



珠江河口航道整治工程对咸潮上溯的影响研究

齐庆辉¹, 诸裕良², 谢宁宁³

(1. 江苏省交通规划设计院股份有限公司 江苏省水运工程技术研究中心, 江苏 南京 210014;
2. 河海大学, 江苏 南京 210098; 3. 中交第二航务工程勘察设计院有限公司, 湖北 武汉 430071)

摘要: 基于 MIKE3 FW 模式, 建立覆盖整个珠江 8 大口门区的三维高精度水流盐度数学模型, 研究珠江口的咸潮上溯问题。模型主要采用三角形无结构网格, 航道较为顺直, 采用四边形网格进行加密。模型验证良好, 能够较好地反映珠江口地区三维水动力格局与盐度分布特征。重点分析了磨刀门口门区三维水动力、盐度特征, 并且基于近年来珠江三角洲地区日益增多的航道整治工程, 研究计算了磨刀门航道整治工程对咸潮上溯的影响。研究表明航道整治工程使得近海地区的盐度值有所增大, 咸潮上溯距离有所增加, 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: 珠江河口; 数值模拟; 航道整治; 咸潮上溯

中图分类号: U 617.5

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)10-0138-06

Effect of waterway regulation engineering on saltwater intrusion in Pearl River estuary

QI Qing-hui¹, ZHU Yu-liang², XIE Ning-ning³

(1. Jiangsu Provincial Communications Planning and Design Institute Co., Ltd.,

Jiangsu Technology Research Center for Water Transport Engineering, Nanjing 210014, China;

2. Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. CCCC Second Harbor Consultants Co., Ltd., Wuhan 430071, China)

Abstract: Based on MIKE3 FW model, we establish the three-dimensional salinity mathematical model covering eight entrances to study the problem of saltwater intrusion. Triangles was mainly adopted, and quadrilateral grid was used to refine the straight channel. The validation is better, and the three-dimensional hydrodynamic and salinity distribution characteristics in Pearl river mouth area are reflected. The three-dimensional hydrodynamic and salinity characteristics in Modaomen sea area are mainly analyzed and the influence of saltwater intrusion about the Modaomen waterway regulation project is studied. The results show that the salinity value and saltwater intrusion distance are increased by waterway regulation engineering. But the influence is small, and it is not the main reason for the saltwater intrusion in recent years.

Keywords: the Pearl River estuary; numerical simulation; waterway regulation; saltwater intrusion

随着广东省经济社会发展, 需要对珠江口门航道进行大规模的整治, 磨刀门航道、伶仃洋航道作为珠江口主要出海通道, 地位十分重要。航道整治工程会改变河口区的地形条件, 进而对水动力及环境条件产生一定的影响, 可能使得河口

区咸潮上溯加剧。

Savenije^[1]对大量河口咸潮上溯过程曲线进行了研究, 建立了咸潮上溯曲线与河口的几何特征的相互关系, 研究认为在建立河口咸潮上溯数学模型时考虑几何参量十分重要; Essink^[2]采用

收稿日期: 2015-03-18

作者简介: 齐庆辉 (1985—), 男, 硕士, 从事河口、海岸工程及海洋学研究。

MOCDENS3D 模型对北部岛屿淡水、盐水的分布规律进行了模拟, 研究了三维空间情况下的咸潮上溯规律; 肖成猷等^[3]对径流、潮汐、地形等几个重要因子进行研究, 能够对长江口水流盐度变化的一些特殊现象进行初步的解释; 龚文平等^[4]采用嵌套模型方法, 研究了磨刀门海域枯季咸潮上溯长度对口门区径流量和潮汐混合类型的影响。本文在前人的研究基础上, 基于 MIKE3 FW 模式建立覆盖珠江 8 大口门区的高精度三维水流盐度数学模型, 研究珠江口地区三维水动力格局与盐度分布, 重点分析了磨刀门海域表底层流速盐度分布特征, 运用验证好的模型计算分析了珠江口门区航道整治工程对咸潮上溯的影响。

