



磨刀门航道整治工程对咸潮上溯的影响

许陈澄, 诸裕良, 齐庆辉
(河海大学, 江苏南京 210098)

摘要: 采用实测水文资料建立高精度的三维水流盐度数学模型, 模拟了磨刀门航道整治工程前后流场及盐水入侵的变化。并运用已验证好的磨刀门高精度三维水流盐度数学模型, 计算了磨刀门航道整治工程前后水动力变化及咸潮上溯程度, 为航道整治工程的实施提供依据。研究表明航道整治工程使得近海地区的盐度值有所增大, 加剧了咸潮上溯程度, 但工程对咸潮上溯的影响不大, 不是珠江三角洲地区近年来咸潮上溯的主要原因。

关键词: 磨刀门; 咸潮上溯; 航道整治; 数值模拟

中图分类号: TV 148.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)02-0099-08

Impact of waterway regulation engineering on saltwater intrusion in Modaomen estuary

XU Chen-cheng, ZHU Yu-liang, QI Qing-hui
(Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: This paper analyses measured Modaomen hydrological data and exhibits the temporal and spatial distribution of salinity and characteristics of fresh and salinity water mixing, as well as the correlation between salinity, water level and suspended sediment concentration in the Modaomen region. Based on the establishment of high-precision three-dimensional salinity mathematical model in Modaomen region, this paper calculates various engineering plans and examines the changes of flow field and tidal saltwater intrusion, which provides elementary base for implementation of the waterway regulation engineering. The study indicates that the salinity degree has a merely minor increase after projects indeed in the estuary to provide situation for tide intrusion. However, the influence is little and it fails to be the chief reasons for the depravation of tide intrusion in the Modaomen estuary recent years.

Key words: Modaomen estuary; saltwater intrusion; waterway regulation; numerical stimulation

近年来, 由于自然及人类活动等因素的作用, 珠江三角洲成为我国咸灾的多发地区之一。盐水入侵是潮汐河口特有的自然现象。Pritchard^[1-2], Ippen等^[3], Dyer^[4]和Charles等^[5]早在20世纪50年代就对与盐水运动有关的基本河口现象与过程进行了开创性的和奠基性的研究工作, 随后在此基础上逐步发展采用数值模拟方法^[6-7]。国内对于盐水入侵的研究始于20世纪60年代^[8], 以沈焕庭^[9]为代表的多位专家学者对长江口盐水入侵的来源、咸淡水混合类型以及盐度的时空变化规律进行了较

为全面深入的研究, 从长江口盐水入侵锋、盐水从北支倒灌南支的通量及潮汐分汊河口入侵类型等多方面对盐水入侵进行了全面的探讨, 从动力机制上给出了解释^[10-12]。事实上, 在珠江三角洲地区, 由于近年来频繁的河道挖沙等人类活动的影响^[6,13-14], 盐水入侵已日趋严重, 对珠江流域地区的社会、经济和环境的发展产生了极大影响。另外, 由于珠江河网纵横交错、水源地密布, 咸潮侵袭显得尤为复杂。

由于近几年珠江口咸潮上溯的加剧, 给当地

收稿日期: 2012-07-09

作者简介: 许陈澄(1988—), 男, 硕士研究生, 从事港口、海岸及近海工程研究。

的人民生产生活带来很大损失。自20世纪90年代以来,在高强度、大范围人工采砂和航道整治等人类活动作用下,河床地形发生了剧烈的变化,其强度和幅度远超过河流缓慢的自然演变过程,从而引起了珠江三角洲河网内水流动力条件的改变,并由此对航运、取水、水利、水质、生态环境等产生影响。所以研究航道整治工程对该地咸潮上溯的影响,以制定相关的措施来保障该地的用水安全是很有必要的。磨刀门作为珠江河网最主要的出海口门之一,研究其航道整治工程对咸潮上溯的影响具有十分重要的意义。目前对于河口盐水入侵的数值模拟大多采用一、二维数学模型,本文通过建立磨刀门三维水流盐度数学模型,对水流的流速和水体的盐度进行了垂向分层研究,从而更加直观地比较和分析航道整治工程对于咸潮上溯的影响。

1 三维水流盐度数学模型的建立及求解

1.1 基本方程

基本方程包括笛卡尔坐标系下的水流连续方程、运动方程及盐度扩散方程^[13]。

连续方程:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

x, y 方向的运动方程:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial y} + \frac{\partial(uv)}{\partial x} + \frac{\partial(wu)}{\partial z} = -fv - g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial x} dz + F_u + \frac{\partial}{\partial z} (v_i \frac{\partial u}{\partial z}) \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial(uv)}{\partial x} + \frac{\partial(wv)}{\partial z} = -fu - g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial y} dz + F_v + \frac{\partial}{\partial z} (v_i \frac{\partial v}{\partial z}) \quad (3)$$

