

磨刀门水道咸潮上溯动力特性分析

陈文龙^{1,2}, 邹华志^{1,2}, 董延军²

(1. 水利部珠江河口动力学及伴生过程调控重点实验室, 广东 广州 510611; 2. 珠江水利科学研究院, 广东 广州 510611)

摘要: 为研究磨刀门水道咸潮上溯的动力特性, 基于非结构网格海洋模型(Finite Volume Coastal Ocean Model, FV-COM), 构建了覆盖珠江河口及其上游网河区的高分辨率三维斜压数值模型, 采用实测资料对其进行率定和验证, 并开展了咸潮上溯的数值模拟计算。根据计算结果和实测资料, 对磨刀门水道大、中、小潮期间的盐淡水分层与混合特征、盐分物质的分层输移机制进行分析, 探讨其咸潮上溯强度时空分布差异的原因。结果表明: 小潮期, 底层累积盐通量明显大于表层, 净输移方向为陆向; 大潮期, 表层累积盐通量明显大于底层, 净输移方向为海向; 而平衡点一般出现于中潮期, 这就是磨刀门水道咸潮上溯最强和最弱时刻分别出现于小潮和大潮后的中潮期的原因所在。

关键词: 咸潮; 数值模拟; 珠江河口; 磨刀门水道; 动力特性

中图分类号: P731.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2014)05-0713-11

21世纪以来, 珠江河口咸潮上溯频发, 且有愈演愈烈之势, 广州、珠海、中山和澳门等地上千万居民的供水安全频频告急, 引起广泛关注, 诸多学者针对这一问题开展了大量研究。欧素英^[1]采用实测资料对珠江三角洲咸潮活动的空间差异性进行了分析, 指出珠江河口各口门的咸潮活动属于不同类型; 包芸和任杰^[2]、Zhou等^[3]结合实测资料和三维斜压数学模型, 对珠江河口盐度高度层化现象及其影响因素进行了阐述; 卢陈等^[4]采用水槽物理模型试验对潮汐强度与咸潮上溯距离间的关系开展了理论研究, 提出了咸潮上溯强度的临界潮差概念。磨刀门是珠江河口的八大口门之一, 其上游的磨刀门水道是沿岸城市的主要水源地, 也是珠江河口咸潮上溯最为严重的河道之一, 受水动力和地形影响, 其咸潮上溯规律有别于珠江河口的其他口门, 是近年来咸潮上溯问题研究的热点区域。陈水森等^[5]根据实测资料间的统计关系建立了磨刀门水道咸潮上溯的经验模型; Gong和Shen^[6]采用数值模型对磨刀门水道的咸潮上溯与径流量和潮差的响应关系进行了研究, 指出上游径流量是影响其咸潮上溯强度的关键因素; 任杰等^[7]基于Simpson方法和实测资料, 对磨刀门水道盐度混合与层化机制进行了探讨; 韩志远等^[8]基于不同年份地形和潮位资料的对比, 分析了磨刀门水道咸潮上溯加剧的原因; 陈荣力等^[9]、胡溪和毛献忠^[10]、Wang等^[11]分别依据实测资料和数值模拟结果对磨刀门水道的咸潮上溯规律进行了分析, 发现其咸潮上溯过程具有明显的半月周期变化, 且咸潮上溯最强时刻出现于小潮后的中潮期。

河口区的盐淡水混合与输移是一个极其复杂的过程, 与河口形态和水下地形息息相关, 同时受径流、潮汐、波浪、风和沿岸流等多种动力因素的耦合作用, 存在着重力环流、对流、扩散和卷吸等多种输移形式。受观测资料和研究方法限制, 上述成果多为对磨刀门水道盐淡水混合、层化特征和咸潮上溯规律与影响因素的研究, 相应的机理研究偏少, 其咸潮上溯半月周期变化规律的动力学机制尚不非常明确。鉴于此, 本文将结合高度分层的实测资料和数值模型计算成果, 探讨磨刀门水道咸潮上溯半月周期变化规律的动力学机制, 解释磨刀门水道咸潮上溯最强和最弱时刻分别出现于小潮和大潮后的中潮期的原因, 这对科学地确定磨刀门水道的最佳抑咸时机具有重要的意义。

收稿日期: 2014-03-04; **网络出版时间:** 2014-08-06

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20140806.0837.018.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51409286); 水利部公益性行业科研专项经费资助项目(201301073)

作者简介: 陈文龙(1977—), 男, 福建龙岩人, 高级工程师, 主要从事河口动力学研究。E-mail: 48708209@qq.com

1 研究区域概况及观测资料

1.1 磨刀门水道概况

磨刀门为珠江河口八大口门之一,上游连接西江干流(磨刀门水道),是西江的主要出海通道,径流作用较强,属径流型河口,山潮比达6.22,多年平均净泄量为3 280亿 m^3 ,占珠江河口总量的26.6%,居八大口门之首。磨刀门径流量年内分配极不均匀,汛期4~9月约占75.7%,枯水期约占24.3%,其中最丰月与最枯月的净泄量分别占全年净泄量的16.73%和2.36%。珠江河口潮汐为不正规半日混合潮型,一天中有两涨两落,口门以外,潮位过程基本呈对称型;口门以内,无论洪季还是枯季,落潮历时均大于涨潮历时,越往上游此现象越明显。根据资料统计,磨刀门水道灯笼山站多年平均涨潮历时为5 h 22 min,落潮历时为7 h 15 min;潮差自口门向上游呈递减趋势,灯笼山站多年平均涨潮和落潮潮差都为0.85 m。磨刀门水道地形呈一主一支格局出海,主干为磨刀门水道,于横洲口入南海,支流洪湾水道向东延伸至马骝洲,经澳门水道入伶仃洋(图1)。其中,磨刀门水道较为顺直,宽约2 200 m,出口段河道主槽位于河道东侧,水深8~12 m;河道西侧为浅滩,水深不足1 m;磨刀门口外分布有不规则拦门沙,其顶部最小水深不足2 m,将磨刀门水道出海深槽分为东、西两汉。洪湾水道断面较为规整,宽约450 m,主槽深约5 m。磨刀门水道沿程分布有众多水厂和取水口,是重要的水源地,枯季常受咸潮影响。