1 三维水流盐度数学模型

1.1 模型研究范围

模型上边界崖门官冲站、虎跳门横山站、鸡啼门白蕉站、磨刀门竹银站、横门小榄水道与鸡鸦水道交汇处、洪奇门冯马庙站、蕉门下横水道与蕉门水道交汇处、虎门大虎站, 下边界到 -30 m 等深线。模型验证时全部采用三角形网格, 网格数目为 48 618。后面研究航道整治工程影响时, 为了减小计算工作量, 航道局部区域采用四边形网格进行加密。模型主要采用 2005—2008 年珠江河口实测水下地形, 部分外海区域由于缺乏最新的地形资料, 采用 1999 年地形数据。模型网格及水下地形见图 1、2。

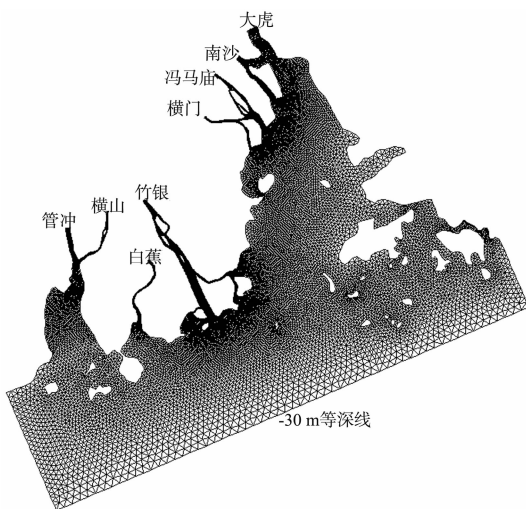


图 1 模型计算网格

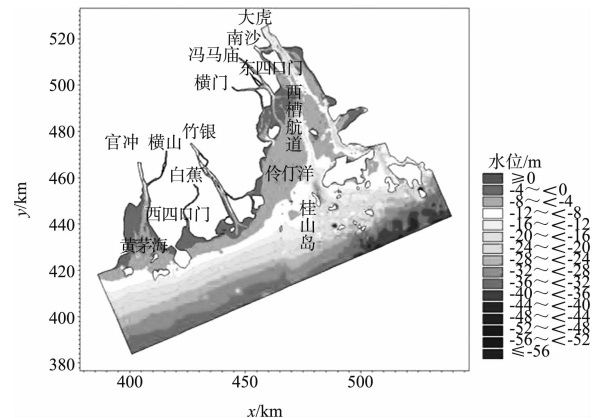


图 2 模型计算水下地形

1.2 计算基本方程

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:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial y} + \frac{\partial(uv)}{\partial x} + \frac{\partial(wu)}{\partial z} = -fv - g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0} \cdot \frac{\partial p_a}{\partial x} - \\ \frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial x} dz - \frac{1}{\rho_0 h} \left(\frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} \right) + F_u + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_t \frac{\partial u}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial(uv)}{\partial x} + \frac{\partial(wv)}{\partial z} = -fu - g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{1}{\rho_0} \cdot \frac{\partial p_a}{\partial y} - \\ \frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial y} dz - \frac{1}{\rho_0 h} \left(\frac{\partial s_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{yy}}{\partial y} \right) + F_v + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_t \frac{\partial v}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

盐度扩散方程:

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

式中: t 为时间; x 、 y 为直角坐标系坐标; η 为表面水位; 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 为静水深 $d + \eta = h$); 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; s_{xx} 、 s_{xy} 、 s_{yx} 和 s_{yy} 分别为各方向的波浪辐射应力 (N/m^2); T_{ij} 包括了黏性摩阻、湍流摩阻以及水平对流项, 用涡黏方程来估算为

$$T_{xx} = 2A \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \quad (5)$$

$$T_{xy} = A \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right) \quad (6)$$

$$T_{yy} = 2A \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \quad (7)$$

式中: D_v 为垂向湍流扩散系数; D_h 为水平扩散系数, 与涡黏系数有关; F_s 为水平扩散项; σ_T 是普朗特数。

$$D_h = \frac{A}{\sigma_T} \quad (8)$$

$$D_v = \frac{v_t}{\sigma_T} \quad (9)$$

$$F_s = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D_h \frac{\partial}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_h \frac{\partial}{\partial y} \right) \right] s \quad (10)$$