盐度扩散方程:

$$\frac{\partial s}{\partial t} + \frac{\partial(us)}{\partial x} + \frac{\partial(vs)}{\partial y} + \frac{\partial(ws)}{\partial z} = F_s + \frac{\partial}{\partial z} (D_v \frac{\partial s}{\partial z}) \quad (4)$$

式中: t 是时间; x, y 是直角坐标系坐标; η 是表面水位; h 为总水深; \bar{u}, \bar{v} 为 x, y 方向上的垂线平均速度,有 $h\bar{u} = \int_{-d}^\eta u dz, h\bar{v} = \int_{-d}^\eta v dz$ (d 是静水深 $d+\eta=h$); f 为柯氏参数 ($f=2\omega \sin \phi$, ω 为地球旋转

角速度, ϕ 为纬度); g 为重力加速度; ρ 为水的密度; D_v 是垂向湍流扩散系数; F_s 是水平扩散项,

$F_s = [\frac{\partial}{\partial x} (D_h \frac{\partial}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (D_h \frac{\partial}{\partial y})]s$; D_h 是水平扩散系数,与涡黏系数有关, $D_h = \frac{A}{\sigma_T}$; $D_v = \frac{v_t}{\sigma_T}$, σ_T 是普朗特数。

1.2 方程的求解及模型的建立

利用有限差分法计算基本方程的数值解。有限差分法是基于差分原理的一种数值算法,其基本过程为:1)将求解域划分为差分网格,用有限个网格节点代替连续的求解域;2)以Taylor级数展开等方法,把控制方程中的导数用网格节点上的函数值的差商代替进行离散,从而建立以网格节点上的值为未知数的代数方程组;3)根据给定的初始条件和边界条件,求解代数方程组,得到基本方程的数值解。

模型的计算范围北起磨刀门水道竹银水文站附近,南至磨刀门口外-15 m等深线附近,西自莲塘湾外,东至澳门东侧水域,横向宽约30 km,纵向长约53 km,水域面积约130 km²。进行数学模型计算时,主要依据2007—2008年磨刀门口外及交杯沙地区实测的水下地形、2005年磨刀门水道交杯沙以上到竹银段实测地形、以及1999年伶仃洋西南部分实测地形确定水深,模型计算中将地形数据进行插值,使各计算节点上均附有水深值。模型计算区域的离散均采用三角形网格,灵活贴合岸线,窄细河道网格较小,三角形边长约100 m,口外开阔处网格较大,三角形边长300~400 m。图1为模型的网格。

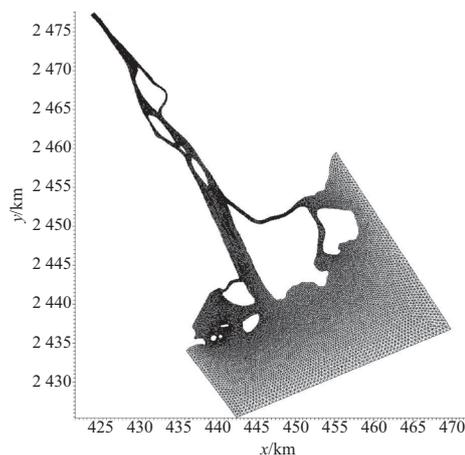


图1 磨刀门水流盐度数学模型网格

模型上边界潮位、盐度采用各个测站的实测资料给定; 外海潮位边界由南中国海潮波模型提供, 盐度边界根据外海观测的统计资料给定, 模型在西南开边界从陆地到外海的盐度值为20%~35%, 东北开边界为24%~35%, 东南开边界为30%~35%, 并且按照盐度变化梯度分层给定。模型闭边界采用了干湿判别的动边界处理技术, 即当某点水深小于一浅水深(如0.2 m)时, 令该处流速为零, 滩地干出; 当水深大于该浅水深时, 参与计算, 潮水上滩。

根据实测水文数据, 模型计算时段为2009-01-10T00:00—2009-01-13T23:00, 验证情况根据实测资料确定为: 潮位, 2009-01-10T01:00—2009-01-13T23:00; 流速、盐度, 2009-01-10T14:00—2009-01-13T18:00。模型采用的是河床突起高度。在查阅相关文献基础上, 确定口门处为1~3 cm, 外海为0.3~1 cm。模型计算时间步长为10 s, 水平涡黏系数为0.28, 垂向采用 $k-\epsilon$ 模型计算。

2 模型的验证

根据实测的水文数据对模型进行验证。验证潮位站只有灯笼山站和三灶站有实测潮位值。流速、流向以及盐度在计算范围内有8个观测点, 其中4个点在磨刀门口外, 4个点在口门内沿磨刀门水道等距分布至竹银, 即 $M_1 \sim M_8$ 。其中由于 M_1 测

