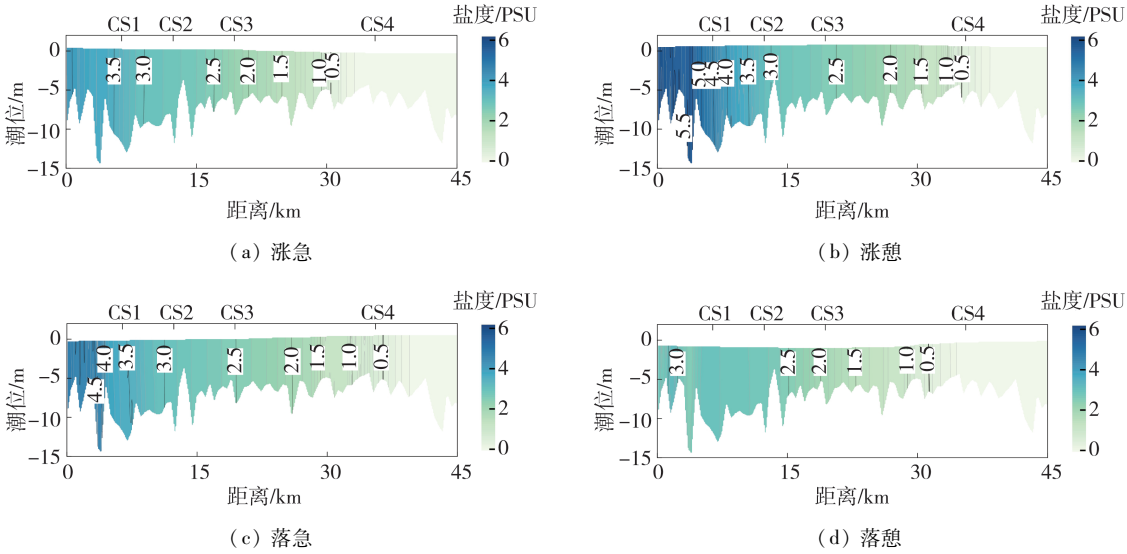


图 10 中潮阶段沿东江南支流纵剖面盐度分布

Fig. 10 Salinity distribution in longitudinal profile along south branch of the Dongjiang River in moderate tide