表面盐度边界条件:

$$Atz = \eta \quad (11)$$

$$\frac{\partial s}{\partial z} = 0 \quad (12)$$

底部盐度边界条件:

$$Atz = -d \quad (13)$$

$$\frac{\partial s}{\partial z} = 0 \quad (14)$$

垂向 $k-\varepsilon$ 湍流模型, 其涡黏系数是由湍流参数 k 和 ε 导出的:

$$v_t = \frac{c_\mu k^2}{\varepsilon} \quad (15)$$

式中: k 和 ε 分别为单位体积的湍流动能和其扩散系数; c_μ 为经验系数。

1.3 模型边界条件及参数

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^[5], 盐度边界根据外海观测的统计资料, 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^[6]。

模型计算时段为 2009-01-10T00:00 到 2009-01-13T23:00, 利用 2009 年枯季实测水文资料对模型进行率定与验证。

模型糙率采用的是河床突起高度, 确定口门处为 1 ~ 3 cm, 外海为 0.3 ~ 1 cm^[6]。模型计算时间步长为 10 s, 水平涡黏系数为 0.28, 垂向采用 $k-\varepsilon$ 模型计算。

1.4 模型的验证

根据 2009 年枯季水文数据对模型进行验证,

验证点位置见图 3。潮位验证点有西炮台站、黄金站、灯笼山站、三灶站、横门站、南沙站。在现有实测资料的基础上, 水动力、盐度验证采用磨刀门海域测点 $m1 \sim m8$, 伶仃洋海域附近测点 $h1 \sim h6$ 。由于本模型潮位、流速和流向、盐度验证图较多, 本文只节选部分测点盐度验证图 (图 4、5)。