量时风浪过大施测时间很短, 故去掉该点的流速流向验证, 流速验证 $M_2 \sim M_8$ 共7点; 流速流向盐度实测值一般水深较深的6层都有实测数据, 即验证6层, 水深较浅处的0.2, 0.4, 0.8层数据不全, 则只验证表底层和0.6层, 各验证点位置见图2。通过验证结果可知, 计算的水位过程与实测资料吻合较好, 模拟精度较高。在水动力验证良好的基础上, 对观测点进行盐度的验证, 验证结果也较为吻合, 可以反映盐度随涨落潮的变化过程及盐度随水深的变化, 图3~5给出了部分验证点的验证结果。

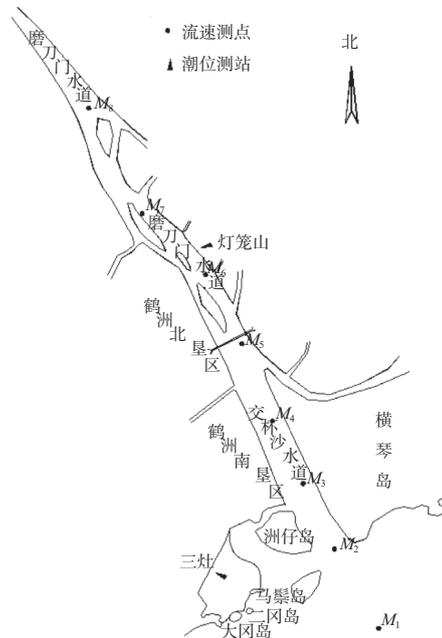


图2 水位流速盐度验证点位置

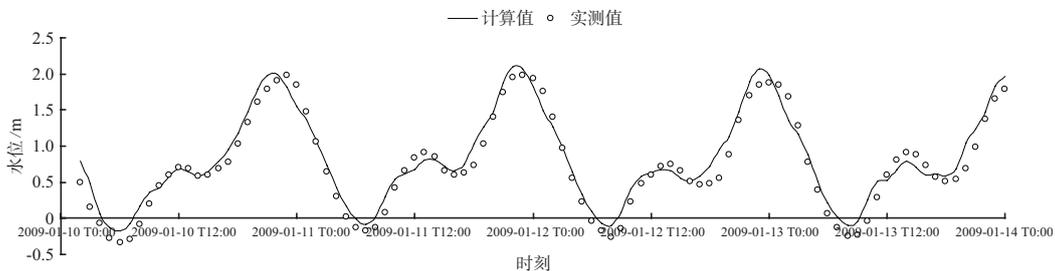
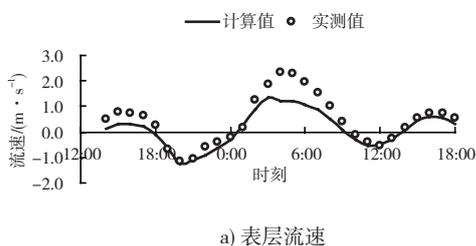
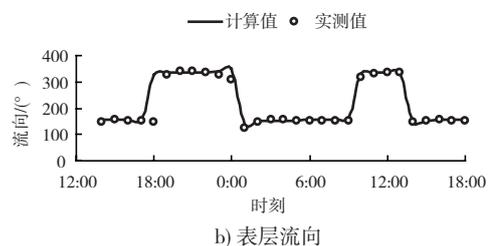


图3 灯笼山站水位验证



a) 表层流速



b) 表层流向

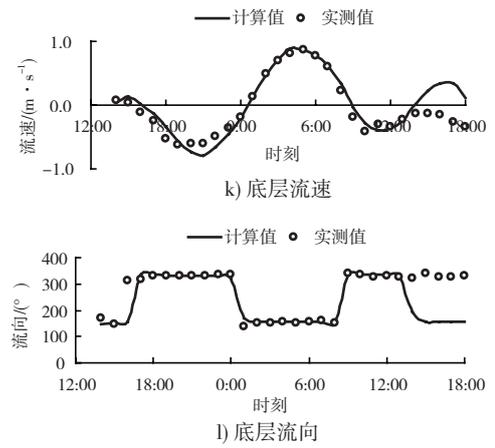
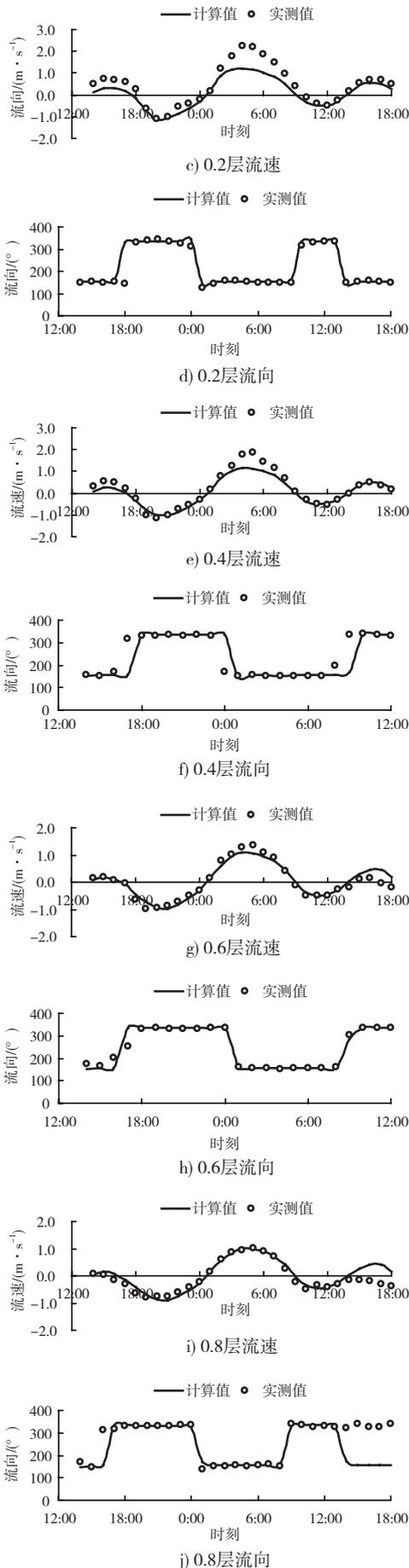


