

珠江河口枯季咸潮上溯特征与机制分析

张敏^{1,2}, 陈钰祥³, 罗军^{1,2}, 曾学智^{1,2}

(1. 国家海洋局南海预报中心, 广东 广州 510310; 2. 自然资源部海洋环境探测技术与应用重点实验室, 广东 广州 510310; 3. 中国水产科学研究院南海水产研究所, 广东 广州 510310)

摘要: 以珠江河口磨刀门和伶仃洋为代表, 通过实测资料分析和数值模拟相结合的方法, 对珠江河口枯季咸潮上溯特征和机制进行系统的研究分析。结果表明: 在整个珠江河口, 咸潮上溯主要通过底层入侵河道, 而淡水主要通过表层流出外海。中潮期间的涨潮历时明显大于落潮历时是磨刀门水道在中潮期间出现咸潮上溯最大值的原因。伶仃洋整体盐度呈现东高西低的分布特征, 盐度分层现象也较为明显, 这主要与伶仃洋水下地形东深西浅以及注入淡水的口门分布在西侧有关。另外, 表层低盐度水在科氏力和北风的作用下西偏, 导致高盐度区域主要位于伶仃洋东部的深水区域, 低盐度水团主要位于伶仃洋西侧浅滩区域。

关键词: 珠江河口; 咸潮上溯; 数值模拟; 机制

中图分类号: P731.23 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2021)05-0008-09

1 引言

珠江三角洲地区位于广东省南部, 涉及粤、港、澳三地, 是西江、北江和东江下游的冲积平原, 流域积雨面积共 26 820 km²。珠江上游来水经三角洲河网区后, 由 8 个主要口门汇入南海。珠江河口枯水期咸潮上溯问题比较严重, 近年来珠江三角洲常常受到严重的“咸灾”。频繁出现的咸潮上溯活动已经成为珠江三角洲面临的环境问题之一, 不仅会造成严重的生态危害, 还会直接影响人民的的生活用水、农作物灌溉以及工业用水, 制约珠江三角洲的经济发展。据统计, 1980—2000 年珠三角地区城镇年用水量增加了 10 倍; 2003 年珠江流域城镇总用水量达到了 6.20×10^{10} m³ (含港、澳地区), 相当于该流域多年平均径流量的 18.5%, 淡水资源严重不足。咸潮上溯是导致珠三角地区淡水资源缺乏的主要因素之一, 再加上河口治理和航道整治工程不同程度地改变了该区域的水动力环境, 使得咸潮上溯危害加剧, 因此, 研究珠江河口咸潮上溯规律与机制

具有重要的理论和现实意义。

咸潮上溯是指海洋大陆架的高盐度水团随着潮汐涨潮流沿着河口的潮汐通道向上游推进, 咸水扩散和咸淡水混合造成上游河道水体变咸的现象。咸潮上溯是入海河流在河口区存在的最主要的潮汐动力过程之一, 也是河口特有的一种自然现象和本质属性, 多发于枯水期和干旱时期^[1-2]。众多专家学者对长江口和珠江口咸潮上溯规律进行了探讨和研究^[3-9]。沈焕庭等^[5]在多年研究的基础上, 从多个方面对长江河口的咸潮上溯进行了论述。河口咸潮上溯主要受上游径流量和潮汐过程的控制, 同时还受到风应力以及河口外陆架环流的影响^[10-12]。宋晓飞等^[13]利用多种基础资料统计分析了磨刀门咸潮上溯的现状及其成因。孔兰等^[14]基于实测资料, 采用集对分析和非参相关分析法研究了珠江口咸潮的影响因素。高时友等^[15]以磨刀门盐度和流速观测资料为基础, 采用盐度输运分解的计算方法对磨刀门盐度输运特征进行了分析。河口咸潮入侵研究以往多基于观测资料, 近年来, 数值模拟方法开始

收稿日期: 2020-05-06; 修回日期: 2020-09-15。

基金项目: 国家重点研发计划重点专项课题(2018YFC1407002)。

作者简介: 张敏(1989-), 女, 工程师, 硕士, 主要从事近海海洋环境研究。E-mail: zhangminling6688@126.com

通讯作者: 陈钰祥(1987-), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事近岸海洋数值模拟研究。E-mail: 543449929@qq.com

加以应用。刘祖发等^[16]利用MIKE3对磨刀门水道咸潮上溯进行数值模拟,认为盐度的层化受地形、分流以及潮汐涨落变化等因素的影响;文章还针对径流变化设置了敏感性试验,分析了径流变化对咸潮上溯的影响^[17]。陈文龙等^[18]构建了覆盖珠江河口及其上游河网区的高分辨率三维斜压数值模型,开展了咸潮上溯的数值模拟计算,探讨了磨刀门水道咸潮上溯强度时空分布差异的原因。林若兰等^[19]构建了珠江东四口门三维水动力数值模型,对枯水期各风向下珠江口水动力进行模拟,分析了各风向下对河口涨落潮流速、盐度分布和潮通量的影响。

