

岸线变化对钦江河口盐水入侵的影响

李珂珂¹, 邹华志², 张娜¹

(1. 中国海洋大学工程学院, 山东 青岛 266100; 2. 珠江水利科学研究院, 广东 广州 510611)

摘要: 本文基于 Delft3D 软件建立了钦江河口及附近海域三维水动力盐度数值模型, 并利用实测的数据资料进行了潮位、潮流和盐度的验证。验证结果表明, 本文所构建的三维数值模型, 能够较为准确地模拟茅尾海及钦州湾的水动力和盐淡水输移过程。然后, 根据模拟结果分析了茅尾海和钦州湾的潮流场特征。最后, 依据 2005 年和 2015 年岸线边界条件, 模拟了岸线变化和滩涂围垦工程对茅尾海和钦州湾盐淡水输移的影响。结果表明, 2005~2015 年间的岸线、滩涂围垦对茅尾海和钦州湾的盐、淡水输移产生了一定影响。

关键词: 岸线变化; 钦江河口; 盐水入侵

中图分类号: P731.12

文献标识码: A

文章编号: 1006—7973 (2020) 07—0124—04

河口是河流向海洋的过渡段, 受到河流和海洋两种动力作用。盐水入侵^[1]是由于河口邻近海域的高盐水团随涨潮流沿着潮汐通道向上游推进, 盐淡水混合使河口上游区域水体出现变咸的现象, 对沿途区域的水环境、农业灌溉和生活供水等产生重要影响。研究河口的盐水入侵规律, 有利于深入了解河口地区盐度输移规律与物质输移规律, 探索开发沿海地区的淡水资源, 防止盐水入侵进一步恶化, 对河口开发整治和河口地区的工农业生产也具有非常重要的意义。近些年, 许多学者对长江口、珠江口、钱塘江口、南渡江河口和密西西比河河口等河口的盐水入侵问题^[2-6], 以及重大工程、河口河势、气候改变和动力因素对盐水入侵的影响^[7]做了详细探讨。本文基于 Delft3D 软件模拟了岸线变化和滩涂围垦工程对茅尾海和钦州湾盐淡水输移的影响。

加强对船体的维护, 定期刮擦船体附着物, 保持船体的光洁度; 为降低船舶的油耗, 应保持合适的吃水和吃水差, 以提高船舶的快速性。同时应从管理层面建立激励机制, 实行船舶维护保养、油耗率与奖罚挂钩, 激励船员积极进行船舶的维护保养, 鼓励船员钻研业务, 改善操作习惯。

5 结语

本文分析了全回转式调距桨港作船油耗的影响因素, 进而提出了降低油耗的对策, 可供拖船在实际操作时作为参考。不同工况下螺距与主机转速最佳匹配, 是影响油耗的关键, 将是下一步的研究重点。

参考文献:

- [1] 冯树强. 船舶引航中的节能降耗措施 [J]. 中国水运, 2016, No.507(04):70-71.
- [2] 潘永良. 港口作业船舶节能降耗的实践与效果 [J]. 船舶节能, 1996(3):31-35.
- [3] 王伟. 合理利用船舶最佳吃水节能降耗 [J]. 中国水运(下

1 三维数值模型的建立

1.1 控制方程

水平方向上采用的是正交曲线坐标 (ξ, η) :

$$\xi = \lambda, \quad \eta = \phi$$

$$\sigma = \frac{z - \zeta}{d + \zeta} = \frac{z - \zeta}{H}$$

式中: λ 是经度, ϕ 是纬度, z 是物理上的垂向坐标, ζ 是参考面 ($z=0$) 以上的水位, d 是低于参考面以下的水深, H 是总水深, σ 变化范围为 $[-1, 0]$ 。

沿水深积分的连续性方程:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial [(d + \zeta) U \sqrt{G_{\eta\eta}}]}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial [(d + \zeta) V \sqrt{G_{\xi\xi}}]}{\partial \eta} = (d + \zeta) Q$$

半月), 2013(12):13-17.

[4] 曹用顺. 船舶柴油机节能减排技术 [J]. 石油工程建设, 2011, 37(S1):91-93+9.

[5] 陆汉林. 采用经济航速是节能的最佳途径 [J]. 港口科技动态, 1991(1):23-24, 26.

[6] 莫司丞. 粤海火车渡轮燃油消耗原因分析与对策研究 [D]. 西南交通大学, 2013.

[7] 张琳. 浅谈拖船节能降耗的途径 [J]. 交通财会, 2011(08):68-72.