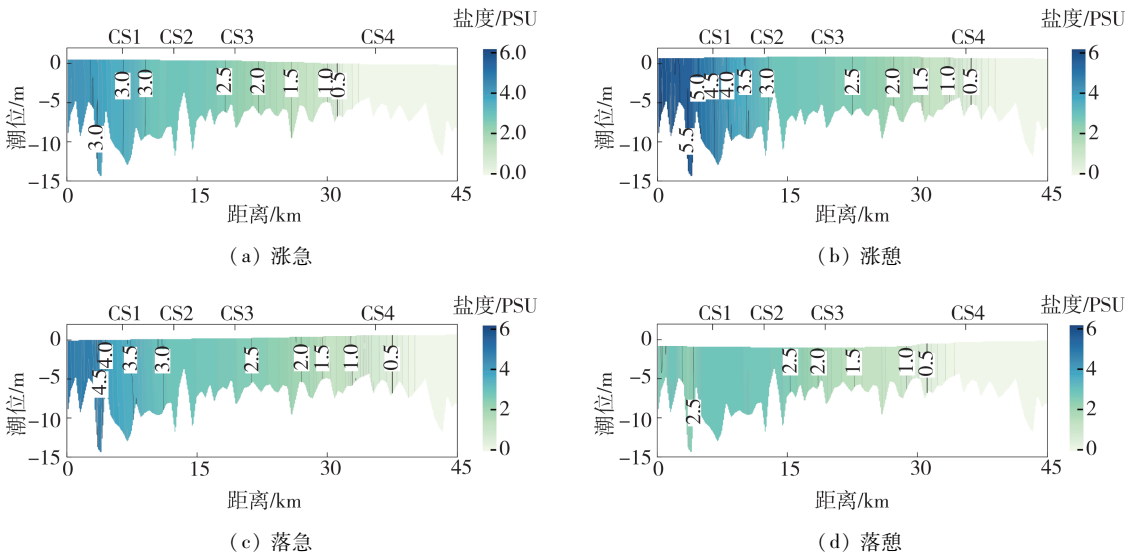


图 11 大潮阶段沿东江南支流盐度纵剖面分布

Fig. 11 Salinity distribution in longitudinal profile along south branch of the Dongjiang River in spring tide

表1 盐度输运分解计算结果

单位:PSU·m/s

Table 1 Calculation results of salinity transport decomposition

unit:PSU·m/s

阶段	断面	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	盐度输移量
小潮	CS1	0.499	-0.461	0.003	0.001	0.000	0.000	0.001	-0.001	0.042
	CS2	0.353	-0.256	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.099
	CS3	1.162	-0.311	0.013	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.864
	CS4	0.139	-0.011	0.004	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.132
中潮	CS1	0.159	-0.427	0.001	-0.006	0.000	0.000	0.000	-0.001	-0.274
	CS2	0.282	-0.240	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.043
	CS3	1.221	-0.316	0.013	-0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.916
	CS4	0.159	-0.013	0.006	-0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.150
大潮	CS1	0.410	-0.337	0.003	-0.017	0.000	0.000	0.000	-0.001	0.058
	CS2	0.289	-0.206	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.084
	CS3	1.062	-0.258	0.014	-0.006	0.000	0.000	0.000	0.000	0.812
	CS4	0.155	-0.014	0.007	-0.005	0.000	0.000	0.000	0.000	0.143

几乎为0。在这些输运项中,以 C_1 和 C_2 贡献为主。 C_1 主要反映的是径流等非周期性水力作用的结果,从大、中、小潮过程计算结果来看,各断面 C_1 的方向均向海。 C_2 是因流速和水深的潮偏差存在相位差而产生的输运,由于涨、落憩时刻滞后于高、低潮位时刻,导致水深与流速的潮偏差方向相反,使得 C_2 的方向向陆。 C_3 和 C_4 主要是由于潮位、垂向流速和垂向盐度存在相位差而产生的输运。总体来看,在大、中、小潮过程中,东江南支流咸潮均以平流输运为主,潮泵效应相对较弱。表明盐度的输运整体仍以径潮相互作用为主导,盐度垂向梯度很小,因此,垂向环流产生的输运不明显。当径流动力起主导作用时,净输运方向向海;当潮流动力起主导作用时,净输运方向向陆。

5 结 论

a. 东江南支流咸潮上溯过程与潮位变化过程具有相同的周期性,在时间上盐度变化过程滞后于潮位过程0.5~1.0h,但总体仍呈现为涨潮期间盐度值增大,落潮期间盐度值减小。大、中、小潮阶段盐度的最大值出现在涨憩时刻或略有滞后,盐度的最小值出现在落憩时刻。在一个大、中、小潮周期内,盐度最大值出现在大潮期间。

b. 东江南支流分层系数基本在0.15以内,最大值不超过0.60,总体处于盐度充分混合状态,小部分时段处于缓混合状态,盐度垂向总体分布均匀,分层系数的峰值一般出现在涨、落急时刻。

c. 东江咸潮上溯主要是径流动力和潮流动力强弱对抗的结果,由盐度和潮位相位差、潮周期不对称引起的输运也不容忽视,而垂向环流等其他输运动力贡献很小。

参考文献:

[1] 杨芳,陈文龙,卢陈,等. 粤港澳大湾区咸潮综合防控体

系研究[J]. 水资源保护,2023,39(1):32-41. (YANG Fang, CHEN Wenlong, LU Chen, et al. Research on comprehensive prevention and control system of saltwater intrusion in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(1):32-41. (in Chinese))