以往研究大多数是针对磨刀门水道咸潮上溯的规律特征,对伶仃洋上游水道的咸潮上溯规律研究较少。本文将珠江河口、河网地区以及外海整个海域作为研究对象,以磨刀门和伶仃洋作为重点研究区域,通过实测资料分析和数值模拟相结合的方法对珠江河口枯季咸潮上溯特征和机制进行了系统的研究分析。这对磨刀门和伶仃洋上游取水安全、掌握整个珠江河口枯季咸潮上溯规律、优化淡水资源利用以及改善水环境等具有重要的意义。

2 模型设置及验证

本文使用非结构有限体积海洋模式(Finite Volume Community Ocean Model, FVCOM)^[20],构建了珠江河口三维斜压数值模型,对珠江口的咸潮上溯过程进行了研究分析。FVCOM模式是美国麻省大学陈长胜及其团队开发的近岸海洋数值模式,模式采用无结构三角网格,可以很好地拟合复杂岸线,引入潮滩动边界处理,在河口及潮滩区域更为适用,目前已经被越来越多的学者用于近岸海洋数值模拟研究^[21]。

本文中模型的计算范围包括整个珠江口海域。网格上游到达西江的马口、北江的三水、东江的博罗、增江的麒麟咀、潭江的石咀和流溪河的老鸦岗,下游至20°N线。计算网格共包含了346 213个三角形单元,193 292个网格节点。本文对重点研究区域磨刀门和伶仃洋航道进行了加密,网河区最高分辨率可达40 m,外海开边界处分辨率约为10 km。珠江河口网的水下地形大部分由广东省水文局1999年

大规模观测所得,部分地形采用了2004年的重测值;珠江河口口门外的水下地形来自珠江水利科学研究院提供的实测数据和海图数据;外海水深来自于ETOPO1资料(网址:<https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/global.html>)。我们对多套数据进行处理、转换和整合后,最终得到分辨率较高且覆盖较为全面的地形数据,满足了模式建立需要。本文的研究区域磨刀门和伶仃洋海域水深总体较浅,在5~6 m之间,模式在垂向分层上设置为均匀的10层,外模计算时间步长取为0.1 s,内模取为1 s,采用斜压模式计算。

模式的上游开边界设置了6条河流,分别是西江(马口)、东江(博罗)、北江(三水)、潭江(石咀)、流溪河(老鸦岗)和增江(麒麟咀)。这6条主要河流的径流流量数据为6 h一次的实测值,图1为2006年整年的流量时间序列。模式外海开边界采用了水位驱动,使用8个主要分潮(M2、S2、N2、K2、K1、O1、P1和Q1)的调和常数计算得到水位,调和常数来源于李培良等^[22]在南海的研究结果。

本文主要模拟咸潮上溯和冲淡水,所以温度场设为统一的常数。模式中外海海域的初始盐度场来源于南海海洋图集的多年月均资料^[23],珠江口海域采用遥感反演得到的大面盐度资料^[24],近岸海域的盐度使用站点观测资料进行修订。垂向其他各层的盐度场根据实测资料中垂向盐度分布比例插值得到。总体上来说,初始盐度场较好地体现出伶仃洋海域东高西低的盐度分布特征,以及表层低底层高的垂向梯度特征。

风在直接改变河口表层流场的同时,也会对河口盐度和泥沙等物质的垂向混合造成影响。珠江河口素有“北风刮,咸水来”的说法,因此,风是影响珠江河口的一个重要的动力因子。本文的风场采用美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)的全球月均风场。

模式验证详见Chen等^[25],水位模拟值与实测值的均方根误差为0.07 cm,流速模拟值与实测值的均方根误差为0.15 m/s,盐度模拟值与实测值的均方根误差为1.62 PSU。本文所建立的珠江河口高精度三维数值模式对水位、流速、流量和盐度等都有较高的模拟精度。

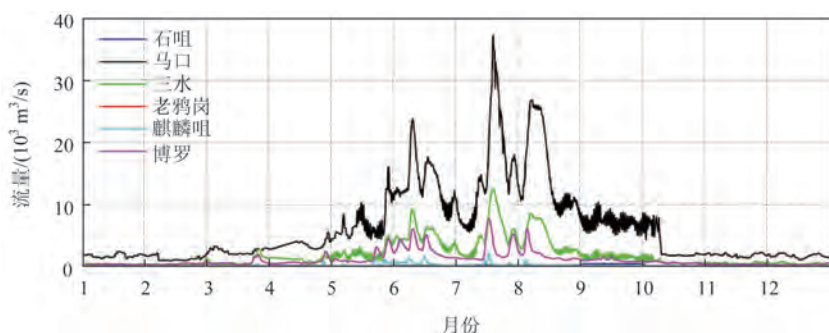


图1 2006年上游边界处6 h一次实测径流流量曲线

3 珠江河口枯季咸潮上溯特征

本文选取2005年枯季(“051”)这个较为典型的时期,对该时间内珠江河口的咸潮上溯过程进行模拟,通过实测资料和模拟结果分析磨刀门和伶仃洋咸潮上溯的特征。本文模拟的时间段为2005年1月18日9时(北京时,下同)—2005年2月3日23时,共计16 d。

3.1 磨刀门海域咸潮上溯特征

3.1.1 磨刀门海域盐度时间分布特征

图2为磨刀门区域挂定角和竹排沙测站表底层盐度以及水位的时间序列过程。从图2a可以看出,在观测期间,挂定角测站表层最大盐度值出现在小潮之后的中潮期间,中潮到大潮盐度逐步降低,大