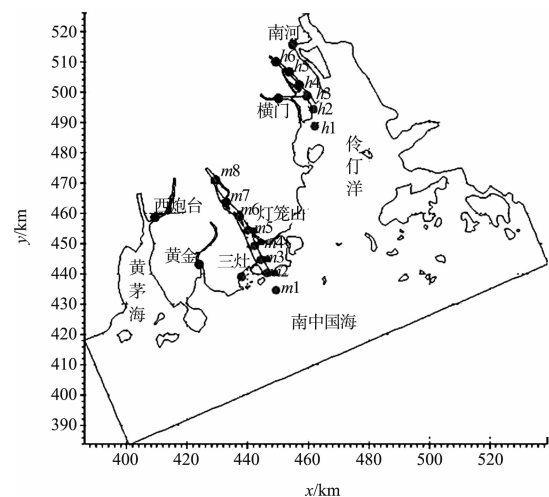


图 3 验证点位

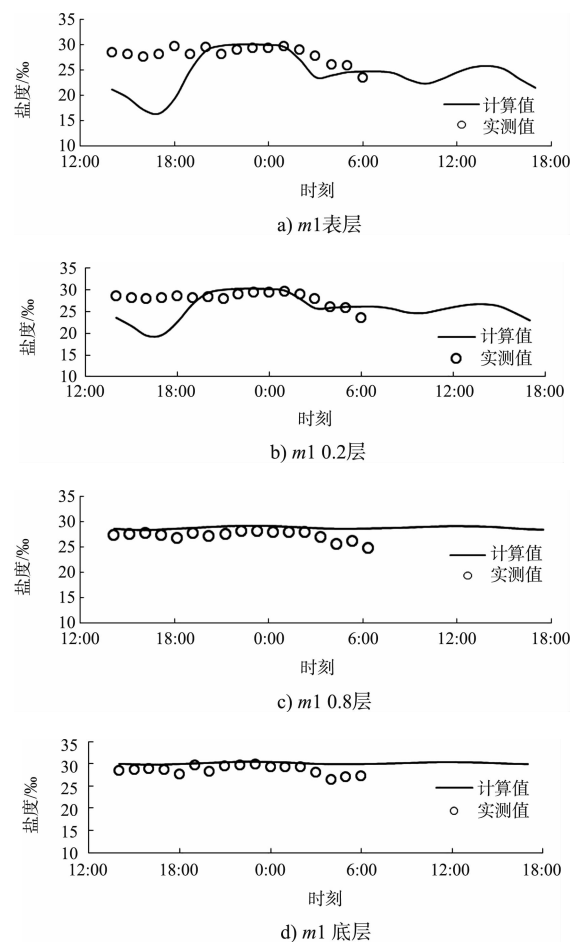


图 4 m1 盐度验证

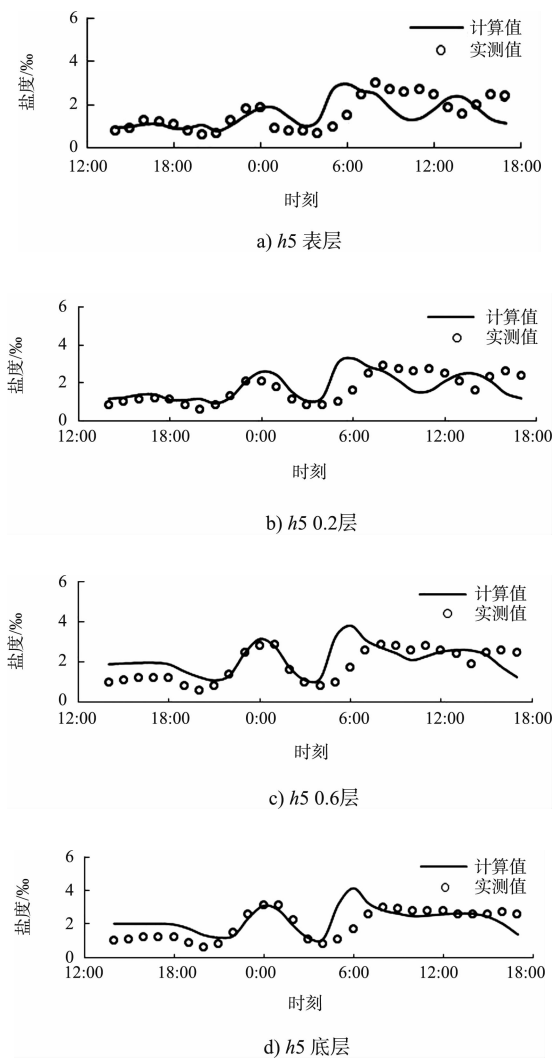


图 5 h5 盐度验证

2 磨刀门水流盐度特征

2.1 表底层流场特征

图 6 为 2009 年枯季磨刀门及其近海分层流场, 落潮流速大于涨潮流速, 落潮流呈现向西发散状态。外海复杂地形在落潮流与潮波相互叠加作用下, -12 m 等深线以外海域存在明显的顺时针旋转流。

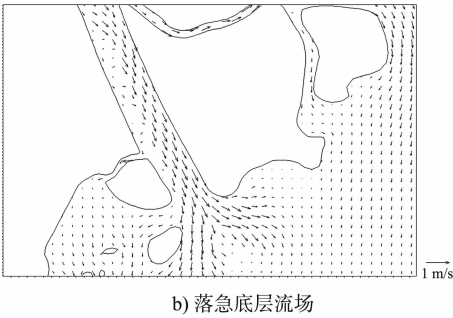
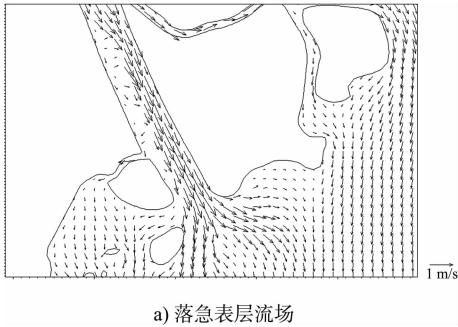


