

钦州湾湾口填海对茅尾海水交换能力的影响

郭雅琼^{1,2}, 马进荣¹, 邹国良¹, 梁群³

(1. 南京水利科学研究所, 港口航道泥沙工程交通行业重点实验室, 江苏 南京 210024;

2. 河海大学 港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098; 3. 广西壮族自治区海洋局, 广西 南宁 530012)

摘要:以溶解态的保守物质作为示踪剂, 建立茅尾海水交换平面二维数学模型, 采用开边界污染物浓度梯度与内侧一致假定考虑了边界污染物回归, 计算分析了钦州湾湾口两侧大范围填海工程对茅尾海纳潮量和水体半交换周期的影响情况。研究表明: 龙门海峡通道顺畅是维持茅尾海纳潮量的关键因素, 湾口宽度保持 9.4 km 以上茅尾海内纳潮量和水体半交换周期基本不受湾口填海工程影响。

关键词: 钦州湾; 茅尾海; 填海工程; 纳潮量; 水交换

中图分类号: P 731.2; U 65

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)06-0084-09

Effect of reclamation of Qinzhou bay mouth on water exchange in Maowei sea

GUO Ya-qiong^{1,2}, MA Jin-rong¹, ZOU Guo-liang¹, LIANG Qun³

(1.Key Sediment Research Lab of Harbors and Waterways of the Ministry of Communications, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China; 2.State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3.The Ocean Administration of Guangxi, Nanning 530012, China)

Abstract: The two-dimensional mathematical model for water exchange in Maowei sea is established using the dissolved conservative material as the tracer. The pollutions are fed back at boundary under assumption that the gradient of pollutant concentration is the same both inside and outside the boundary. Based on the validation of the mathematical model, the effect on the volume of tidal prism and water change of Maowei sea is calculated and analyzed by the reclamation of the Qinzhou bay mouth. Results indicate that the width of Longmen strait is the key factor for keeping the volume of tidal prism of Maowei sea. The reclamation engineering in both sides of Qinzhou bay mouth keep the width over 9.4 km and has little effect on the water half-exchange period and the tidal prism of the Maowei sea.

Keywords: Qinzhou bay ; Maowei sea ; reclamation engineering; tidal prism; water exchange

钦州湾位于北部湾顶部中段, 由内湾、外湾构成, 东、西、北 3 面为陆地环绕, 南面与北部湾相通, 是一个半封闭型天然海湾^[1]。茅尾海属于钦州湾内湾, 内宽口窄, 东北和西北分别有钦江和茅岭江入注。茅尾海水质优良, 是中国最大的近江牡蛎天然苗种生产基地^[2], 其红树林保护区是钦州湾最大片的红树林群落, 另外茅尾海纳潮量是钦州港深水航道维护的主要动力因素。自 2006 年以

来, 钦州外湾两岸大量的围填海工程建设, 使得海岸线向海推进, 湾口宽度由天然的 29 km 缩窄到 16.5 km, 2012 年 5 月广西壮族自治区人民政府批复的钦州港总体规划(简称批复规划)围填海总面积超过 54 km², 后又新增的规划填海工程大多布置在湾口及外海, 如湾口东侧的三墩扩区、西侧的企沙离岸岛项目(图 1), 湾口宽度进一步

收稿日期: 2015-12-29

作者简介: 郭雅琼(1987—), 女, 博士研究生, 从事河口、近海工程动力环境和泥沙数值计算。

缩窄到 9.4 km。海湾内接纳污染物总量呈增加趋势, 茅尾海的生态环境如何确保成为学术界和相关政府部门共同关注的热点问题。海水交换能力是表征海湾物理自净能力和环境质量的重要指标, 针对湾口两侧填海项目对茅尾海纳潮量和水交换能力的影响进行研究, 对于湾口两侧海洋工程项目的规划实施具有现实指导作用^[3]。

近年来张坤等^[4-8]用不同方法对钦州湾或茅尾海的水交换能力进行过研究, 但均是对 2008—2013 年钦州湾自然岸线形态或湾内部分规划填海情况下的水体交换能力进行的研究, 对于最新批复的钦州港总体规划和新增的湾口规划项目均没有进行过相关研究, 尚不能解决钦州湾总体规划大规模填海工程对内湾纳潮量、水体交换能力等因素的影响问题。本文在钦州湾实测地形资料和水文测验资料^[9]基础上建立平面二维潮流数学模型, 计算分析了在钦州港总体规划基础上湾口两侧新增填海工程对茅尾海纳潮量影响, 并利用溶解态保守物质的对流扩散模型模拟计算湾口填海工程对茅尾海水交换能力影响, 为钦州湾的合理开发利用及可持续发展提供较全面的科学依据。