潮后1~2 d盐度又出现了较大的值,从峰值到中潮期盐度逐步降低,而中潮到小潮期间盐度逐步增大。挂定角底层盐度和表层有着相似规律,盐度最大值也出现在小潮之后的中潮期间,出现时间比表层提前1 d左右,之后盐度逐步降低,大潮期间盐度开始增大,大潮后约2 d盐度达到第二高的峰值,之后盐度迅速降低,中潮后盐度又开始增大。从挂定角水位时间序列可以看出(见图2b),小潮至中潮期间出现了几乎连续的16 h的涨潮历时,而落潮历时9 h左右,连续的涨潮完成了小潮蓄咸的过程,中潮潮汐动力加强、径流量减小再加上异重流的共同作用,推动了蓄积的咸水上溯。随着潮汐动力进一步加强,咸淡水混合加强,大潮后盐度随着落潮流排出河道。在竹排沙测站,也可以发现相同的规律。从盐度与水位曲线可以看出,两者存在一定的正相关关系,涨潮时盐度增加,落潮时盐度减小。李春

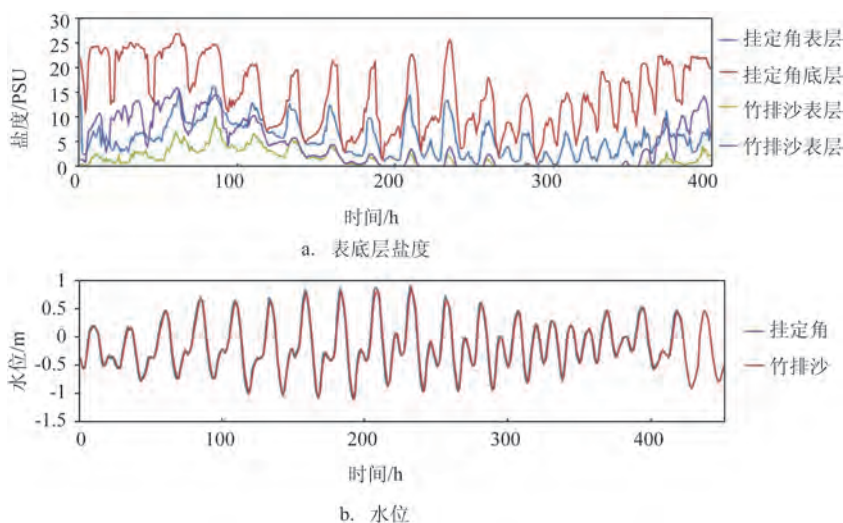


图2 挂定角和竹排沙测站盐度和水位时间序列

初^[26]把咸潮活动归纳为3个循环,大循环:枯水期蓄咸,丰水期排咸;中循环:小潮蓄咸,大潮排咸;小循环:涨潮蓄咸,落潮排咸,上述分析反映出了中循环和小循环的盐度变化规律。

两个测站的资料表明,磨刀门水道的盐度大部分为不规则半日周期变化,小潮后的中潮期出现不规则全日周期变化,此时盐度出现了半月周期中的最大值。盐度在1 d的潮周期内会发生较大变化,挂定角表层盐度能在7 h内从2 PSU上升到15 PSU,底层盐度在24 h内从21 PSU下降到1 PSU后再增长到23 PSU。

3.1.2 磨刀门海域盐度空间分布特征

为了分析磨刀门盐度的空间分布特征,本文计算了大中小潮期间磨刀门涨落憩时刻的表底层盐度场,篇幅所限,文中仅列出中潮期间表底层盐度场分布图(见图3)。

小潮期间(图略),从表层来看,涨憩时刻磨刀门外等值线比较密集,在拦门沙附近有一个30 PSU的高盐度区,口门处盐度达到24 PSU,水道内盐度整体较高,口门处向上游逐步减小,10 PSU等盐度线的前端到达灯笼山附近。洪湾水道整体盐度也比较高,与磨刀门水道汇合处达到16 PSU。鸡啼门附近盐度呈东高西低分布,盐度梯度较大。表层落憩时刻,磨刀门和鸡啼门外盐度有所降低且等值线变稀疏,磨刀门外拦门沙附近存在一个高盐区,但盐度低于涨憩时刻。口门处盐度约为26 PSU,向上游方向递减。底层涨憩时刻,口门外的冲淡水基本被高盐水代替,整体盐度较高,形成细长的上溯锋,口门处盐度接近30 PSU,等值线密集,25 PSU等盐度线可以深入到磨刀门水道内,10 PSU等值线的前端到达竹排沙测站附近。落憩时刻,高盐水有所回落,口门处盐度为26 PSU。从表底层盐度对比可以发现,磨刀门水道表底层盐度差异较大,说明盐度的垂向分层很明显。

中潮期间,从表层来看,涨憩时刻口外盐度等值线密集(见图3a),拦门沙附近存在一个较高的盐度区域,东西两叉盐度较低,口门处盐度在16 PSU附近,越往上游越低,磨刀门水道整体盐度不高。表层落憩时刻(见图3b),口门外等盐度线整体向外推移,拦门沙附近盐度依然较高,上游来水主要从东西两叉流出磨刀门进入外海,磨刀门水道内可以