图 6 磨刀门及其近海分层流场

2.2 盐度垂向分布特征

图 7 是 2009 年枯季交杯沙与洪湾交汇处至口门位置涨憩时刻盐度纵断面分布。涨憩时刻表、底层盐度差将近 10‰, 部分断面咸淡水混合较好, 表、底层盐度相差不大, 可以看出越靠近河口区盐度的垂直分布越明显。大潮期间潮汐动力较强, 盐水与淡水混合充分, 垂向密度梯度较小, 沿河道纵断面方向存在明显的密度梯度差。底层含盐度高, 有明显的高浓度盐水上溯现象。涨憩时刻盐度线密集处垂直变化梯度约为 1‰, 盐度混合更加均匀, 底层高浓度盐水上溯距离加长。

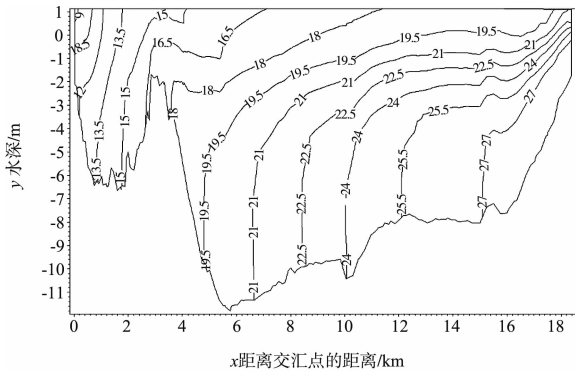
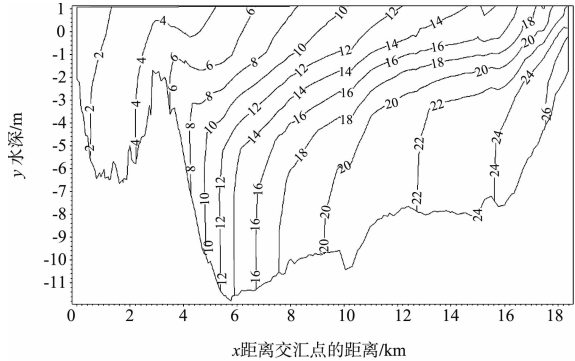


图 7 盐度纵断面 (盐度单位:‰)

盐度在纵断面上的垂直分布主要受咸、淡水的混合形式所控制，涨潮时密度较大的海流首先从底部楔入，淡水由表层流入，产生异重流分层现象。咸淡水掺混程度不同，沿河道纵断面垂线上不同水深处具有不同的盐度，从表层到底层，盐度值逐渐增大。底层盐度都在 20‰ 以上，并且底部高浓度咸水楔深入现象明显。

3 航道整治工程对珠江河口咸潮上溯的影响

3.1 航道整治工程区域概况

磨刀门出海航道由磨刀门水道和交杯沙水道组成，其中磨刀门水道从百顷头至灯笼沙尾，全长约 44 km。交杯沙水道从灯笼沙尾至交杯沙，长约 16 km，水流至石栏洲附近航道水深逐渐变小，目前仅为 2.5 m，维护航宽约为 50 m。

本研究在原始地形基础上，将交杯沙东汉分支航道中疏浚至 7.1 m。航道网加密网格及局部放大图见图 8。

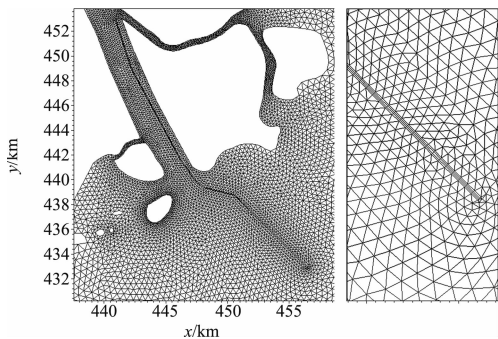


图 8 航道网加密网格及局部放大

3.2 工程前后水动力格局的变化

1) 流速变化对比。

为了对比分析工程前后磨刀门水道、交杯沙水道流速的变化，沿磨刀门水道选取 $m1 \sim m10$ 共 10 个测点，交杯沙东汉分支选取 $q1 \sim q12$ 共 12 测个点(图 9)。

由数值模拟结果可知，磨刀门水道工程后各点的流速以增加为主，涨憩、落憩时刻磨刀门水道下游流速有减小的情况。交杯沙水道 ($q1 \sim q6$) 各点的流速变化较小，涨急、涨憩、落急时刻的流速变化量一般在 5% 以下，落憩时刻工程前流速很小，工程后可能由于相位的变化该时刻不再是涨憩、落憩时刻，故流速增加较大，极个别时刻