图4 M_3 流速流向验证

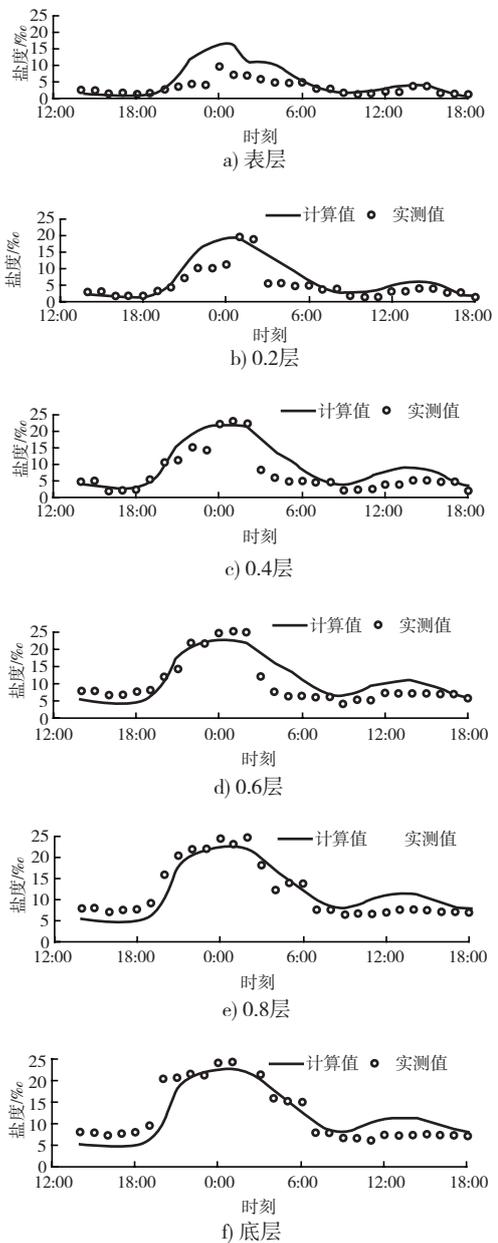


图5 M_4 盐度验证

3 磨刀门航道整治工程计算分析

本文磨刀门航道疏浚工程采用的是:交杯沙水道—西汉航道(3 000 t)整治工程,以疏浚交杯沙—西汉水道为主,并建双导堤以维护航道方案^[14],导堤间距1 400 m,放宽率为1.0%,延伸至拦门沙浅滩尾部,两侧导堤长约5 500 km,此方案航道较长,且较为顺直,故采用四边形网格对航道进行加密,以减少计算时间。计算网格见图6。磨刀门水道及出海航道拟定通航标准为3 000吨级海轮,按照选定的海轮船型,根据规范规定航道尺度潮汐河口航段的3 000吨级尺度可以定为7.1 m×118 m×650 m(设计水深×航道宽度×弯曲半径);内河航段3 000吨级航道尺度6.4 m×100 m×650 m(设计水深×航道宽度×