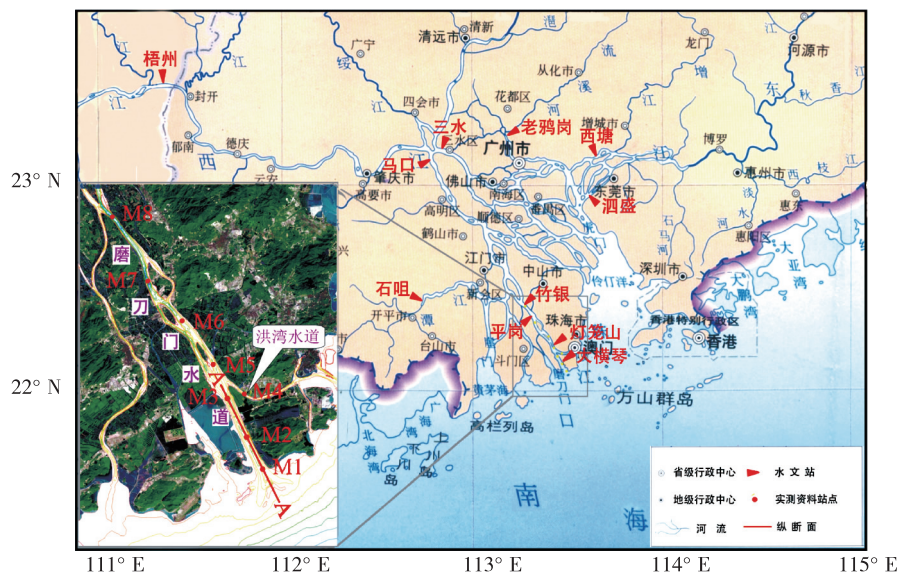


图1 珠江河口水系及磨刀门水道地形

Fig. 1 Map of the Pearl River Estuary and bathymetric of the Modaomen Waterway

1.2 观测资料

2009年12月,珠江水利科学研究院开展了一次规模较大的咸潮原型观测,观测时段为12月10日15:00~12月25日15:00,共布设了8条测量垂线(图1, M1~M8),观测内容包括盐度、流速、流向、风速和风向,其中流速、流向和盐度的垂向测量密度为每隔1 m测量一个数据,垂向分层数为8~12层,获得了为期半个月的逐时资料。本次观测主要针对磨刀门水道咸潮上溯问题,具有以下几个特点:①观测时间长,达到了15 d的半月潮周期;②观测频率高,每隔1 h测录一次数据;③测点位置布置合理,兼顾了磨刀门水道和洪湾水道,覆盖了磨刀门水道咸潮活动的主要范围;④垂向分层数较多,达到8~12层。因此,本次测量数据具有非常好的代表性,既能反映磨刀门水道咸潮上溯的日周期和半月潮周期变化规律,又能体现密度分层流垂向动力结构特征。

另外, 本文还收集了2005年末到2006年初梧州流量、平岗含氯度和竹银潮位的同步资料(图2)。

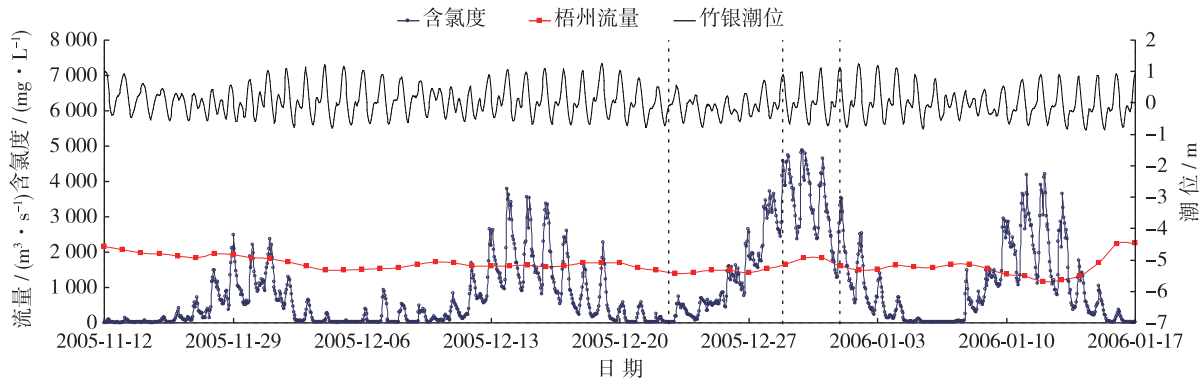


图2 平岗垂线平均盐度和竹银潮位时间序列对比

Fig. 2 Time series of depth averaged salinity and tide at Pinggang and Zhuyin

2 数值模型构建

珠江河口是典型的多汊河口, 且各口门动力特性不尽一致, 上游河网密布, 河道纵横贯通; 河口及其近岸水域, 岛屿众多, 岸线曲折, 水下地形复杂, 具有明显的密度分层流的特征。为了准确模拟珠江河口咸潮上溯的动力过程, 基于非结构网格海洋模型(Finite Volume Coastal Ocean Model, FVCOM)(模型具体情况可参考其用户手册), 本文构建了高分辨率的珠江河口三维斜压数值模型。

2.1 模型范围

模型计算网格如图3所示, 范围覆盖了整个珠江三角洲主要河道、河口湾及近海水域, 模型上游河流边界分别为石咀、马口、三水、老鸦岗、西塘和泗盛水文站(图1), 外海开边界取至约300 m等深线附近, 整个计算范围东西方向长约400 km, 南北方向宽约340 km。根据水下地形变化趋势和岸线走势, 对磨刀门水道、航道和港池等水域的网格进行了局部加密与优化, 网格由疏到密均匀过渡, 体现了无结构三角形网格布置灵活的优点。整个计算网格的节点数为166 279个, 单元数为299 439个, 其中, 最小单元边长约为40 m, 最大单元边长约为20 km, 垂向分层为等距的11层。

2.2 计算条件

上游河流边界条件给定为实测的逐时流量资料; 外海潮汐边界条件由潮汐调和常数计算所得, 包括 M_2 、 S_2 、 N_2 、 K_2 、 K_1 、 P_1 、 O_1 和 Q_1 8个主要分潮。由于外海开边界位置距离河口足够远处, 基本不受冲淡水的影响, 盐度的边界条件给为定值。此外, 为了考虑风的影响, 模型输入还包括日平均风场。

模型水动力模块初始条件采用“冷启动”, 即水位初始值为平均水位, 流速初始值为0。盐度初始场对盐淡水分布计算影响较大, 且其为垂向分层的三维结构, 准确给出盐度初始场较为困难。近年来, 珠江水利科学研究院利用盐度与黄色物质呈负相关的关系, 构建了表层盐度遥感定量反演模型, 实践应用证实由此提取得到的珠江河口区表层盐度值具有较好的精度。因此, 本文将利用卫星遥感资料反演得到的表层盐度值, 结合垂线实测资料和珠江河口各层盐度分布的经验规律, 进行盐度的垂向插值, 从而得到计算所需的盐度初始场。这样给出的盐度初始场已经基本接近实际值, 盐度可以在较短的模型计算时间内达到平衡。为保险起见, 在本文的实际计算中, 模型先提前运行2个月, 取稳定后的计算结果进行分析。