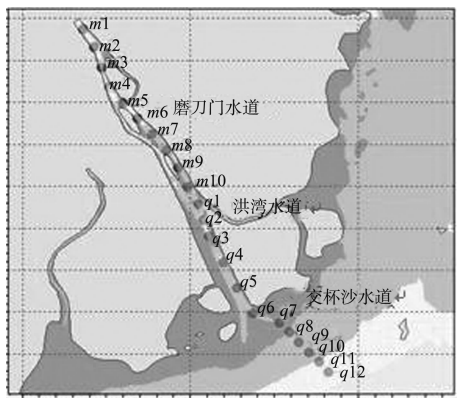
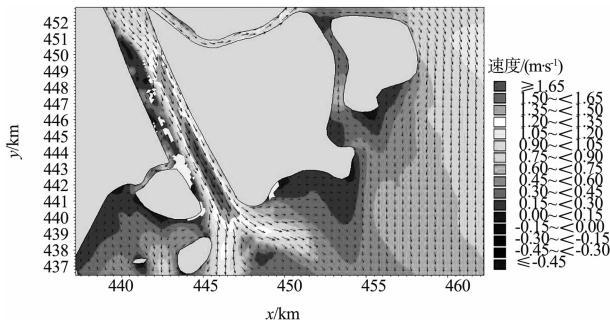


图 9 计算测点位置

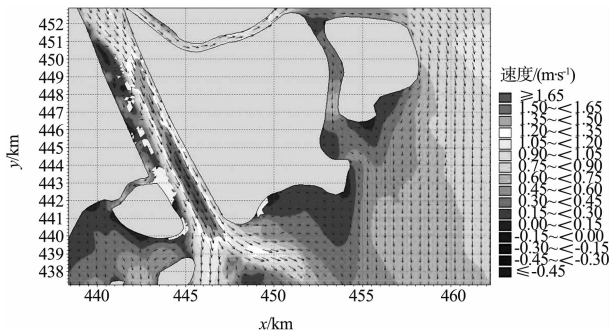
增长幅度为 60%。对于东汉航道 ($q7 \sim q12$)，处于拦门沙开挖较多的地段，流速变化一般在 5% ~ 20%，涨落憩时刻变化量相对较大，但变化的百分比一般在 30% 以下。总体上来看，东汉水道疏浚工程实施后，水深变大，分流比增大，流向变得趋向于航道深槽，有利于航道的维护。

2) 平面流场的变化对比。

取表层流场为代表，画出工程区域的局部流场矢量(图 10)和平面流场，以分析平面流态的变化。



a) 工程前



b) 工程后

图 10 工程前后落急流场

由图 10 可以看出，口门处航道疏浚位置附近流场发生明显变化，其他非工程区域流态变化较小。因此，工程对大范围流场影响较小，对疏浚

区域流态变化有一定的影响。退潮时, 水流在口门处发散, 交杯沙东汉分支由于深水航道疏浚挖深作用, 径流沿航道线方向流动, 分流明显增大。

3.3 工程前后盐度变化对比

1) 盐度变化对比。

盐度值取点位置与流速相同。磨刀门水道盐度大部分以增加为主, 靠近洪湾水道的测点盐度变化最为明显, 涨急、落急、落憩时刻盐度值变化范围一般在 5‰ 左右; 涨憩时刻盐度值在最大约为 15‰, 工程前后盐度变化的百分比在 10% 左右。交杯沙水道盐度值有所增加, 变化的百分比一般在 1% ~ 5%, 其中 q1 ~ q6 点盐度增加值相对较大。由于航道的疏浚作用, 涨憩时刻咸潮上溯距离加大, 落憩咸潮回落盐度值也有所增大。因此, 航道整治工程可能引起咸潮上溯距离有所增加, 枯水期对工农业生活用水有所影响。

2) 沿航道深槽盐度纵向对比。

以交杯沙与洪湾水道交汇口为起点, 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, 画出盐度纵向垂直断面分布, 进行工程前后的对比 (图 11)。