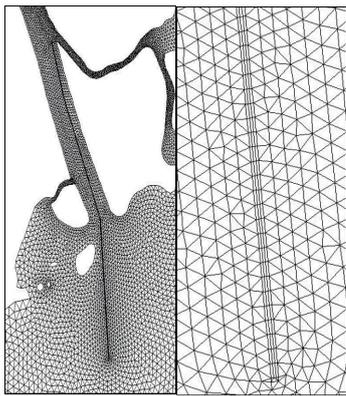


图6 计算网格及局部放大图

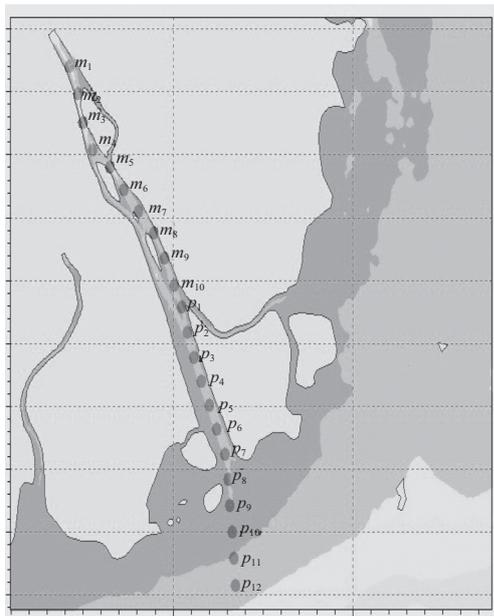


图7 磨刀门测点

弯曲半径),内河航段不考虑备淤富裕深度。地形仍然以原始的地形为主,在西汉航道中疏浚至7.1 m。由于该航道穿过口门地区的拦门沙,为防止航道的回淤,在西汉航道两端建有东西两条导堤对航道进行维护。按照从上游到下游(图7)的顺序,磨刀门水道为 $m_1\sim m_{10}$;交杯沙水道沿深泓线等距离输出7个点,自上游到下游分别为 $p_1\sim p_7$;西汉水道自上游到下游沿航道线输出6个点依次为 $p_8\sim p_{12}$ 。比较工程前后流速盐度大小的变化共分涨急、涨憩、落急、落憩4个时刻分别进行对比。

3.1 流速及盐度变化对比

为了对比分析工程前后磨刀门水道、交杯沙西汉水道流速和盐度的变化,沿磨刀门水道选取 $m_1\sim m_{10}$ 共10个测点,交杯沙西汉水道选取 $p_1\sim p_{12}$ 共12测个点(图7),部分点工程前后流速及盐度变化情况见表1和表2。

由表1可知,磨刀门水道工程后各点的流速以增加为主,只有涨憩时刻磨刀门水道下游流速有减小的情况。各测点流速变化的数值都不大。西汉航道疏浚工程对磨刀门水道流速的影响几乎可以忽略不计。交杯沙水道($p_1\sim p_7$)各点的流速变化很小,整体来看西汉航道疏浚工程对交杯沙水流条件影响较小。对于西汉航道($p_8\sim p_{12}$),处于拦门开挖较多及东西导堤之间的地段,流速变化一般在10%以上。西汉水道的流速较大,是径流的主要通道;航道疏浚后,水流更顺畅, p_{12} 测点处于西汉水道,流速增大明显,这可能是航道疏浚后西汉分流比增大、水流更加顺畅导致的。

由表2可知,磨刀门水道盐度大部分以增加为主,靠近上游的盐度值本身比较小,所以增加量也小,航道疏浚工程对其影响较小。涨憩、落急时刻盐度值较大,由于盐度受流速的直接影响,涨潮流时盐度上升,落潮流时盐度下降。涨憩时刻磨刀门水道盐度值及变化的百分比按照自上至下顺序逐渐增大,上游距离航道疏浚处较远,工程前后盐度值几乎没有变化。按照生活饮用水标准0.5‰来看,磨刀门水道上游除了涨憩时刻外,其他时间段都是满足要求的;下游盐度较大,不能够满足饮用水标准,但是避开高盐时段,落憩

表1 工程前后流速变化

点号	分层	涨急			涨憩			落急			落憩		
		工程前后流速/(m·s ⁻¹)		变化率/%	工程前后流速/(m·s ⁻¹)		变化率/%	工程前后流速/(m·s ⁻¹)		变化率/%	工程前后流速/(m·s ⁻¹)		变化率/%
		前	后		前	后		前	后		前	后	
m ₁	表	0.77	0.77	0.00	0.04	0.04	0.00	0.61	0.61	0.00	0.05	0.05	0.00
	中	0.72	0.72	0.00	0.04	0.04	0.00	0.57	0.57	0.00	0.05	0.06	4.60
	底	0.55	0.55	0.00	0.04	0.04	0.00	0.43	0.43	0.00	0.06	0.07	3.27
m ₁₀	表	0.61	0.61	0.00	0.25	0.25	0.00	0.76	0.77	1.67	0.05	0.05	0.00
	中	0.59	0.60	0.44	0.17	0.17	0.00	0.64	0.65	1.21	0.16	0.16	0.00
	底	0.51	0.51	0.00	0.12	0.12	0.00	0.40	0.40	0.00	0.20	0.20	0.00
p ₁	表	0.85	0.86	1.22	0.39	0.40	2.41	0.88	0.89	0.67	0.28	0.28	0.00
	中	0.77	0.78	0.61	0.36	0.36	0.00	0.71	0.72	0.61	0.17	0.17	0.00
	底	0.57	0.58	0.65	0.28	0.28	0.00	0.33	0.34	0.91	0.04	0.06	32.67
p ₇	表	1.13	1.11	-1.82	0.18	0.18	0.00	1.54	1.56	0.86	0.26	0.26	0.00
	中	0.99	0.99	-0.77	0.22	0.22	0.00	1.27	1.29	1.28	0.00	0.00	0.00
	底	0.70	0.69	-1.85	0.17	0.16	-1.13	0.90	0.91	1.50	0.17	0.17	0.00
p ₁₂	表	0.28	0.33	19.08	0.20	0.25	23.48	0.36	0.54	50.52	0.50	0.64	26.94
	中	0.27	0.32	18.93	0.16	0.19	23.06	0.22	0.32	47.21	0.31	0.39	25.61
	底	0.07	0.08	9.65	0.17	0.20	16.31	0.01	0.03	136.41	0.09	0.12	30.31