[8] 王莹. 船用调距桨推进性能分析 [D]. 集美大学, 2015.

[9] 杨智强. 基于 STAR-CCM+ 和 Fluent 的可调螺距螺旋桨的水动力性能研究 [D]. 2016.

[10] 船舶操纵 [M]. 大连海事大学出版社, 洪碧光, 2008.

[11] 蔡学廉. 可调螺距螺旋桨的螺距与转速匹配 [J]. 渔业现代化, 1979(02):26-29.

基金项目: “湛江消拖 601” 轮机桨协调控制策略的研究 (LT18JS001)

式中： Δt 为时间步长； $\sqrt{G_{\xi\xi}}$ 为 ξ 方向上的坐标交换系数， $\sqrt{G_{\eta\eta}}$ 为 η 方向上的坐标交换系数， $\sqrt{G_{\xi\xi}}=R\cos\phi$ ， $\sqrt{G_{\eta\eta}}=R$ ； U 和 V 为 ξ 和 η 方向的平均速度； Q 为单位面积的源或汇流量， $Q=\int(q_{in}-q_{out})d\sigma+P-E$ ， P 为降雨， E 为蒸发。

ξ 方向上的动量方程：

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{w}{d+\zeta} \frac{\partial u}{\partial \sigma} + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} - \frac{v^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} - fv = -\frac{1}{\rho_0\sqrt{G_{\xi\xi}}} P_{\xi} + F_{\xi} + \frac{1}{(d+\zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} (v_{\nu} \frac{\partial u}{\partial \sigma}) + M_{\xi}$$

η 方向上的动量方程：

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{w}{d+\zeta} \frac{\partial v}{\partial \sigma} + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} - \frac{u^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} + fv = -\frac{1}{\rho_0\sqrt{G_{\eta\eta}}} P_{\eta} + F_{\eta} + \frac{1}{(d+\zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} (v_{\nu} \frac{\partial v}{\partial \sigma}) + M_{\eta}$$

垂向速度 w 由连续方程求得：

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial [(d+\zeta)u\sqrt{G_{\eta\eta}}]}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial [(d+\zeta)v\sqrt{G_{\xi\xi}}]}{\partial \eta} + \frac{\partial w}{\partial \sigma} = H(q_{in} - q_{out})$$

式中： u 、 v 、 w 是 ξ 、 η 、 σ 方向上的流速； f 是科氏系数； M_{ξ} 和 M_{η} 是 ξ 和 η 方向上的动量变化； F_{ξ} 和 F_{η} 是 ξ 和 η 方向上的紊动动量通量； P_{ξ} 和 P_{η} 是 ξ 和 η 方向上的压强梯度； ρ_0 是水体密度； v_{ν} 是垂向紊动系数。

盐度守恒方程：

$$\frac{\partial [(d+\zeta)S]}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \left\{ \frac{\partial [(d+\zeta)u\sqrt{G_{\eta\eta}}S]}{\partial \xi} + \frac{\partial [(d+\zeta)v\sqrt{G_{\xi\xi}}S]}{\partial \eta} \right\} + \frac{\partial (wS)}{\partial \sigma} = \frac{d+\zeta}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \left\{ \frac{\partial}{\partial \xi} \left[D_H \frac{\sqrt{G_{\eta\eta}}}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial S}{\partial \xi} \right] + \frac{\partial}{\partial \eta} \left[D_H \frac{\sqrt{G_{\xi\xi}}}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial S}{\partial \eta} \right] \right\} + \frac{1}{d+\zeta} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[D_V \frac{\partial S}{\partial \sigma} \right] - \lambda_{\nu} (d+\zeta)S + C$$

式中： D_H 和 D_V 是水平和垂向紊动扩散系数， S 是盐度。

1.2 计算范围及参数设置

钦州湾是我国南海北部湾的一部分，位于广西南部，由内湾（茅尾海）和外湾（狭义上的钦州湾）组成。湾内岛屿众多，岸线曲折，是一个典型的半封闭型天然海湾。茅尾海顶部自西向东依次有茅岭江、大榄江和钦江汇入，承接上游河道下泄径流，对钦州湾的水体具有冲淡水作用。

计算区域为东经 $108.2^{\circ} \sim 109.2^{\circ}$ ，北纬 $21.26^{\circ} \sim 22.01^{\circ}$ 。河流边界分别至青年水闸和黄屋屯站，外海开边界至水深20米等深线处。模型计算网格如图1所示，模型计算网格采用正交曲线网格，网格总数为26821，最大网格间距为1608米，最小网格间距为13米。垂向计算网格均匀分为5层。