纵向断面图主要是用来研究盐水沿航道上溯的程度以及垂向上的一些变化。交杯沙水道盐度值有小幅度的增加, 垂向表现为中层变化较为明显。工程前, 表层等盐线分布较为密集, 而工程后在中层分布比较密集。由于航道疏浚区域主要在口外, 涨急时刻, 工程区域的 22‰ ~ 28‰ 盐度线向前推进 1 km 左右, 18‰ 盐度线上溯距离增加 300 m 左右。涨憩时刻盐度变化更加明显, 工程后盐度线垂向上有整体下移趋势, 工程前表层以下 -1.5 m 处盐度线密集, 工程后处于 -2 m 处, 底层 19‰ 盐度线上溯距离增大 3 km 左右, 盐水楔上溯距离有所增大。

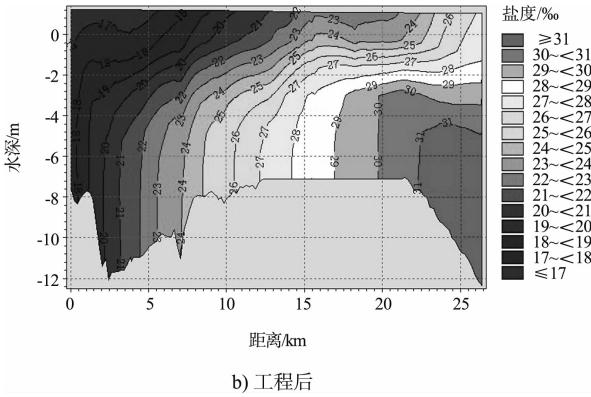
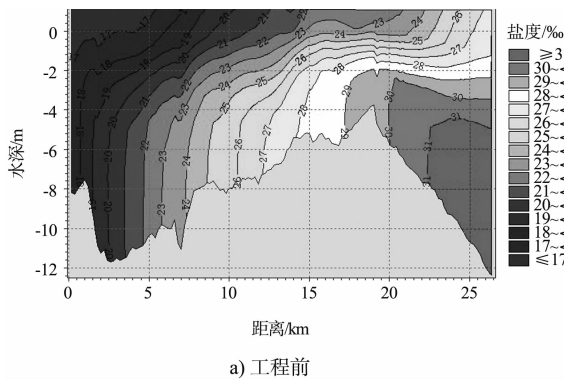


图 11 工程前后涨憩盐度纵断面变化

4 结论

1) 磨刀门海域落潮时流向向西发散, 落潮流速大于涨潮流速, 口门区 -12 m 等深线以外大部分为顺时针旋转流, 河道上游水流表现为往复流; 枯季大潮期, 底层盐度值比表层的盐度值大 40%, 咸淡水分层参数较大, 有明显的底层高浓度盐水上溯现象, 涨憩时刻盐度线密集并且垂直变化梯度大于 1/m, 咸潮上溯距离最远。

2) 工程后, 磨刀门口门区水深增大, 分流比增加, 磨刀门水道和交杯沙水道各点流速以增加为主, 流向趋向航道深槽, 有利于航道的维护; 盐度线上溯范围有所增大, 但底部高浓度盐土层向上游推进的距离不大, 因此磨刀门航道整治工程对盐水入侵影响程度较小, 不是造成珠江口门区盐水入侵加剧的决定性因素。

参考文献:

[1] Savenije H. Rapid assessment technique for salt intrusion in alluvial estuaries [R]. Delft: Hydraulics and Environmental Engineering, 1992.

[2] Essink G H P. Oude saltwater intrusion in 3D largebscale aquifers: A Dutch case[J]. Physics and Chemistry of the Earth: Part B, 2001, 26(4): 337-344.

[3] 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.

[4] 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: 769-788.

[5] 黄宗晓. 南海潮波数值模拟[D]. 南京: 河海大学, 2009.

[6] 杨明远, 严以新, 孔俊. 珠江口水流泥沙运动模拟研究[M]. 北京: 海洋出版社, 2008.

(本文编辑 武亚庆)