表2 工程前后盐度变化

点号	分层	涨急			涨憩			落急			落憩			‰
		工程前	工程后	变化值										
		工程前	工程后		工程前	工程后		工程前	工程后		工程前	工程后		
m ₁	表	0.15	0.15	0.00	0.55	0.55	0.00	0.15	0.15	0.00	0.15	0.15	0.00	
	中	0.15	0.15	0.00	0.52	0.52	0.00	0.15	0.15	0.00	0.15	0.15	0.00	
	底	0.15	0.15	0.00	0.48	0.48	0.00	0.15	0.15	0.00	0.15	0.15	0.00	
m ₁₀	表	5.88	6.00	0.12	9.05	9.08	0.03	4.23	4.25	0.00	1.91	1.90	-0.01	
	中	5.83	5.95	0.13	11.53	11.76	0.23	4.61	4.66	0.01	2.41	2.40	-0.01	
	底	5.64	5.76	0.13	13.22	13.54	0.32	5.19	5.32	0.03	3.30	3.31	0.01	
p ₁	表	5.70	5.80	0.10	14.49	14.72	0.23	8.07	8.19	0.12	2.85	2.85	-0.01	
	中	5.84	5.97	0.14	14.56	14.83	0.26	10.59	10.87	0.28	3.37	3.38	0.01	
	底	5.70	5.82	0.12	14.43	14.70	0.28	13.13	13.42	0.29	4.13	4.20	0.07	
p ₁₂	表	23.15	23.17	0.02	23.50	23.54	0.04	20.63	20.59	-0.04	20.73	20.88	0.15	
	中	25.35	25.34	-0.01	25.72	25.66	-0.06	23.91	23.61	-0.30	25.13	25.10	-0.03	
	底	29.76	29.70	-0.06	29.41	29.39	-0.02	27.54	27.38	-0.17	29.34	29.28	-0.06	

时刻盐度值是能够基本满足工业用水（2.5‰）要求的。交杯沙西汉水道盐度有所增加，各个测点盐度增加值不等，变化的百分比一般不足5%。到最外海的测点由于受外海潮汐影响较大，盐度变化量就很小了。该工程对交杯水道盐度影响不是很大，盐度增加值较小，外海测点盐度有减小趋势，对于磨刀门水道的盐水入侵问题可以通过一定的压咸措施解决。

3.2 盐度的空间变化

以交杯沙水道与洪湾水道交汇处为起点，沿

航道线延伸至疏浚工程末端，以该距离为x轴，水深为y轴，画出纵向的垂直断面盐度分布图（图8），进行工程前后的对比。

图8是涨急、涨憩时刻工程前后沿航道疏浚方向的盐度垂向分布。工程前后水下地形发生了明显改变，工程前有深槽有浅滩的地形变为水深较统一的平整航道，并且深槽地方不需要疏浚予以保留。由图8可以看出，盐水上溯有一定程度的增加，交杯沙水道盐度有小程度的增加，中底层变化较为明显。工程前等盐线靠表层分布比较密