2.3 模型验证

采用2009年12月的测量资料对本文所构建的数值模型进行了率定和验证。鉴于篇幅所限, 本文只列出了部分成果, 如图4~图6所示。可以看到, 模型计算结果与实测数据基本吻合, 大部分测站的计算流速、盐度过程与实测资料吻合较好。各测站中, M5测站的误差稍大, 小潮期表、底层的盐度值误差较为明显,

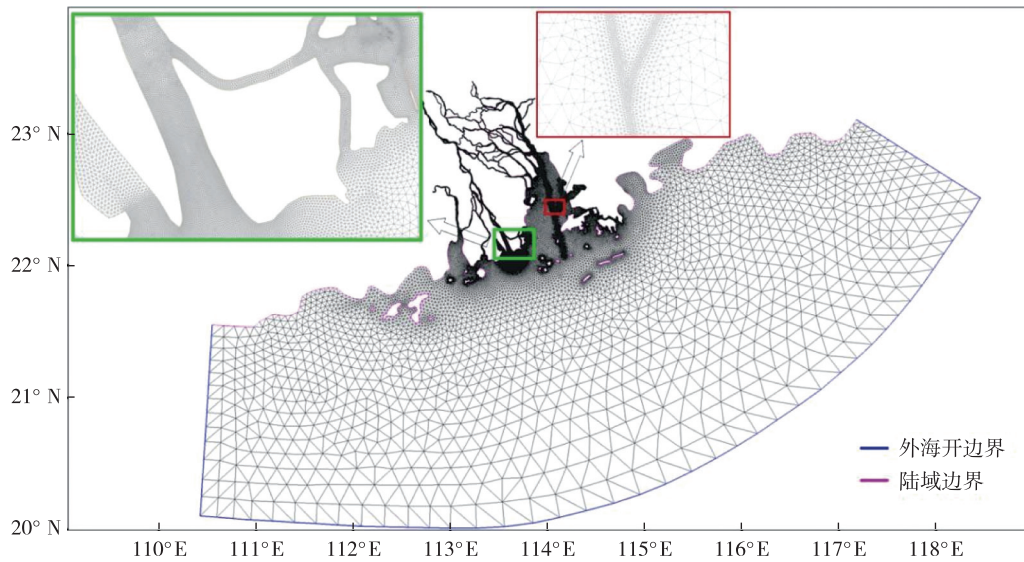


图3 模型计算网格

Fig. 3 Computational grids of the numerical model

但相位基本吻合。分析后得知，这是由于计算地形与水文资料时间不匹配的原因造成的，M5 测站上游东侧支流没有与实测资料时间匹配的水下地形，采用 1999 年的地形，而磨刀门水道其他水域采用的均为 2000 年实测地形。整体而言，模型计算结果很好地反演了磨刀门水道盐度分层和咸潮上溯的半月周期变化过程，本文所建立的数值模型能够较好地模拟河口咸潮上溯的动力过程。

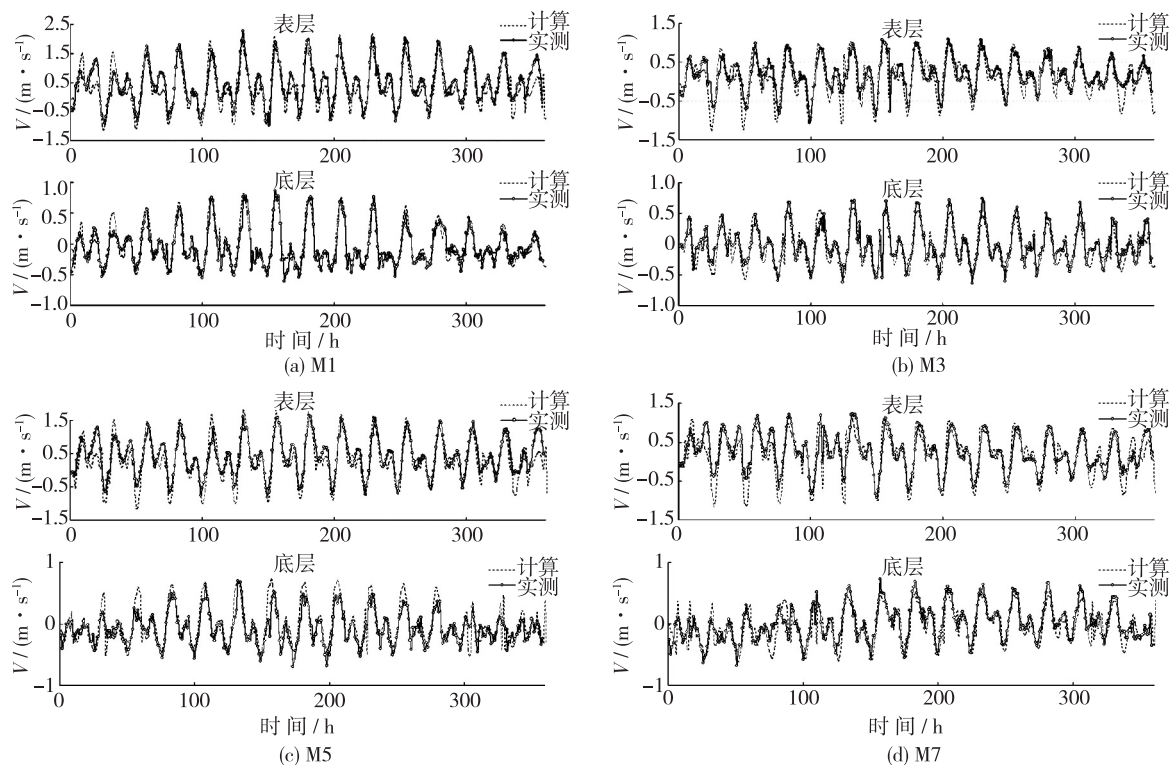


图4 垂线分层流速实测与计算结果对比(负值表示流向指向上游)

Fig. 4 Stratified velocity comparisons (Negative values means that the directions of currents are upstream ward)