[2] 陈文龙,马志鹏,袁菲,等. 粤港澳大湾区水安全协同调控理论框架研究[J]. 水资源保护,2023,39(1):22-31. (CHEN Wenlong, MA Zhipeng, YUAN Fei, et al. Theoretical framework of water security collaborative regulation and control in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(1):22-31. (in Chinese))

[3] 廖喜庭. 珠江三角洲河口区的咸潮活动规律[J]. 人民珠江,1987(2):31-34. (LIAO Xiting. Characteristics of saline water activities in the Pearl River[J]. Pearl River, 1987(2):31-34. (in Chinese))

[4] WEN Ping, YAO Zhangmin, YANG Xiaoling. An effect analysis of the Pearl River emergency water transfer project for repelling saltwater intrusion and supplementing freshwater[C]//International Conference on Estuaries and Coasts. Hydrological Bureau of Pearl River Water Resources Commission Ministry. Guangzhou: Guangdong Economic Press, 2006.

[5] 胥加仕,罗承平. 近年来珠江三角洲咸潮活动特点及重点研究领域探讨[J]. 人民珠江,2005(2):21-23. (XU Jiashi, LUO Chengping. Characteristics of saline water activities in the Pearl River Delta in recent years and major studied basin[J]. Pearl River, 2005(2):21-23. (in Chinese))

[6] 方神光,崔丽琴. 磨刀门水道枯季咸潮入侵特性及规律[J]. 水利水电科技进展,2015,35(4):14-18. (FANG Shenguang, CUI Liqin. Characteristics and rules of seawater intrusion during dry season in Modaomen Waterway[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(4):14-18. (in Chinese))

[7] 孔兰,陈晓宏. 珠江口咸潮影响因素分析[J]. 水资源保护, 2015, 31(6): 94-97. (KONG Lan, CHEN Xiaohong. Analysis on the influence factors of saltwater in