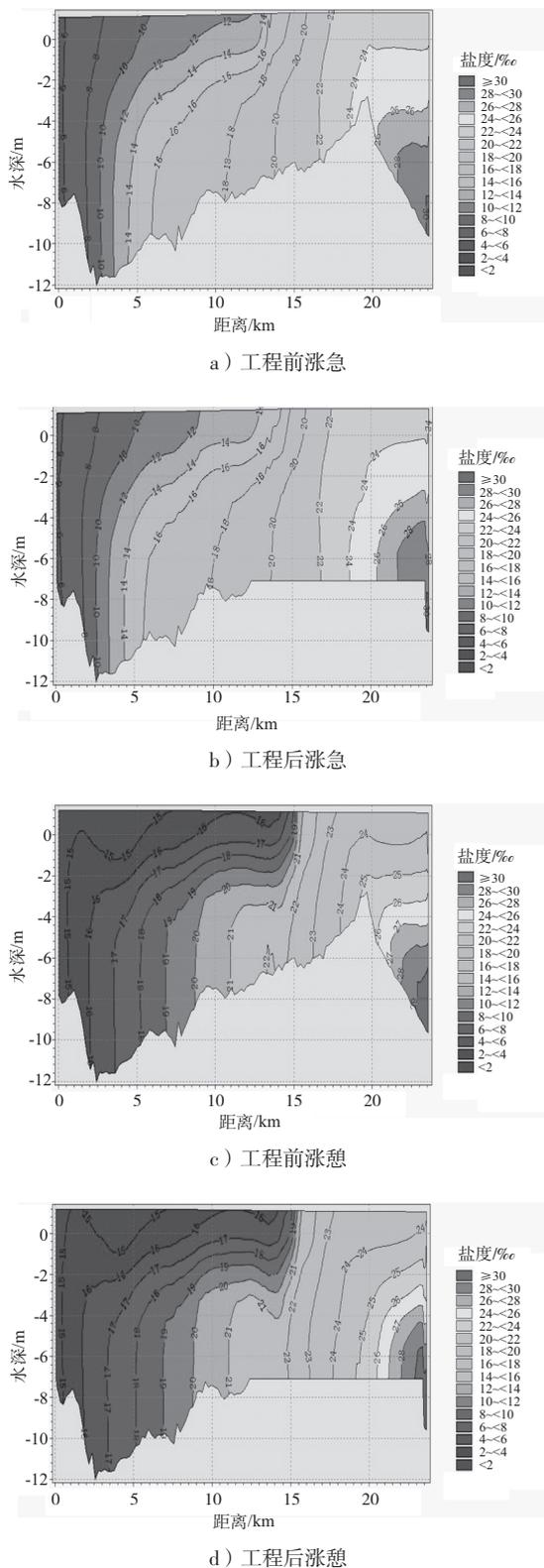


图8 工程前后盐度纵断面变化

集, 而工程后在中层分布比较密集, 因此工程前盐度分层集中于表层附近, 工程后中层盐度垂向变化较迅速。

涨急时刻潮汐动力相对较强, 盐水混合比较

充分, 底层 22‰ ~ 24‰ 盐度线向后退移 0.5 km 左右, 工程后由于航道疏浚增大了西汉水道的分流比, 交杯沙下游底层盐度有减小的趋势。 18‰ 盐度线向前推进了 1 km , 14‰ 盐度线向前推进 1.5 km , 工程后交杯沙上游盐水楔上溯距离有所增加, 但是由于航道进行疏浚区域较小, 对交杯沙上游及磨刀门水道影响较小。

涨憩时刻盐度值较大, 整体变化值比涨急时刻明显, 由于交杯沙上段的冲淡水下泄作用, 该时刻盐淡水之间有明显的交界面, 盐水在淡水下面楔入, 盐淡水之间的混合程度小, 盐水出现了明显的分层。中间段与涨急时刻相似, 工程后盐度上溯明显比工程前有所减缓, 23‰ ~ 19‰ 盐度线向后有所退移, 由于涨憩时刻高浓度咸水推进作用明显, 退移距离较小。

工程后中层等盐线较工程前分布密集, 整体上盐度变化不是很大, 17‰ ~ 19‰ 盐度线向前推进 1.5 km 左右, 15‰ 盐度线向前推进 1 km 。工程后盐度线垂向上有整体下移趋势, 盐水楔上溯距离有所增大。工程实施后, 上段盐度有小程度增加, 下段盐度又有减小的趋势。整体上看该方案对咸潮上溯影响不是很大。

4 结语

本文在水流连续方程、运动方程以及盐度扩散方程的基础上, 采用三角形网格的形式并利用有限差分法进行离散, 建立了磨刀门三维水流盐度数学模型。本文采用同步水文资料对磨刀门地区的流体和盐度场进行了模拟。验证结果显示模型计算的潮位、流量、流速、流向以及盐度结果与实测资料吻合较好, 所建立的磨刀门海域潮流盐度数学模型计算结果合理可信, 可以用于航道整治方案的短期预测计算。

选取航道整治工程区域进行网格加密、地形挖深等条件的改变, 进行工程后短期内的水流盐度数值模拟, 得到的结果与工程前进行对比, 以明确航道整治工程对于盐水入侵所带来的影响。通过比较发现, 磨刀门水道盐度大部分以增加为主。靠近上游的盐度值本身比较小, 所以增加量

也小, 航道疏浚工程对其影响较小;对于西汉水道盐度有所增加, 但增加值不大, 整体上看该航道整治工程对咸潮上溯影响不是很大。

参考文献:

[1] Pritchard D W. A study of the salt balance of a coastal plain estuary[J]. Journal of Marine Research, 1954, 13(1): 133-144.