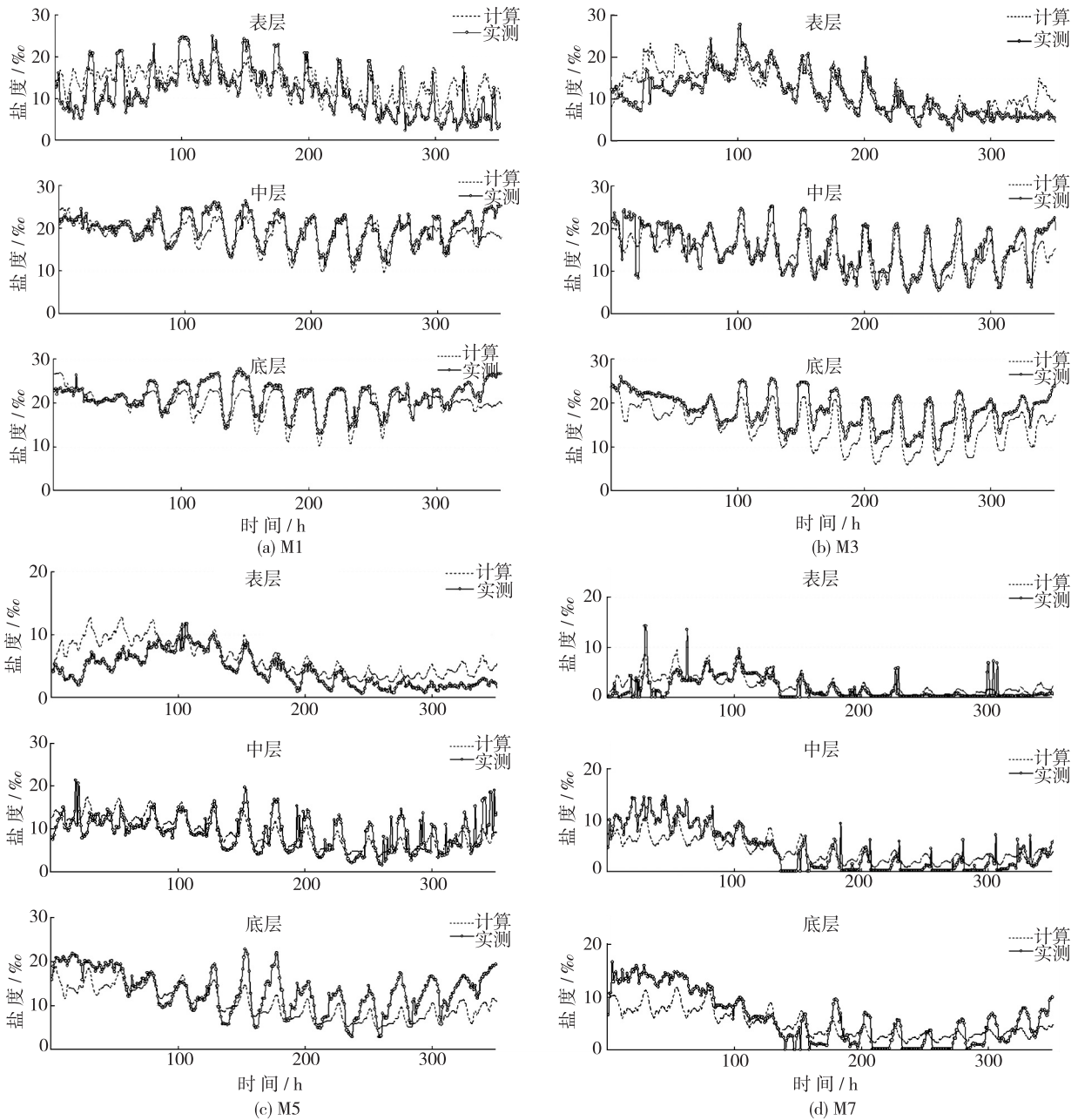


图 5 垂线分层盐度实测与计算结果对比

Fig. 5 Stratified salinity comparisons

3 结果分析

3.1 磨刀门水道咸潮上溯特征

珠江河口的潮汐为不正规半日混合潮型, 一天中有两涨两落, 半个月中有大潮汛和小潮汛, 历时各约 3 d。计算时段内, 磨刀门水道沿程的高潮位和低潮位都是上游高于下游, M8 与 M1 测站间的高潮位差约 0.10 m, 低潮位差约 0.17 m; 潮差则是下游大于上游, M8 与 M1 测站间差约 0.07 m。由图 2、图 5 和图 6 可知, 受潮汐影响, 磨刀门水道和洪湾水道沿程盐度都呈现出相应的日周期变化规律, 即 1 d 内盐度过程表现出两涨两落的特征, 盐度峰、谷值一般出现在涨憩、落憩附近时刻。

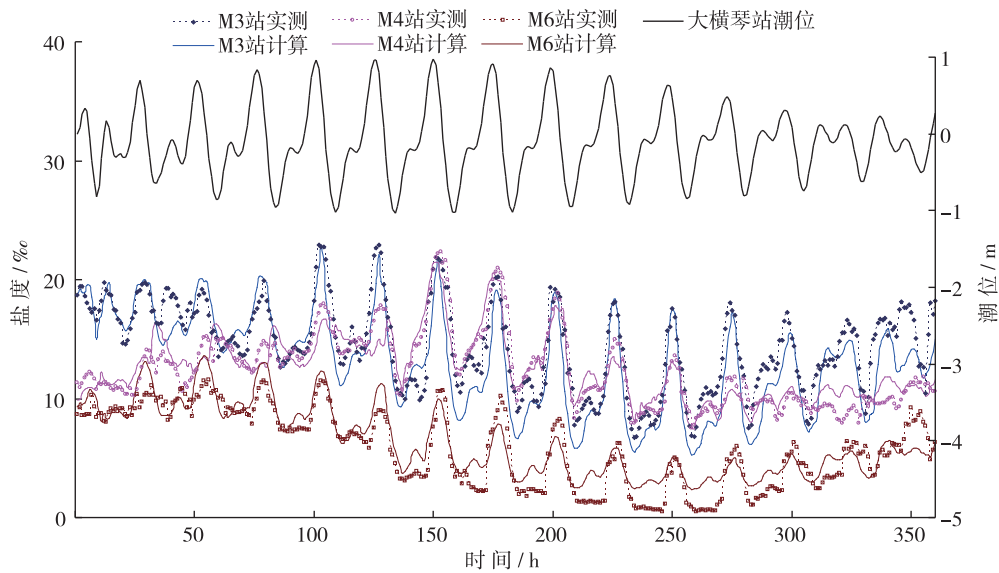


图6 M3、M4和M6站垂线平均盐度实测与计算结果对比

Fig. 6 Depth averaged salinity comparisons at station M3, M4 and M6

此外,上述各图显示其咸潮上溯过程还有较为明显的半月周期变化规律,这才是真正导致上游河道盐度长时间持续超标的原因所在。对比分析图6中垂线平均盐度过程可知,磨刀门水道和洪湾水道咸潮上溯的半月周期变化表现出不同的规律。洪湾水道咸潮上溯的半月周期变化与潮汐强度(潮差)具有很好的对应关系,即小潮期河道盐度值较小,随着潮差的增大,盐度值整体呈上升趋势,至大潮期达到峰值,而后盐度值又随着潮差的减小而整体下降,这与大多数河口的咸潮上溯过程相似,也符合常理。磨刀门水道咸潮上溯的半月周期变化规律则有着明显不同,不同时期的实测资料(图2、图6)均表现出同一个特殊现象:咸潮于小潮前1~2 d就开始上溯,口门内河道沿程盐度整体呈上升趋势,咸潮上溯最强的时段出现于小潮后的中潮期,而并非潮汐动力最强的大潮期;在大潮向小潮转换期间,盐度值整体均呈下降趋势,咸潮上溯最弱的时段出现于大潮后的中潮期。这与陈荣力等^[9]和Wang等^[11]根据2005—2007年连续3年的枯季实测资料统计得到的规律一致。