看到明显的向下游方向的细长盐度等值线。底层涨憩时刻(见图3c),口门处盐度为30 PSU左右,以楔状向上游入侵,6 PSU等盐度线到达竹排沙附近,同时在挂定角附近可以发现两个舌状的等值线,其中一个来自于磨刀门下游咸水的入侵,另一个来自于洪湾水道的高盐度水^[27]。底层落憩时刻(见图3d),在口门外东西两叉可以看到明显的冲淡水被拦门沙分为东西两团。挂定角处依然存在两个舌状的盐度等值线,这与洪湾水道盐度增大有关。表底层盐度差异较大,涨憩时刻的差异大于落憩时刻。

大潮期间表层涨落憩时刻的盐度分布与中潮类似,只是冲淡水向外海扩散的范围更大,但是在拦门沙附近依然存在着一个高盐度区且等值线密集。口门处盐度在16~18 PSU之间,2 PSU等值线能到达竹排沙,洪湾水道盐度依然较高,落憩时刻部分盐水进入磨刀门水道。底层涨憩时刻,口门外冲淡水被高盐水取代,口门处盐度达到30 PSU,往上游方向减小且等值线密集,4 PSU等盐度线可达竹排沙附近。落憩时刻,磨刀门冲淡水通过东西两叉流出磨刀门,其中西叉冲出的较多,这是因为潮汐从东南方向传来的缘故,拦门沙处依然维持较高盐度且等值线密集。洪湾水道落憩盐度小于涨憩,在挂定角处没有出现向上游的舌状等盐度线,没有多少盐水进入磨刀门。

3.2 伶仃洋海域咸潮上溯特征

3.2.1 伶仃洋海域盐度时间分布特征

图4为伶仃洋区域北端大虎测站和西侧横门测站的表底层盐度及水位时间序列。从图中可以看出,大虎测站和横门测站盐度的变化趋势与磨刀门基本一致,但也有自身的特点。大虎测站盐度最大值出现在小潮后的中潮期间,这与磨刀门一致。不一致的是,盐度值达到最大后开始降低,在下一个小潮时才重新开始增大,没有在大潮出现增大现象。横门测站的结果与磨刀门极为接近,盐度最大值出现在小潮后的中潮,之后盐度降低,大潮之后盐度又有所增大。这说明伶仃洋不同区域的盐度时间变化规律是不一致的,空间分布存在差异。