[2] Pritchard D W. Salinity distribution and circulation in the Chesapeake Bay estuarine system[J]. Journal of Marine Research, 1952,11(2): 106-123.

[3] Ippen A T, Harleman D. One-dimensional analysis of Salinity intrusion in estuaries[J]. Technical Bulletin, 1961(5): 1-52.

[4] Dyer K R. Estuarine hydrology and sedimentation[D]. Cambridge, UK: Cambridge University Press,1979: 1-15.

[5] Charles B O. Discussion of the turbidity maximum in partially mixed estuaries[J]. Estuarine and Coastal Marine Science, 1980, 10(3): 239-246.

[6] 董壮, 三维水流盐度数学模型[D]. 南京: 河海大学, 2003.

[7] 莫思平, 季荣耀, 陆永军, 等. 珠江口磨刀门出海航道

整治研究[G]// 中国海洋工程学会. 第十四届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集(下册). 北京: 海洋出版社, 2009.

[8] 毛汉礼, 甘子钧, 蓝淑芳. 长江冲淡水及其混合问题的初步探讨[J]. 海洋与湖沼, 1963, 5(3): 183-206.

[9] 沈焕庭, 茅志昌, 谷国传, 等. 长江河口盐水入侵的初步分析——兼谈南水北调[J]. 人民长江, 1980(3): 20-26.

[10] 茅志昌, 沈焕庭, 陈景山. 长江口北支进入南支净盐通量的观测与计算[J]. 海洋与湖沼, 2004, 35(1): 30-34.

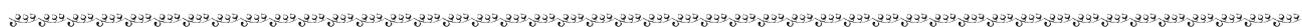
[11] 茅志昌. 长江河口盐水入侵锋研究[J]. 海洋与湖沼, 1995, 26(6): 643-649.

[12] 肖成猷, 沈焕庭, 长江河口盐水入侵影响因子分析[J]. 华东师范大学学报: 自然科学版, 1998(3): 74-80.

[13] 张蔚, 严以新, 诸裕良, 等. 人工采沙及航道整治对珠江三角洲水流动力条件的影响[J]. 水利学报, 2008(9): 78-84.

[14] Gong Wenping, Wang Yaping, Jia Jianjun. The effect of interacting downstream branches on saltwater intrusion in the Modaomen Estuary[J]. Journal of Asian Earth Sciences,2012, 45:223-238.

(本文编辑 武亚庆)



(上接第94页)

力 τ_B 和动黏系数 η_B 与浮泥密度 ρ_m 之间的关系符合以自然对数e为底的指数曲线, 不存在极值、拐点等转折点。现行以这类曲线“看上去”的转折来定义适航密度是不确定的, 这种不确定性成为适航水深利用中长期存在的问题。

2) 船舶在浮泥层中航行时, 船体作为固体边壁, 其附面(边界层)切应力会带动附近浮泥产生剪切流动, 这一物理过程与浮泥在缓坡上的重力流相似, 因此可以适用后者层流-紊流流态转换的判据即浮泥有效雷诺数 $Re=2\ 000\sim 3\ 000$ 来定义适航密度。这一判据也体现了船舶在浮泥层中航行时阻力变化的特征。借助于这一方法, 可避免现行方法的不确定性。

3) 根据连云港淤泥流变特性试验成果, 计算分析不同航行速度, 浮泥密度和浮泥层厚度(船舶在浮泥层中的吃水近似于浮泥层厚度)下的有效雷诺数和适航密度值, 得到适用于航道内通常航行速度(4~8 kn)和浮泥层厚度(50~150 cm)的浮泥层适航密度为 $1.25\sim 1.35\text{ g/cm}^3$; 适用于港

池内较低航行速度(2~4 kn)和浮泥层厚度(50~150 cm)的浮泥层适航密度为 $1.20\sim 1.35\text{ g/cm}^3$ 。

参考文献:

[1] 金鏐, 虞志英, 何青. 滩槽泥沙交换对北槽深水航道回淤影响的分析[J]. 水运工程, 2013(1):101-108.

[2] 金鏐, 虞志英. 关于淤泥质港口航道适航水深的研究[G]//连云港回淤研究论文集. 南京: 河海大学出版社, 1990.

[3] 呼和敖德, 黄振华, 张袁备, 等. 连云港淤泥流变特性研究[J]. 力学与实践, 1994, 16(1): 21-25.

[4] Thijs van Kessel, C Kranenburg. Gravity current of fluid mud on sloping bed[J]. Journal of Hydraulic Engineering: ASCE, 1996, 122(12):710-717.

[5] Liu K F, Mei C C. Approximate equations for the slow spreading of a thin sheet of Bingham plastic fluid[J]. Phys Fluids, 1990, A2(1): 30-36.

[6] 张万菡. 黏性淤泥质泥沙起动冲刷实验研究[D]. 南京: 河海大学, 1984.

(本文编辑 武亚庆)