从盐度的垂向(图5、图6)和平面(图7、图8)分布来看,磨刀门水道主槽盐度值相对较高,高盐水主要通过主槽底部上溯,沿程表、底层盐度值在小潮期差别较大,且振幅较小,说明分层明显而稳定;大潮期虽然也存在分层现象,但振幅相对较大,分层不稳定,存在着分层—混合的交替转换过程。洪湾水道的情况

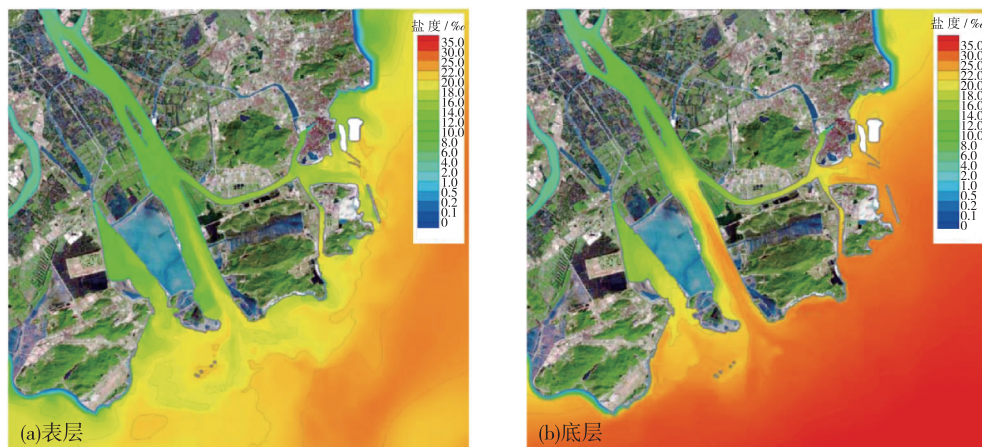


图7 涨憩时刻盐度平面分布

Fig. 7 Salinity distribution at end of flood

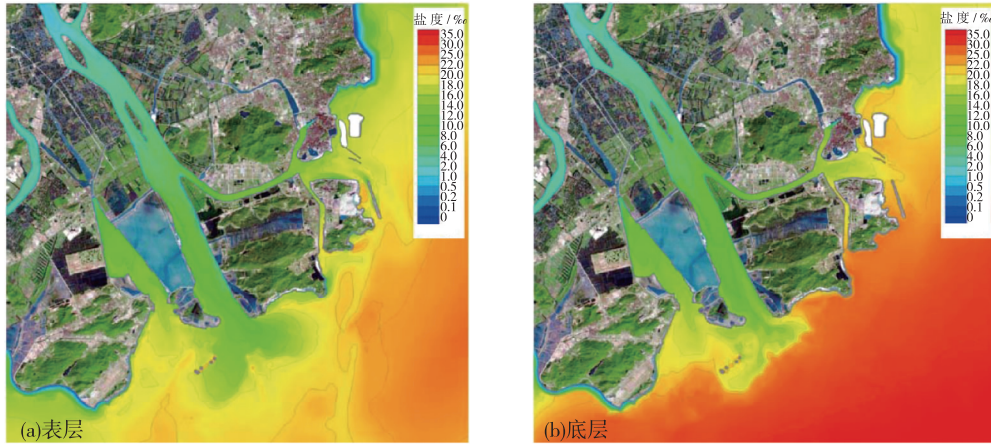


图 8 落憩时刻盐度平面分布

Fig. 8 Salinity distribution at end of ebb

则有所不同, 整个时段内表、底层的盐度值都较为接近, 垂向分层相对没那么明显, 盐度与潮差的时间序列具有较好的对应关系, 即盐度的振幅随潮差增大而增大。

3.2 磨刀门水道咸潮上溯动力机制分析

为进一步分析磨刀门水道咸潮上溯动力机制, 根据实测资料, 分别统计了小潮、中潮和大潮 3 个完整潮周期(统计时段如图 9 所示), M1~M6 测站的分层系数和广义单宽累积盐通量, 结果如表 1 所示。其中, 分层系数为统计时段内表、底层平均盐度差与垂线平均盐度的比值, 代表了统计时段内的平均分层状态; 广义单宽盐通量定义为: 流速×盐度值, 累积盐通量为统计时段内逐时广义单宽盐通量的累积和, 体现了垂线所在位置单宽水体的盐分物质输移量, 正值表示自河道上游向下游输移, 负值表示自河道下游向上游输移。根据数值模型计算结果, 绘制了特征时刻 A-A 断面的瞬时垂向盐度场, 各个时刻与潮汐的对应关系如图 9 中的 A~E 点所示, 分别为初涨、涨急、涨憩、落急和落憩时刻, 结果如图 10 所示。