模型的初始水位、流速设为零，初始盐度值为

33psu，温度为 $25^{\circ}C$ 。模型的外海开边界采用水位边界条件，强迫类型为天文潮，采用 M_2 、 S_2 、 N_2 、 K_2 、 K_1 、 O_1 、 P_1 、 Q_1 分潮。外海边界盐度取33psu，上游河流开边界取0psu。底床粗糙度采用曼宁系数 n ，取为 $0.02 s/m^{1/3}$ 。水平和垂向涡粘性系数分别取 $10 m^2/s$ 、 $1.0 \times 10^{-6} m^2/s$ ，水平和垂向扩散系数分别取 $50 m^2/s$ 、 $0.001 m^2/s$ 。紊流模型采用 $k-Epsilon$ 模型。时间步长为1分钟。

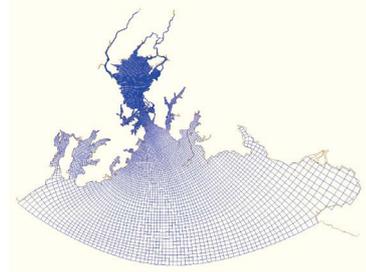


图1 模型计算网格

1.3 模型验证

本文分别利用国家海洋局第三研究所和珠江水利科学研究所测得的数据对潮位（2010年1月27日~2月4日）、潮流和盐度（2016年6月19~20日、6月23日~24日和6月28~29日）进行模型验证，潮位验证点分别为沙井站、龙门站、钦州站。潮流和盐度的验证点分别为1~6测站。验证点位置如图2所示。

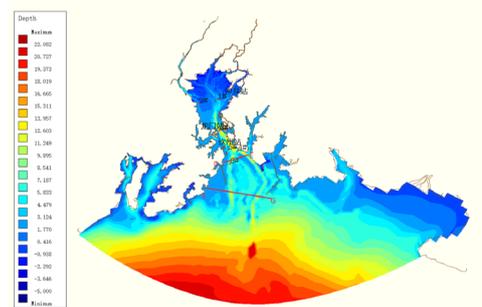


图2 水文观测站点分布示意图

由于测站较多，本文只列出部分测站潮位、潮流和盐度的验证曲线图，如图3~图5。整体而言，模型计算所得潮位、流速流向、盐度与实测值基本吻合。由于河流和外海开边界条件、一些随时间和空间变化的参数等无法准确给出，所以导致模拟值与实测值存在一定的误差。

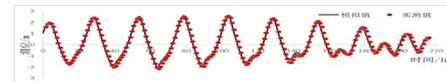


图3 龙门站潮位验证曲线



图4 4#测站中潮表层流速、流向计算值与实测值时间序列对比图

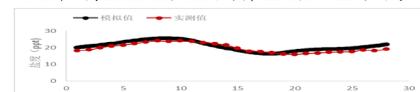


图5 4#测站中潮表层盐度计算值与实测值时间序列对比图

1.4 潮流场分析

从涨、落急时刻表、底层流场图 6 和图 7 可以看出，涨急时刻表、底层涨潮流的流势基本一致，外海涨潮流流向为 NE 向，进入喇叭形湾口后呈逆时针方向偏转，受岸线约束，至峡口通道处涨潮流流路较为集中，流速较大，涨潮流以 WN 向进入茅尾海，受水域面积扩大影响，涨潮流在茅尾海水域向东西两侧分流扩散；落急时刻表、底层涨潮流的流势也保持基本一致，茅尾海内落潮流主流通过水深较大的潮沟向出口汇聚，在峡口通道内落潮流流向为 SE 向，出峡口通道后，水域范围逐渐扩大，落潮流呈放射状扩散，之后逐渐向西偏转，湾口外落潮流流向大致呈西偏南方向。

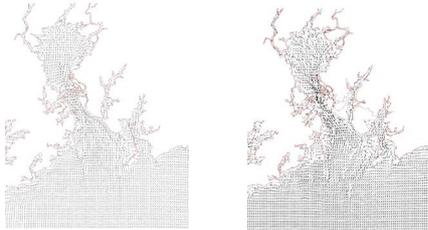


图 6 涨急时刻表 (左)、底 (右) 层流场图



图 7 落急时刻表 (左)、底 (右) 层流场图

2 结果与讨论

为了分析岸线变化和滩涂围垦工程对茅尾海和钦州湾盐淡水输移的影响，分别依据 2005 年和 2015 年岸线边界，开展了两种工况的计算，两种计算工况分别简称为“F2005”和“F2015”，各计算工况的岸线如图 8 所示。