1 研究区域概况

1.1 钦州湾填海规划

钦州港的批复规划见图 1, 其中龙门港区、金谷港区和榄欉坪港区(钦州保税港区)是钦州港重点发展的枢纽港区, 分别位于钦州湾西北段、北段和东段, 规划用地面积分别为 1.8、10.2、42.4 km², 总面积约 54.3 km²。在此基础上拟在钦州湾湾口两侧新增三墩扩区、企沙离岸岛项目, 围填海总面积约 68 km²。

1.2 钦州湾地形特点

茅尾海南北纵深约 17 km, 东西最宽为 15 km, 面积约 135 km²(0 m 等深线以上面积约 80 km²), 潮间浅滩十分发育, 广泛发育的潮汐盆道呈发散状向西北、北、东北延伸, 水深大都小于 2 m, 茅尾海纳潮量达 $3.0 \times 10^8 \sim 7.1 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

从亚公山至青菜头之间湾颈的潮汐主通道岸

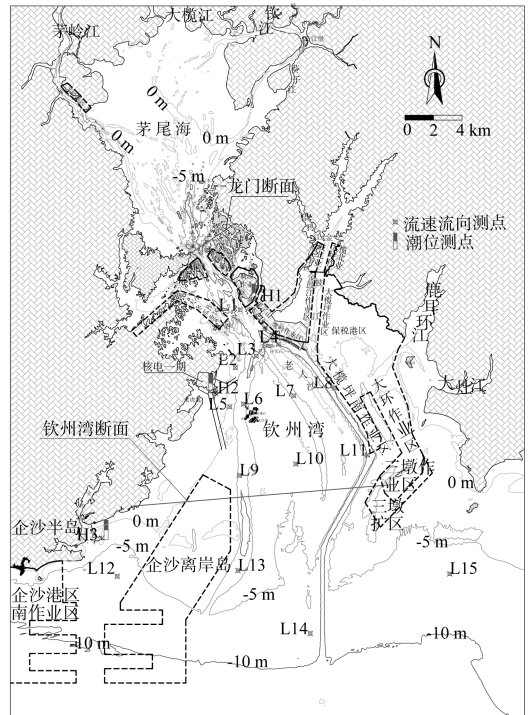


图 1 钦州湾总体规划布置

线长约 8 km, 水域宽达 1~2 km, 水深为 5~20 m。外湾自青菜头向南呈喇叭形展布, 外湾潮流脊中规模较大为老人沙, 低潮可部分露出水面。湾内呈“三槽四滩”格局, “三槽”分别为东、中、西水道, “四滩”为东滩、中滩 I (东)、中滩 II (西) 和西滩^[10]。东水道自然水深达 5~27 m; 中水道相对宽浅, 自然水深为 5~8 m, 涨、落潮流是分散的; 西水道是以落潮流为主体塑造的潮沟, 槽宽水浅, 自然水深为 5~15 m。

1.3 潮汐潮流特性

钦州湾潮汐属正规全日潮, 湾内日不等现象显著, 涨、落潮历时也不相等, 涨潮历时大于落潮历时。龙门站多年平均潮差 2.40 m, 最大潮差 5.95 m。潮波自湾口向内湾传播, 湾内以往复流为主, 湾口及外海区域旋转性强于湾内。根据现场水文测验资料^[9], 较大的涨、落急流速一般出现在主水道内, 青菜头至亚公山水域潮流明显强于其他区域。

2 平面二维数学模型

在平面二维潮流数学模型基础上增加保守物质输运方程, 建立浓度示踪剂法的水交换数学模

型, 计算分析钦州湾湾口围填海工程建设对茅尾海纳潮量和水交换能力的影响。

2.1 基本方程

计算所采用的连续方程、动量方程和污染物输运方程如下:

1) 连续方程。

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{C_\xi C_\eta} \left[\frac{\partial}{\partial \xi} (DuC_\eta) + \frac{\partial}{\partial \eta} (DvC_\xi) \right] = q \quad (1)$$