3.2.2 伶仃洋海域盐度空间分布特征

为了分析伶仃洋海域的盐度空间分布特征,本

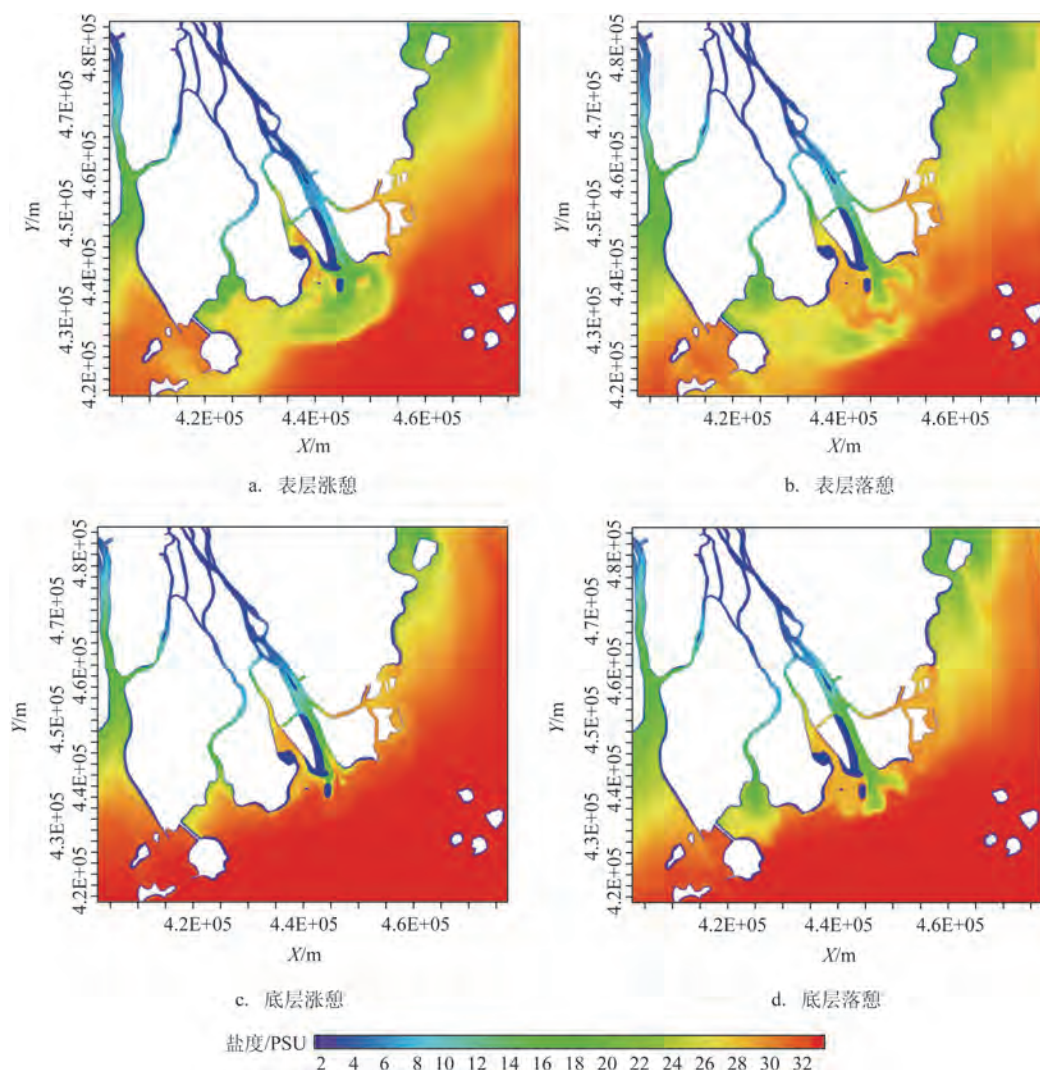


图3 磨刀门中潮表层和底层涨憩落憩盐度场

文计算了大潮(图略)、中潮(见图5)和小潮(图略)期间伶仃洋涨落憩时刻的表底层盐度场,本模型很好地刻画了伶仃洋海域东高西低的整体盐度分布特征。

小潮期间,表层涨憩时刻,30 PSU等盐度线可到达赤湾测站以北区域,主要沿着东部深槽上溯,洪奇门冲下来的淡水使得淇澳岛东侧的等盐度线发生向南的突变,整体上右侧等值线稀疏,左侧等值线密集。表层落憩时刻,等盐度线整体下移,淇澳岛东侧的等值线向下游扩展明显。底层盐度整体还是东高西低的分布,不同于表层的是,底层西侧深槽和淇澳岛东侧海域出现了向上游方向的尖状细长入侵锋,这说明伶仃洋海域的咸水大部分是

从底层沿着西侧深槽向上游方向入侵的,淡水从表层流出。

中潮涨憩时刻,表层盐度分布与小潮类似(见图5a),只是淇澳岛附近盐度等值线较为平滑。表层落憩时刻(见图5b),整体盐度等值线下移的同时,淇澳岛附近26~28 PSU的盐度等值线出现明显的南扩,到达了香港西侧海域。底层涨落憩盐度场与小潮基本相同(见图5c—d),盐水主要通过西侧深槽入侵,盐度等值线较小潮期有所南移,高盐度水团主要分布在东西两侧的深槽。