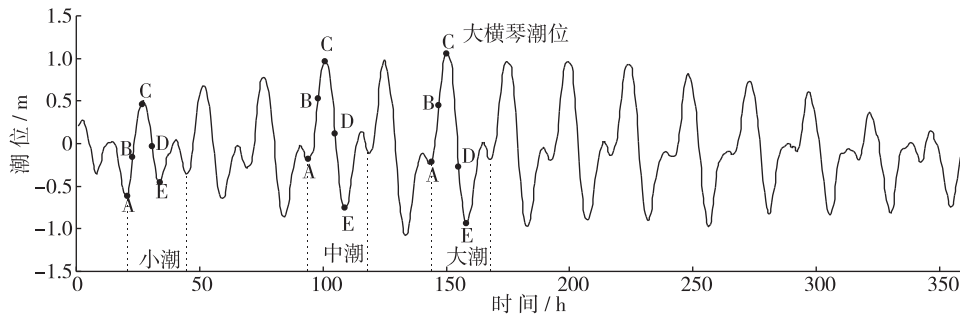


图 9 大横琴潮位过程

Fig. 9 Time series of tidal elevation at Dahengqin

3.2.1 盐淡水混合特征

小潮期统计时段内, 大横琴站的涨潮潮差为 1.08 m, 落潮潮差为 0.92 m, 潮汐动力相对较弱, 盐、淡水的混合动力也相对较弱, 不同时刻, A-A 断面盐度场的等值线趋势较为平缓, 沿程均出现了明显的盐度分层现象, 各测站的分层系数均较中潮和大潮期大。初涨时刻, 拦门沙外侧底层盐度开始增大, 最大盐度可达 30, 而表层盐度则较低; 在拦门沙内坡的底层位置, 存在一个高盐水团, 盐度值超过 20; 上游沿程, 盐度呈明显的垂向分层状态, 密度梯度几乎近似垂直, 盐度等值线间距相当, 垂向分层较为均匀且稳定。涨急时刻, 随着涨潮动力增强, 口外盐水楔越过拦门沙后沿着河道底层向上游推进, 上述时刻的高盐水团也随之向上游推进, 到达 M2 测站附近, 上层水体受其挤压作用, 盐度等值线间距变小, 形成明显的高、低盐水层界

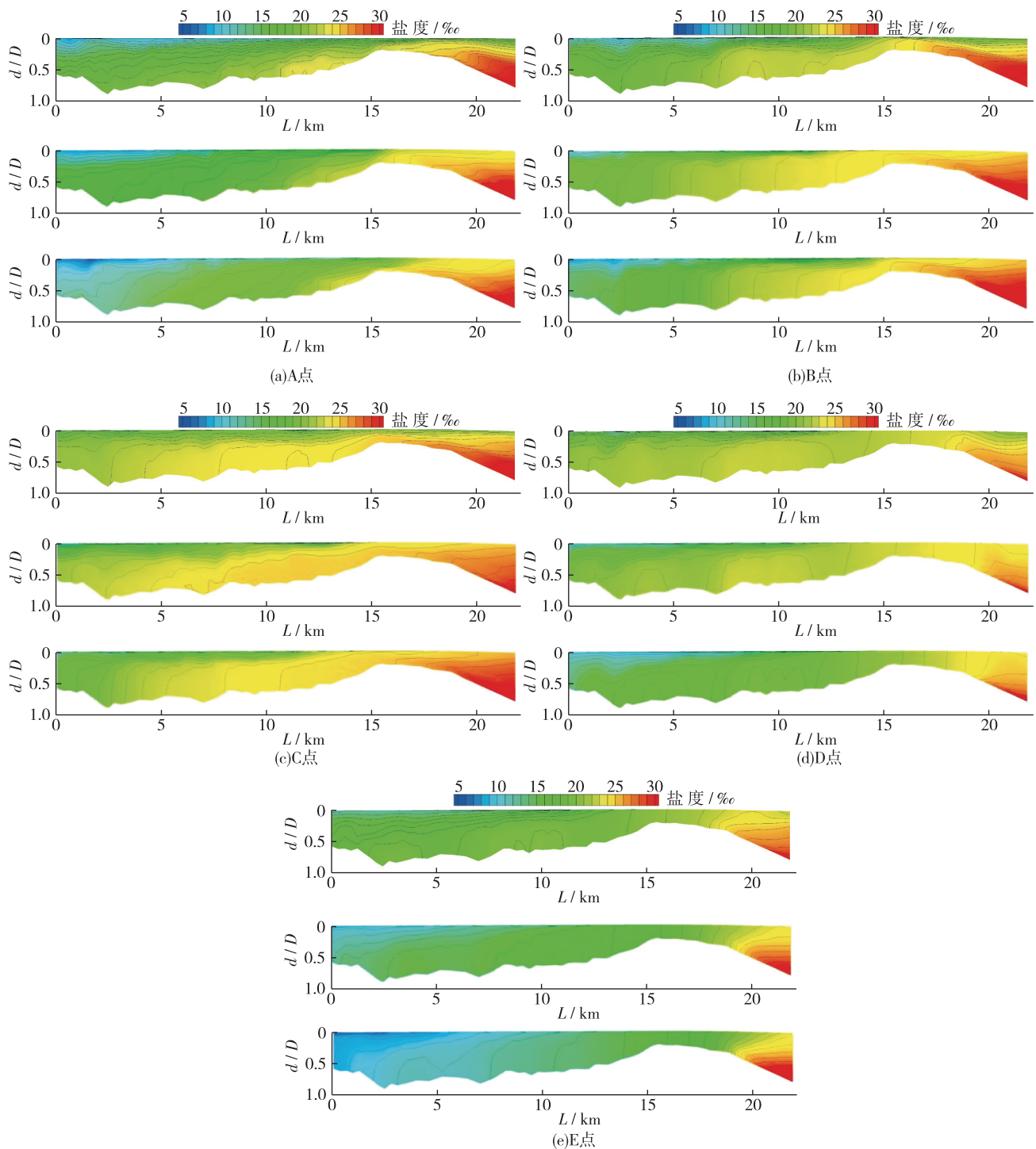


图 10 A-A 断面垂向盐度分布(各图分别对应图 9 中 A~E 点时刻, 自上而下: 小潮、中潮和大潮)

Fig. 10 Vertical salinity distribution of section A-A (corresponding to A-E of Fig. 9, from up: Neap, mid and spring tide)

面。涨憩时刻, 盐度达到峰值, A-A 断面范围内的底层盐度均高于 20, 部分河段盐度值甚至超过 25, 在惯性力的作用下, 底层水体仍然保持着指向上游的流速, 而表层水体已经开始显现出落潮流的趋势。落憩时刻, 盐水楔退出口外拦门沙, 拦门沙顶部混合较为均匀, 但在上游水道底层仍有盐度较高的水团存在, 一直保持至落憩时刻。

表 1 一个潮周期内垂线平均分层系数和单宽累积盐通量统计
Table 1 Stratification ratio and accumulative unit-volume of salinity during one tidal cycle