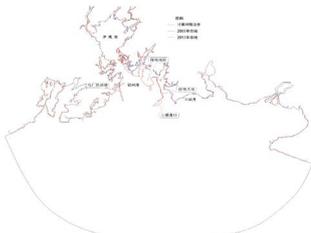


图 8 2005 年和 2015 年的岸线边界

2.1 平面盐度分布

对于 F2005 和 F2015 两种计算工况，这里分别给出了大潮期间涨、落憩时刻的表层盐度平面分布图，如图 9 所示。

大潮涨憩时刻，两种工况下外海高盐水都能上溯到较远位置。F2005 计算工况下，茅尾海北部水域盐度基本小于 7psu，中部和南部水域盐度则相对较大，盐度值约为 10 ~ 20psu，在茅尾海与钦州湾之间的狭窄通道

内，盐度值最高可达 24psu；钦州湾水域，盐度值介于 24 ~ 31psu 之间，盐度大小与水深相关，东侧航道和西侧潮汐通道位置盐度略高；钦州湾西侧水域盐度值则明显较小，近岸水域盐度值低于 25psu，且盐度等值线基本呈东 - 西走势，钦州湾外侧水域盐度高达 32psu。

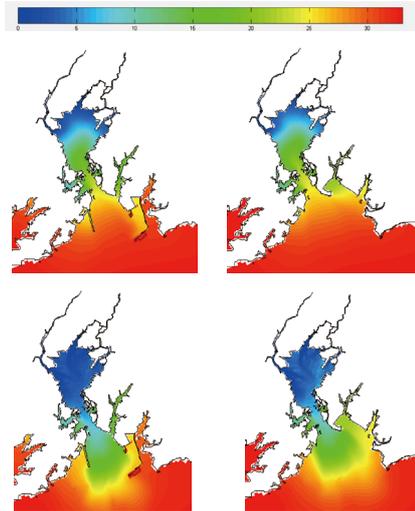


图 9 大潮涨憩 (上)、落憩 (下) 的表层盐度平面分布图 (左: F2015, 右: F2005)

F2015 计算工况下，茅尾海和钦州湾外水域，表层盐度的整体平面分布情况与 F2005 计算工况相似，而钦州湾水域的盐度分布则有明显差别。受三墩港口及其进港大道的掩护作用影响，钦州湾东南侧的高盐水体进入钦州湾的通道受阻，因此三墩港口及其进港大道两侧水域表层盐度差别明显，东侧水域盐度值可超过 30psu，西侧水域盐度值则在 25psu 左右。同样，钦州湾西岸，受电厂防波堤影响，防波堤西侧近岸水域盐度值较 F2005 计算工况有明显降低，涨停时刻最小盐度值为 23psu 左右。由于进港大道和电厂防波堤的影响，F2015 计算工况下，外海高盐水体侵入茅尾海的距离，明显减小，强度也比 F2005 计算工况弱。

落憩时刻代表冲淡水扩散的最大范围，两种计算工况下，整体而言表层冲淡水的范围都比较大，出河口湾后向两侧扩散，有明显的西偏输移现象，受此影响，钦州湾外西侧近岸水域盐度值较小，东侧近岸水域盐度值则相对较大，在三墩港口西南侧水域可见明显的冲淡水团和高盐水团的分界线，分界线走势逐渐由东北 - 西南走势偏转为东 - 西走势。两组计算工况相比，受电厂防波堤、三墩港口及其进港大道阻水影响，与 F2005 工况相比，F2015 工况下冲淡水范围的东 - 西向宽度变窄，南 - 北向长度变大，同时冲淡水团的西偏输移更为明显。