大潮期间,表底层涨落憩盐度场分布与中潮期类似,但是表层等盐度线比中潮期偏北,底层等盐度线比中潮期偏南,伶仃洋区域大潮期间表底层盐

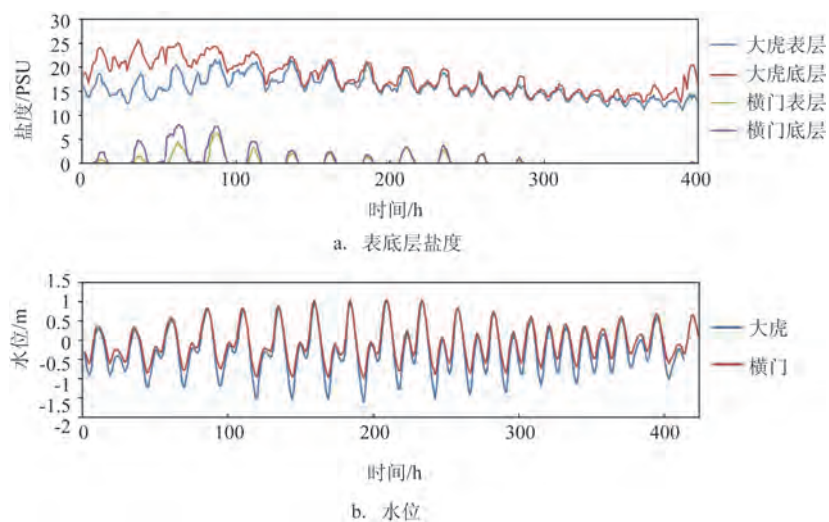


图4 大虎和横门测站表底层盐度和水位时间序列

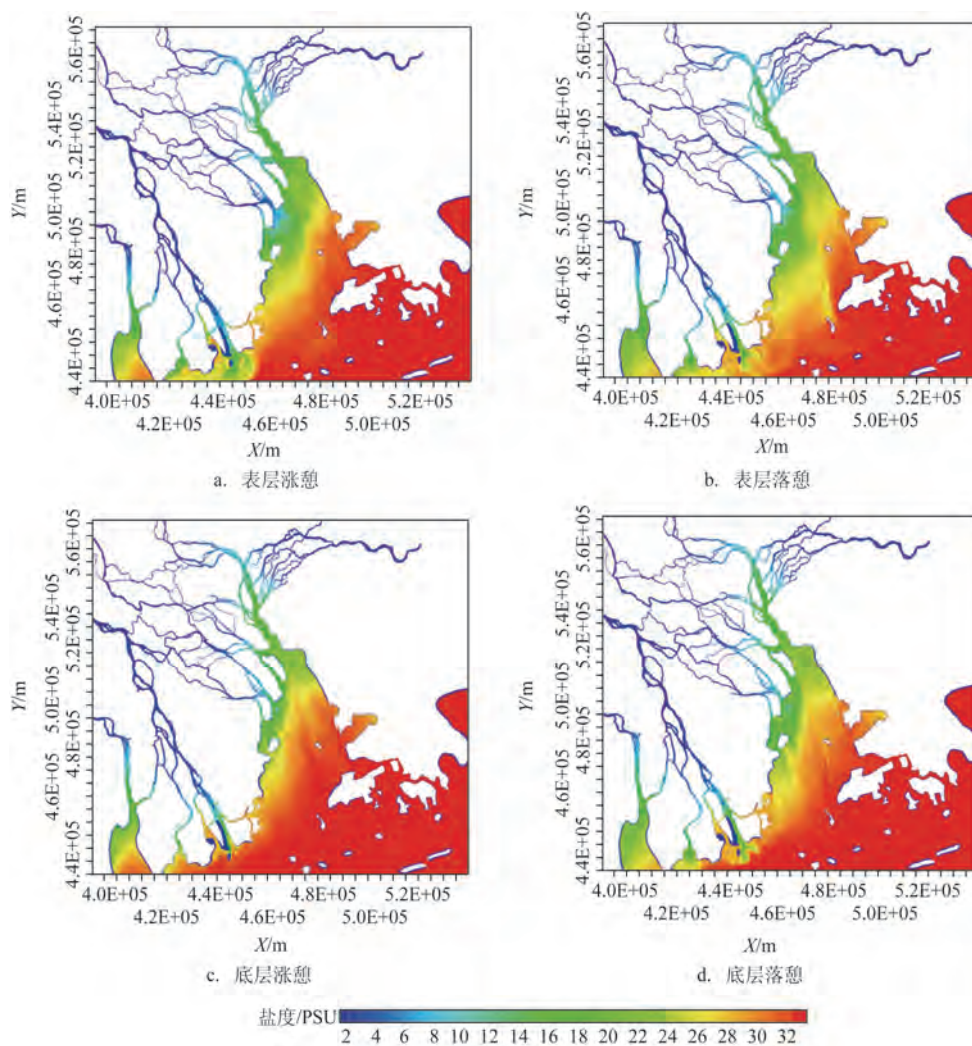


图5 伶仃洋中潮表层和底层涨憩落憩盐度场

度差异大于中潮期间。

4 动力机制分析

本文把珠江河口以及河网地区作为整体进行数值模拟,能够更真实地反应各个河口区域的咸潮上溯情况。我们重点研究磨刀门和伶仃洋的咸潮上溯特征,并针对这两个海域分别选取一个断面进行分析。图6为磨刀门和伶仃洋断面余流分布图。从图6a可以发现,磨刀门断面大部分区域的余流都是指向外海方向,尤其是在上游河道内,表底层余流都是往外海方向,这是因为磨刀门水道径流量较大,为径优型河口。但是在磨刀门断面拦门沙(见图6a中箭头位置)处,两侧底层的余流是往河道上游方向,这是因为海水在潮汐涨潮作用下进入拦门沙内侧后,在落潮时受到拦门沙影响,向外海的流动受阻,海水蓄积在拦门沙内侧,这也是拦门沙附近盐度较高的原因。图6b为伶仃洋断面余流分布图,从图中可以看出,表层余流基本指向外海方向,底层余流基本指向上游河道方向,只是在伶仃洋的顶端(虎门口的位置)表底层余流指向外海方向。伶仃洋区域的余流存在着一个明显的表层向海底

层向陆的河口环流模式。在珠江河口,咸潮上溯主要通过底层入侵河道,而淡水主要通过表层流出外海。

通过磨刀门海域大中小潮期间盐度分布分析结果可知,磨刀门水道表底层盐度差异较大,盐度分层明显。“051”小潮到大潮期间,磨刀门水道咸潮上溯最强烈的时间是小潮后的中潮期间,造成这种现象的原因有两个:一是在中潮期间,底层洪湾水道高盐度水进入磨刀门,使得磨刀门挂定角测站附近出现了两个向上游方向凸起的盐度等值线;二是涨落潮历时的变化,小潮期间涨潮和落潮平均历时分别为13 h和11 h;中潮期间涨潮和落潮平均历时分别为15 h和10 h;大潮期间涨潮和落潮平均历时分别为11 h和13 h。珠江河口是不正规半日潮河口,日不等现象显著,大潮至小潮期一天两涨两落现象逐渐明显,而小潮至大潮之间的中潮期是日不等现象最显著的时候,小潮后的中潮期间出现了涨潮历时明显大于落潮历时的现象,从而导致中潮期咸潮上溯距离增加。