| 测站 | 潮型 | 垂线平均盐度/ ‰ | 分层系数 | 表层单宽累积 盐通量 Q_{ss} | 底层单宽累积 盐通量 Q_{sb} | 净通量 $Q_{ss}+Q_{sb}$ | 通量比值 (Q_{sb}/Q_{ss}) |
|----|-----|--------------|------|------------------------|------------------------|------------------------|-----------------------------|
| M1 | 小潮期 | 18.67 | 0.48 | 16.72 | -38.92 | -22.20 | 2.33 |
| | 中潮期 | 21.59 | 0.22 | 107.06 | -22.55 | 84.50 | 0.21 |
| | 大潮期 | 20.18 | 0.33 | 139.85 | -53.09 | 86.76 | 0.38 |
| M2 | 小潮期 | 17.79 | 0.62 | 62.40 | -66.56 | -4.16 | 1.07 |
| | 中潮期 | 19.57 | 0.35 | 47.83 | -16.51 | 31.33 | 0.35 |
| | 大潮期 | 18.57 | 0.61 | 135.32 | -68.23 | 67.08 | 0.50 |
| M3 | 小潮期 | 17.58 | 0.79 | 19.43 | -20.03 | -0.59 | 1.03 |
| | 中潮期 | 16.51 | 0.36 | 25.03 | -12.46 | 12.58 | 0.50 |
| | 大潮期 | 15.14 | 0.49 | 62.39 | -21.37 | 41.01 | 0.34 |
| M4 | 小潮期 | 12.25 | 0.43 | 11.08 | -12.13 | -1.05 | 1.09 |
| | 中潮期 | 15.13 | 0.10 | 12.29 | -9.51 | 2.78 | 0.77 |
| | 大潮期 | 16.71 | 0.24 | 48.97 | -29.25 | 19.71 | 0.60 |
| M5 | 小潮期 | 12.80 | 1.18 | 54.25 | -58.19 | -3.93 | 1.07 |
| | 中潮期 | 11.01 | 0.35 | 47.06 | -9.74 | 37.32 | 0.21 |
| | 大潮期 | 9.45 | 0.80 | 71.62 | -48.36 | 23.26 | 0.68 |
| M6 | 小潮期 | 9.54 | 1.32 | 23.26 | -42.80 | -19.54 | 1.84 |
| | 中潮期 | 8.30 | 0.21 | 37.57 | -13.81 | 23.76 | 0.37 |
| | 大潮期 | 4.62 | 0.67 | 22.12 | -6.58 | 15.53 | 0.30 |

中潮期统计时段内, 大横琴站的涨潮潮差为 1.14 m, 落潮潮差为 1.72 m。与小潮期相比, 中潮期 A-A 断面的垂向盐度分布等值线走势已经有所倾斜, 各站的分层系数在 3 个统计潮周期中均为最小值。图 5 和图 6 显示, 在此期间磨刀门水道内底层水体的盐度快速下降, 表层水体的盐度则快速增大, 说明盐、淡水的垂向混合作用明显。初涨时刻, 盐水楔抵达口外拦门沙位置, 磨刀门水道内沿程分层现象明显, 但盐度等值线走势为斜向。涨急时刻, 随着涨潮流的加强, 口外盐水楔越过拦门沙, 与小潮期高盐水沿着河道底层向上游推进的形式有所不同, 盐水楔与表层低盐水充分混合形成高盐水团后整体向上游推进, 高盐水团前锋的垂向混合较为均匀, 盐度等值线呈 L 形, 密度梯度水平的指向上游。涨憩时刻, 咸潮上溯达到峰值, 磨刀门水道底层水体盐度极高, A-A 断面范围内的底层盐度均高于 20, 在混合动力减弱和底部惯性流的作用下, 盐度等值线重新被拉伸为倾斜走势。落急时刻, 盐度垂向分布与小潮期类似, 盐水楔已退出口外拦门沙, 至落憩时刻, 磨刀门水道内基本被低盐水所占据, 盐度等值线保持倾斜走势。

大潮期, 大横琴站的涨潮潮差为 1.27 m, 落潮潮差为 1.99 m。磨刀门水道的咸潮上溯形式大致与中潮期相似, 盐水楔越过拦门沙后, 以高盐水团的形式整体向上游推进, 类似于“活塞”似的进退。不同的是, 大潮期潮流动力更强, 混合更为均匀, 一次进退距离和涨落幅度相对更大。

另外, 从图 10 还可以发现, 磨刀门口外拦门沙对 A-A 断面的垂向盐度分布有明显影响。首先, 拦门沙对口外盐水楔和口内高盐水团存在一定的阻滞作用, 小潮期潮汐动力较弱, 涨潮阶段口外盐水楔难以越过拦门沙, 落潮阶段上游底层高盐水团得以保留在拦门沙内坡一侧。其次, 由于拦门沙水域水深较浅, 在潮流速相同的情况下, 混合效应更为明显, 除小潮期涨憩附近时段外, 拦门沙顶部水体均处于充分混合状态, 盐度等值线多为接近于垂直走势。

3.2.2 盐分物质输移

根据单宽累积盐通量的统计结果, 在小潮的一个完整潮周期内, 表、底层累积盐通量的输移方向相反, 且底层的累积盐通量大于表层, 尤其是在位于出口位置的 M1 测站, 其底层累积盐通量与表层累积盐通量的比值达到了 2.33, 说明在此期间垂向重力环流的输移作用明显, 磨刀门水道内的盐分物质主要依靠底层水

体向上游输移。中潮和大潮期,表、底层累积盐通量的输移方向同样也是相反的,所不同的是,表层累积盐通量大于底层,说明在此期间潮流的输移作用相对更为明显。

3.2.3 综合分析

在不同的潮汐动力条件下,磨刀门水道的盐、淡水混合状态差别较大,是一个交替转换的动态过程,一定程度上导致了磨刀门水道咸潮上溯的复杂性和多变性。磨刀门水道咸潮上溯的日周期变化与潮差具有很好的对应关系,规律性较好;而其半月周期变化是一个长周期的累积过程,分析其规律时需考虑不同潮期和水下地形的综合作用。根据上述分析,小潮期磨刀门水道盐度高度分层且分层稳定,底层水的累积盐通量大于表层,且净输移方向指向上游,因此底层水体盐度可以长时间维持在较高值,涨潮阶段在涨潮流的推动作用下向上游推进;落潮阶段,未经充分混合的低盐水由表层下泄出口门,盐分物质流失较少,而底层高盐水在重力环流和拦门沙地形的综合作用下,退出口门相对较为缓慢,导致小潮期间盐分物质得以在磨刀门水道内不断囤积,咸潮就表现为持续上溯的特征。在由小潮向大潮转换期间的中潮期,随着潮差和潮流速的增大,表、底层水体的混合作用增强,磨刀门水道内中层和上层水体的盐度增大,在涨潮流的作用下向上游推进,在某一时刻达到盐度上溯的峰值。在之后的大潮期,潮差和潮流速进一步增大,盐、淡水混合作用也进一步增强,在充分混合的情况下,虽然高盐水能在较强涨潮流作用下向上游推进较远距离,但落潮流在此期间占优,导致河道断面盐分物质的整体净输移量为正(即指向口门外),咸潮上溯逐渐减弱。综上所述,小潮、中潮至大潮的这种连续累积作用,正是磨刀门水道咸潮上溯最强的时段出现于小潮后的中潮期的动力机制所在;而其支流洪湾水道,由于其水深较小,且河道不顺直,盐、淡水混合相对较为充分,其咸潮上溯过程与潮汐动力过程具有较好的对应关系。