2.2 垂向盐度分布

为分析垂向盐度分布特征，布置了 2 个垂向盐度断面，位置如图 2 所示，小潮期间断面的涨、落急时刻的垂向盐度分布如图 10 和图 11 所示。

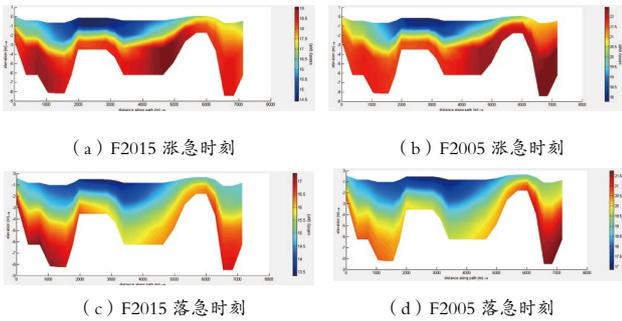


图 10 断面 D-E 垂向盐度分布图

断面 D-E 为横跨钦州湾顶部的横向断面，从地形来看，断面 D-E 东西两侧分别为航道和涨落潮通道，中部为浅滩。由垂向盐度分布图可以看出，F2015 工况下，断面盐度值整体都有所下降。在钦州保税港区、三墩港口和进港大道围垦建设前，断面东侧盐度比较大，涨潮期间底层盐度值可超过 22psu；而 F2015 工况计算结果显示，涨、落潮期间断面 D-E 东侧的盐度值均明显降低，由此可见，三墩港口和进港大道对外海高盐水入侵的掩护作用是非常明显的。

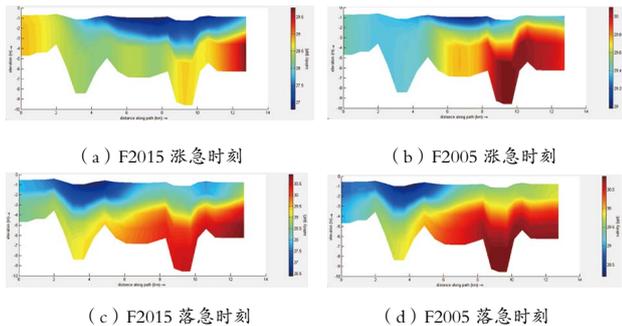


图 11 断面 F-G 垂向盐度分布图

断面 F-G 位于钦州湾底部，从其断面垂向盐度分布来看，落潮阶段表层冲淡水主要经由断面中部向外海扩散。落急时刻，水深较大的航道和潮汐通道位置底层盐度较大，断面表层盐度整体呈“中间小两端大”的分布趋势，可见表层冲淡水主要通过断面 F-G 中部位置向外海扩散，表层冲淡水羽流的主流就位于断面中部位置。另外，从两种计算工况的对比来看，受电厂防波堤和三墩港口及其进港大道的束流作用影响，表层冲淡水的主流在断面 F-G 更为集中，F2015 工况下，表层冲淡水的横向范围更小，厚度更大。

3 结论

本文依据 2005 年和 2015 年岸线边界条件，模拟了岸线变化和滩涂围垦工程对茅尾海和钦州湾盐淡水输移的影响。结果表明，2005~2015 年间的岸线、滩涂围垦，对茅尾海和钦州湾的盐、淡水输移产生了一定影响。涨潮阶段，受电厂防波堤、三墩港口、进港大道等的掩护

作用影响，高盐水的入侵受到一定的阻挡，导致高盐水入侵茅尾海的强度和距离均明显减小，整体而言，茅尾海和钦州湾水域的盐度均有所下降；落潮阶段，受上述围垦工程影响，钦州湾落潮断面宽度变小，对落潮流起到一定的束流作用，落潮流流速增大，导致表层冲淡水向外海输移扩散的纵向距离增大，横向范围变窄，同时表层冲淡水的西偏移程度也有所增强。

参考文献：

- [1] 刘忠辉, 宏波. 海平面上升对珠江河口东四口门盐水入侵的影响 [J]. 人民珠江, 2019, 40(05): 43-49+81.
- [2] 沈焕庭, 茅志昌等. 长江河口盐水入侵 [M]. 北京: 海洋出版社, 2003.
- [3] 王彪. 珠江河口盐水入侵 [D]. 华东师范大学, 2011.
- [4] 李光辉. 钱塘江河口盐水入侵数值模拟 [D]. 浙江大学, 2017.
- [5] 赵军鹏, 龚文平, 王道儒. 海南岛南渡江河口的盐水入侵 [J]. 海洋学报 (中文版), 2013, 35(05): 14-28.
- [6] Rice Karen C, Hong Bo, Shen Jian. Assessment of salinity intrusion in the James and Chickahominy Rivers as a result of simulated sea-level rise in Chesapeake Bay, East Coast, USA. [J]. Journal of environmental management, 2012, 111.
- [7] 袁诚. 长江河口盐水入侵对气候变化和重大工程的响应 [D]. 华东师范大学, 2014.