- Pearl River Estuary [J]. Water Resources Protection, 2015, 31(6): 94-97. (in Chinese))
- [8] 陈水森, 方立刚, 李宏丽, 等. 珠江口咸潮入侵分析与经验模型: 以磨刀门水道为例[J]. 水科学进展, 2007, 18(5): 751-755. (CHEN Shuisen, FANG Ligang, LI Hongli, et al. Saltwater intrusion analysis and experiential model for Pearl River Estuary, South China: a case study in Modaomen Watercourse[J]. Advances in Water Science, 2007, 18(5): 751-755. (in Chinese))
- [9] 高时友, 陈荣力. 珠江磨刀门河口分层流特点及其对咸潮上溯的影响[C]//第四届粤港澳可持续发展研讨会论文集. 广州: 广东科技出版社, 2008: 47-50.
- [10] 欧素英, 杨清书, 雷亚平. 咸潮入侵理论预报模式的分析及其在西江三角洲的应用[J]. 热带海洋学报, 2010, 29(1): 32-41. (OU Suying, YANG Qingshu, LEI Yaping. Analysis of a model for saline water intrusion and its application in the West River Delta [J]. Journal of Tropical Oceanography, 2010, 29(1): 32-41. (in Chinese))
- [11] 刘斌, 黄宇铭, 刘丽诗, 等. 2005 年以来珠江磨刀门水道咸界变化特点分析[J]. 人民珠江, 2016, 37(5): 30-33. (LIU Bin, HUANG Yuming, LIU Lishi, et al. Analysis of change characteristics of gate waterway in Pearl River since 2005 a salty field[J]. Pearl River, 2016, 37(5): 30-33. (in Chinese))
- [12] 邹华志, 王琳, 董延军. 珠江河口磨刀门水道咸潮动力高分辨率三维数值模拟研究[J]. 人民珠江, 2012, 33(增刊 1): 56-60. (ZOU Huazhi, WANG Lin, DONG Yanjun. High resolution 3D numerical simulation of saltwater intrusion in Modaomen Channel at the Pearl River Estuary[J]. Pearl River, 2012, 33(Sup1): 56-60. (in Chinese))
- [13] 程香菊, 詹威. 数值分析磨刀门水道咸潮上溯控制工程措施的效应[J]. 水动力学研究与进展(A 辑), 2012, 27(5): 597-604. (CHENG Xiangju, ZHAN Wei. Modeling approach to assess the effects of controlling engineering measures on saltwater intrusion in Modao Estuary [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2012, 27(5): 597-604. (in Chinese))
- [14] 刘祖发, 丁波, 关帅, 等. 磨刀门水道咸潮上溯数值模拟及其分析[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2016, 55(6): 1-9. (LIU Zufa, DING Bo, GUAN Shuai, et al. Numerical simulation and analysis of saltwater intrusion to Modaomen waterway [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2016, 55(6): 1-9. (in Chinese))
- [15] 尹小玲, 赵雪峰, 黄舒琴, 等. 分层型河口咸水上溯对径流潮汐共同作用的基本响应[J]. 水资源保护, 2020, 36(4): 68-74. (YIN Xiaoling, ZHAO Xuefeng, HUANG Shuqin, et al. Basic response of saline water intrusion on combined action of runoff and tide in stratified estuary [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(4): 68-74. (in Chinese))
- [16] 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))
- [17] 林若兰, 卓文珊, 曾珂, 等. 不同风向对珠江东四口门盐水入侵的影响[J]. 水资源保护, 2020, 36(1): 66-75. (LIN Ruolan, ZHUO Wenshan, ZENG Ke, et al. Influence of different wind direction on saltwater intrusion in east four portals of Pearl River [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(1): 66-75. (in Chinese))
- [18] 杨芳, 邹华志, 卢陈, 等. 东江三角洲咸潮加剧原因和对策探讨[J]. 中国水利, 2022(4): 28-30. (YANG Fang, ZOU Huazhi, LU Chen, et al. Study on reasons and measures to increasing seawater intrusion in Dongjiang Delta [J]. China Water Resources, 2022(4): 28-30. (in Chinese))
- [19] 郑金海, 鲍仕昱, 张蔚, 等. 河床下切对珠江三角洲峰值水位演变的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(4): 1-6. (ZHENG Jinhai, BAO Shiyu, ZHANG Wei, et al. Effect of channel deepening on the evolution of peak water level in the Pearl River Delta [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(4): 1-6. (in Chinese))
- [20] 肖洋, 王艳, 徐辉荣, 等. 珠江三角洲洪水就近入海防洪治理方案[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(3): 257-264. (XIAO Yang, WANG Yan, XU Huirong, et al. Analysis on flood control scheme for flood discharge from nearer route in the Pearl River Delta [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(3): 257-264. (in Chinese))
- [21] 谭超, 邱静, 黄本胜, 等. 东江下游潮区界、潮流界、咸水界变化对人类活动的响应[J]. 广东水利水电, 2010(10): 36-39. (TAN Chao, QIU Jing, HUANG Bensheng, et al. Response of tidal limit, tidal current limit and salt water limit of downstream Dongjiang River to human activities [J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2010(10): 36-39. (in Chinese))
- [22] PRANDLE D. On salinity regimes and the vertical structure of residual flows in narrow tidal estuaries[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1985, 20(5): 615-635.
- [23] 肖莞生, 陈子燊. 珠江河口区枯季咸潮入侵与盐度输运机理分析[J]. 水文, 2010, 30(3): 10-14. (XIAO Guansheng, CHEN Zishen. Analysis of saline intrusion and salinity transport mechanism in estuary of Pearl River [J]. Journal of China Hydrology, 2010, 30(3): 10-14. (in Chinese))

(收稿日期: 2022-12-09 编辑: 施业)