从伶仃洋海域大中小潮盐度分布结果可知,伶仃洋整体盐度呈现东高西低的分布特征,30 PSU等盐度线可到赤湾测站以北的区域,主要沿着东部深

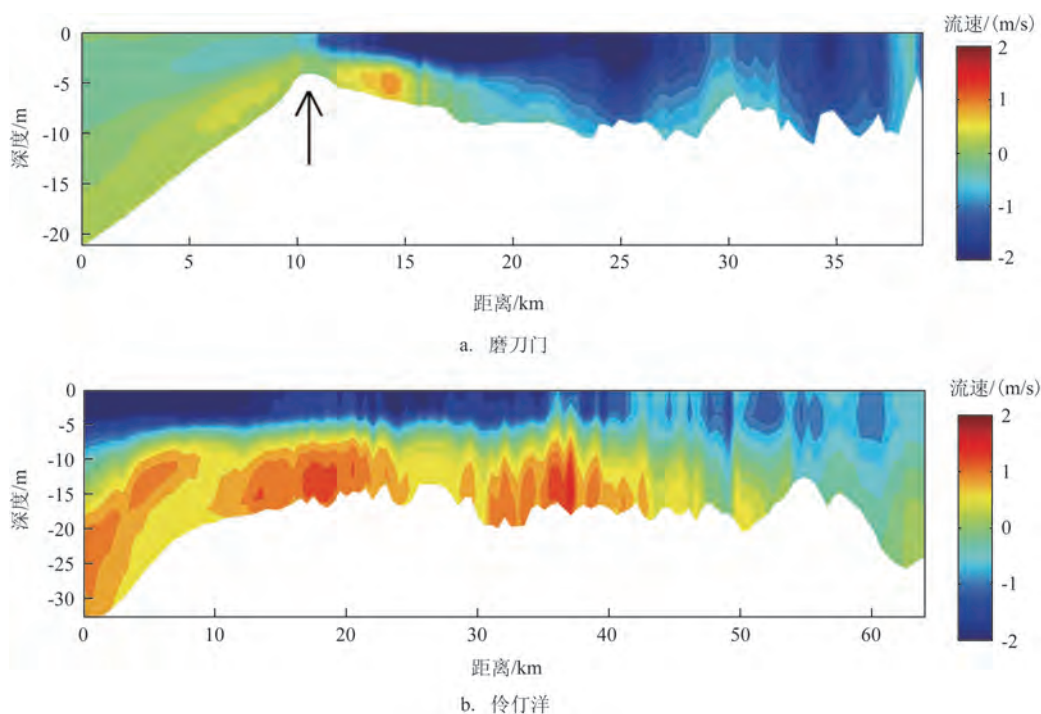


图6 12月份断面余流图(左侧为外海方向,负值指向外海,正值指向上游)

槽上溯,盐度分层现象也较为明显。高盐度区域主要位于伶仃洋东部的深水区域,高盐度锋面由南指向北;低盐度水团主要位于伶仃洋西侧浅滩区域,低盐度锋面由北指向南,这与邹华志^[28]的研究结论一致。这一分布特征主要受到4个因素影响:(1)伶仃洋区域的水下地形东深西浅,高盐度水团在潮汐动力的作用下更容易从东侧的深水区域上溯;(2)向伶仃洋注入淡水的口门都分布在伶仃洋西侧;(3)表层低盐水海水受到科氏力的作用,存在着向西偏的趋势;(4)在枯水期北风的作用下,表层低盐度水也存在着向西输移的趋势。

5 小结

本文以珠江河口磨刀门和伶仃洋为代表,通过实测资料分析和数值模拟相结合的方法,对珠江河口枯季咸潮上溯特征和机制进行系统的研究分析,得到的主要结论如下:

(1)在整个珠江河口,咸潮上溯主要通过底层入侵河道,而淡水主要通过表层流出外海。

(2)磨刀门水道口门处,由于拦门沙的存在,附近海域往往盐度较高。小潮之后的中潮期间磨刀门出现咸潮上溯最大值,这是因为在中潮期间,底层洪湾水道有高盐度水进入磨刀门,而且出现了涨潮历时明显大于落潮历时的现象。

(3)伶仃洋整体盐度呈现东高西低的分布特征,盐度分层现象较为明显,这主要与伶仃洋水下地形东深西浅以及注入淡水的口门分布在西侧有关,同时,表层的低盐度水在科氏力和北风的作用下向西偏趋势,所以高盐度区域主要位于伶仃洋东部的深水区域,高盐度锋面由南指向北,低盐度水团主要位于伶仃洋西侧浅滩区域,低盐度锋面由北至向南。

参考文献:

- [1] Chen X, Zong Y. Major impacts of sea-level rise on agriculture in the Yangtze delta area around Shanghai[J]. *Applied Geography*, 1999, 19(1): 69-84.
- [2] Uncles R J, Stephens J A, Murphy R J. Aircraft and sea-truth observations of a small-scale estuarine intrusion front[J]. *Journal of Marine Systems*, 1997, 12(1/4): 199-219.
- [3] 韩乃斌. 长江口南支河段氯度变化分析[J]. *水利水运科学研究*, 1983(1): 74-81.
- [4] 徐建益, 袁建忠. 长江口南支河段盐水入侵规律的研究[J]. *水文*, 1994, 83(5): 1-6, 63.
- [5] 沈焕庭, 茅志昌, 朱建荣. 长江河口盐水入侵[M]. 北京: 海洋出版社, 2003.
- [6] 朱建荣, 吴辉, 李路, 等. 极端干旱水文年(2006)中长江河口的盐水入侵[J]. *华东师范大学学报(自然科学版)*, 2010(4): 1-6, 25.
- [7] Wu H, Zhu J R, Chen B R, et al. Quantitative relationship of runoff and tide to saltwater spilling over from the North Branch in the Changjiang Estuary: A numerical study[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2006, 69(1-2): 125-132.
- [8] Li L, Zhu J R, Wu H, et al. A numerical study on water diversion ratio of the Changjiang (Yangtze) estuary in dry season[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2010, 28(3): 700-712.
- [9] Chen B R, Zhu J R, Fu L H. Formation mechanism of freshwater zone around the Meimao Sandbank in the Changjiang estuary[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2010, 28(6): 1329-1339.
- [10] 朱建荣, 傅利辉, 吴辉. 风应力和科氏力对长江河口没冒沙淡水带的影响[J]. *华东师范大学学报(自然科学版)*, 2008, 39(6): 1-8, 39.
- [11] 项印玉, 朱建荣, 吴辉. 冬季陆架环流对长江河口盐水入侵的影响[J]. *自然科学进展*, 2009, 19(2): 192-202.
- [12] Wu H, Zhu J R, Choi B H. Links between saltwater intrusion and subtidal circulation in the Changjiang Estuary: A model-guided study[J]. *Continental Shelf Research*, 2010, 30(17): 1891-1905.
- [13] 宋晓飞, 石荣贵, 孙羚晏, 等. 珠江口磨刀门盐水入侵的现状与成因分析[J]. *海洋通报*, 2014, 33(1): 7-15.
- [14] 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, 134.
- [15] 高时友, 陈子燊. 珠江口磨刀门水道枯季咸潮上溯与盐度输运机理分析[J]. *海洋通报*, 2016, 35(6): 625-631.
- [16] 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.
- [17] 刘祖发, 张泳华, 陈晓越, 等. 数值分析径流变化对磨刀门咸潮上溯的影响[J]. *亚热带资源与环境学报*, 2017, 12(4): 30-38.
- [18] 陈文龙, 邹华志, 董延军. 磨刀门水道咸潮上溯动力特性分析[J]. *水科学进展*, 2014, 25(5): 713-723.
- [19] 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.
- [20] Chen C S, Liu H D, Beardsley R C. An unstructured grid, finite-volume, three-dimensional, primitive equations ocean model: application to coastal ocean and estuaries[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2003, 20(1): 159-186.
- [21] 陈钰祥, 黎小国, 佟飞, 等. 广东惠州东山海人工鱼礁对附近海域潮汐动力影响研究[J]. *南方水产科学*, 2018, 14(6): 17-26.
- [22] 李培良, 左军成, 李磊, 等. 南海 TOPEX/POSEIDON 高度计资料的正交响应法潮汐分析[J]. *海洋与湖沼*, 2002, 33(3): 287-295.
- [23] 海洋图集编委会. 南海海洋图集(水文)[M]. 北京: 海洋出版社, 2006: 13-168.
- [24] 丁晓英, 余顺超. 基于遥感的珠江口表层盐度监测研究[J]. *遥感*

- 信息, 2014, 29(5): 96-100.
- [25] Chen Y X, Zuo J C, Zou H Z, et al. Responses of estuarine salinity and transport processes to sea level rise in the Zhujiang (Pearl River) Estuary[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2016, 35(5): 38-48.
- [26] 李春初. 珠江河口咸潮问题之我见[J]. *热带地理*, 2013, 33(4): 496-499.
- [27] Wang B, Zhu J R, Wu H, et al. Dynamics of saltwater intrusion in the modaomen waterway of the pearl river estuary[J]. *Science China Earth Sciences*, 2012, 55(11): 1901-1918.
- [28] 邹华志. 河网、河口及海岸整体联解数值模式及其在珠江口咸潮上溯研究的应用[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010: 1-200.

Analysis on the characteristics and mechanism of saltwater intrusion in the dry season in the Pearl River Estuary

ZHANG Min^{1,2}, CHEN Yu-xiang³, LUO Jun^{1,2}, ZENG Xue-zhi^{1,2}

(1. South China Sea Prediction Center, State Oceanic Administration, Guangzhou 510310 China; 2. Key Laboratory of Marine Environmental Survey Technology and Application, Ministry of Natural Resources, Guangzhou 510310 China; 3. South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Guangzhou 510310 China)

Abstract: Taking the Modaomen and Lingdingyang as examples, this paper systematically studies and analyzes the characteristics and mechanisms of saltwater intrusion in the Pearl River Estuary in the dry season based on both measured data analysis and numerical simulation. The result shows that the saltwater invades the Pearl River Estuary mainly through the bottom, while the fresh water flows out to open seas through the surface. The maximum value of saltwater intrusion in Modaomen waterway occurs during the mid-tide after neap tide since the duration of flood tide is significantly greater than that of ebb tide during the middle tide. The salinity is higher in the East and lower in the west with strong stratification in the Lingdingyang. That is mainly related to the underwater topography of Lingdingyang area, which is deep in the east and shallow in the west and the entrances for fresh water injecting into Lingdingyang are distributed on the west. In addition, the surface water with low salinity tends to move westward under the Coriolis force. Therefore, the high-salinity area is located in the deep water area of eastern Lingdingyang and the low-salinity area is mainly located in the shoal area of western Lingdingyang.

Key words: Pearl River Estuary; saltwater intrusion; numerical simulation; mechanism