3.3 讨论

通过对现有研究成果的总结发现,在解释磨刀门水道咸潮上溯最强的时段出现于小潮后的中潮期这一问题时,很多研究成果都将“重力环流”视为解释这一现象的主要动力机制。陈荣力等^[9]通过实测资料分析认为:对于磨刀门水道而言,潮流引起的咸潮上溯距离有限,不是咸潮上溯的关键动力,由密度流(即重力环流)产生的盐水楔是造成磨刀门水道咸潮上溯的关键动力。卢陈等^[4]通过水槽物理模型试验结果分析,得到了如下结论:存在潮差临界值使得咸水入侵距离最短,当潮差小于该临界值,咸水入侵距离随潮差增大呈快速减小趋势,而大于该临界值则呈缓慢增大趋势。这些研究成果与本文的结论大致相似,本文在分析磨刀门水道不同潮期的盐淡水分层与混合特征和盐分物质输移累积效应的基础上,进一步印证了这些论点。

4 结 论

验证结果显示,本文的数值模型能够较为准确地模拟珠江河口咸潮上溯的动力过程。通过对实测资料和数值模拟结果分析,对磨刀门水道及其支流洪湾水道的咸潮上溯规律和动力机制进行了探讨。结果表明,洪湾水道咸潮上溯的日和半月周期变化规律均与潮汐具有很好的对应关系;磨刀门水道咸潮上溯的日周期变化规律同样与潮汐具有很好的对应关系,但其半月周期变化规律则表现出一个特殊现象:咸潮上溯最强和最弱时刻分别出现于小潮和大潮后的中潮期。磨刀门水道咸潮上溯半月周期变化规律的动力机制较为复杂,是径流、潮汐和地形的综合作用影响下不同盐淡水混合状态交替转换的动态过程,不同的混合状态产生不同的盐分物质输移形式:小潮期,底层累积盐通量明显大于表层,净输移方向为陆向;大潮期,表层累积盐通量明显大于底层,净输移方向为海向;而平衡点一般出现于中潮期,这就是磨刀门水道咸潮上溯最强和最弱时刻分别出现于小潮和大潮后的中潮期的原因所在。

参考文献:

- [1] 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 River Delta [J]. Scientia Geographica Sinica, 2009, 29(1): 89-92. (in Chinese))
- [2] 包芸, 任杰. 伶仃洋盐度高度层化现象及盐度锋面的研究[J]. 水动力学研究与进展, 2005, 20(6): 689-693. (BAO Yun,

- REN Jie. Numerical simulation of high resolution on the phenomenon of saline stratification in Lindinyang [J]. Journal of Hydrodynamics, 2005, 20(6): 689-693. (in Chinese)
- [3] ZHOU Wei, WANG Dongxiao, LUO Lin. Investigation of saltwater intrusion and salinity stratification in winter of 2007/2008 in the Zhujiang River Estuary in China [J]. Scientia Geographica Sinica, 2012, 31(3): 31-46.
- [4] 卢陈, 袁丽蓉, 高时友, 等. 潮汐强度与咸潮上溯距离试验[J]. 水科学进展, 2013, 24(2): 251-257. (LU Chen, YUAN Li-rong, GAO Shiyu, et al. Experimental study on the relationship between tide strength and salt intrusion length [J]. Advances in Water Science, 2013, 24(2): 251-257. (in Chinese))
- [5] 陈水森, 方立刚, 李宏丽, 等. 珠江口咸潮入侵分析与经验模型[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))
- [6] GONG Wenping, SHEN Jian. 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(7/8): 769-788.
- [7] 任杰, 刘宏坤, 贾良文, 等. 磨刀门水道盐度混合层化机制[J]. 水科学进展, 2012, 23(5): 715-720. (REN Jie, LIU Hongkun, JIA Liangwen, et al. Research on salinity mixing and stratification mechanism at the Modaomen channel [J]. Advances in Water Science, 2012, 23(5): 715-720. (in Chinese))
- [8] 韩志远, 田向平, 刘峰. 珠江磨刀门水道咸潮上溯加剧的原因[J]. 海洋学研究, 2010, 28(2): 52-59. (HAN Zhiyuan, TIAN Xiangping, LIU Feng. Study on the causes of intensified saline water intrusion into Modaomen estuary of Pearl River in recent years [J]. Journal of Marine Science, 2010, 28(2): 52-59. (in Chinese))
- [9] 陈荣力, 刘诚, 高时友. 磨刀门水道枯季咸潮上溯规律分析[J]. 水动力学研究与进展, 2011, 26(3): 312-317. (CHEN Rongli, LIU Cheng, GAO Shiyu. Analysis of the mechanism on the saltwater intrusion in Modaomen estuary [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2011, 26(3): 312-317. (in Chinese))
- [10] 胡溪, 毛献忠. 珠江口磨刀门水道咸潮入侵规律研究[J]. 水利学报, 2012, 43(5): 529-536. (HU Xi, MAO Xianzhong. Study on saltwater intrusion in Modaomen of the Pearl estuary [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(5): 529-536. (in Chinese))
- [11] WANG Biao, ZHU Jianrong, WU Hui, 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.

Hydrodynamic of saltwater intrusion in the Modaomen waterway *

CHEN Wenlong^{1,2}, ZOU Huazhi^{1,2}, DONG Yanjun²

(1. Key Laboratory of the Pearl River Estuarine Dynamics and Associated Process Regulation, Ministry of Water Resources, Guangzhou 510611, China; 2. The Pearl River Hydraulic Research Institute, Guangzhou 510611, China)

Abstract: In order to study the hydrodynamic characteristics of saltwater intrusion in the Modaomen waterway, a three dimensional baroclinic numerical model with large scale and high-resolution grids, covering the entire upstream river network, the Pearl River estuary and its adjacent sea, was set up based on the Finite Volume Coastal Ocean Model (FVCOM) and then validated and calibrated against measured data. Numerical experiment of saltwater intrusion in the Modaomen waterway was carried out with this model. According to simulated results and measured data, the mechanisms of stratification, mixing and salt transportation during spring, moderate and neap tide were analyzed. Results show that the salt transportation in the Modaomen waterway is dominated by bottom high-salinity water and its net mass is landward during neap tide. However, it is dominated by surface low-salinity water and the net mass is seaward during flood tide. The balance of salt transportation will appear within moderate tide. As a result, the saltwater intrusion in the Modaomen waterway reaches its peak and nadir during the coming moderate tide after neap and flood tide respectively.

Key words: saltwater intrusion; numerical simulation; Pearl River estuary; Modaomen waterway; hydrodynamic

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51409286) and the National Non-Profit Research Program of China (No. 201301073).