2) 动量方程。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{C_\xi} \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{v}{C_\eta} \frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{uv}{C_\xi C_\eta} \frac{\partial C_\xi}{\partial \eta} - \frac{v^2}{C_\xi C_\eta} \frac{\partial C_\eta}{\partial \xi} = fv -$$

$$\frac{g}{C_\xi} \frac{\partial \zeta}{\partial \xi} + E_\xi \left(\frac{1}{C_\xi} \frac{\partial A}{\partial \xi} - \frac{1}{C_\eta} \frac{\partial B}{\partial \eta} \right) - \frac{gu}{C^2 D} \sqrt{u^2 + v^2} + \frac{qu_*}{D}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{C_\xi} \frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{v}{C_\eta} \frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{uv}{C_\xi C_\eta} \frac{\partial C_\eta}{\partial \xi} - \frac{u^2}{C_\xi C_\eta} \frac{\partial C_\xi}{\partial \eta} =$$

$$-fv - \frac{g}{C_\eta} \frac{\partial \zeta}{\partial \eta} + E_\eta \left(\frac{1}{C_\xi} \frac{\partial B}{\partial \xi} + \frac{1}{C_\eta} \frac{\partial A}{\partial \eta} \right) - \frac{gv}{C^2 D} \sqrt{u^2 + v^2} + \frac{qv_*}{D} \quad (2)$$

其中:

$$A = \frac{1}{C_\xi C_\eta} \left[\frac{\partial}{\partial \xi} (C_\eta u) + \frac{\partial}{\partial \eta} (C_\xi v) \right] \quad (4)$$

$$B = \frac{1}{C_\xi C_\eta} \left[\frac{\partial}{\partial \xi} (C_\eta v) - \frac{\partial}{\partial \eta} (C_\xi u) \right] \quad (5)$$

式中: t 为时间; D 为总水深, $D = \zeta + h$, ζ 为水位, h 为水深; ξ 、 η 分别为正交贴体坐标的纵、横向计算网格方向; u 、 v 分别为沿 ξ 、 η 的水流速度分量; C_ξ 、 C_η 为拉梅系数; $f = 2\omega \sin\varphi$ 为科氏力系数 (ω 为地球自转角速度); E_ξ 、 E_η 为水平涡黏扩散系数; C 为谢才系数, $C = \frac{1}{n} (h + \zeta)^{\frac{1}{6}}$, n 为曼宁系数; g 为重力加速度。 q 为单位面积上的源汇强度 (包括取水、排水及污染物排放流量), u_* 、 v_* 为源汇节点周边 ξ 、 η 方向流速。

3) 对流扩散方程。

$$\frac{\partial (DS)}{\partial t} + \frac{1}{C_\xi C_\eta} \left[\frac{\partial}{\partial \xi} (DSuC_\eta) + \frac{\partial}{\partial \eta} (DSvC_\xi) \right] =$$

$$\frac{1}{C_\xi C_\eta} \left[\frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{C_\eta}{C_\xi} D \varepsilon_\xi \frac{\partial S}{\partial \xi} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{C_\xi}{C_\eta} D \varepsilon_\eta \frac{\partial S}{\partial \eta} \right) \right] - K_s DS + Q$$

(6)

式中: S 为单位体积内的污染物含量; K_s 为污染

物降解系数, 保守计算时不考虑降解; Q 为源项, 为单位时间单位面积上的内污染物排放量; ε_ξ 、 ε_η 分别为 ξ 、 η 方向扩散系数。 ε_ξ 、 ε_η 取值对污染物的扩散分布有一定的影响, 很多学者对该参数取值进行过研究, 方神光^[11] 在研究伶仃洋水域水体交换时, 对 0.1、1、10、100 这 4 种取值作过较细致的比较, 研究认为: 一般取值 10 以内的差别不大, 取值 100 与 10 相比较, 水交换率差别可达 20% 左右。本次研究水交换率计算时取值为 1.0。

2.2 定解条件

2.2.1 初始条件

1) 计算开始时, 整个计算域各点的水位、流速值就是计算的初始条件, 即:

$$\begin{cases} u(t, \xi, \eta) |_{t=t_0} = u_0(\xi, \eta) \\ v(t, \xi, \eta) |_{t=t_0} = v_0(\xi, \eta) \\ \zeta(t, \xi, \eta) |_{t=t_0} = \zeta_0(\xi, \eta) \end{cases} \quad (7)$$

式中: u_0 、 v_0 、 ζ_0 分别为初始流速和潮位, 潮位、流速初始值通常取常数; t_0 为起始计算时间。初始值通过估算给出, 与实际值并不一致, 经过一定时间后, 初始值的误差在计算过程中随时间而逐渐消失。

2) 关注区域茅尾海内水体示踪剂初值浓度 C 为 1 mg/L, 计算域范围其他水体示踪剂浓度为 0 mg/L。

2.2.2 边界条件

1) 开边界 Γ_0 采用水位边界:

$$\zeta |_{\Gamma_0} = \zeta(t, \xi, \eta) \quad (8)$$

式中: ζ 为水边界上的潮位值。对于闭边界 Γ_c 采用不可入条件, 法向流速为 0, 即 $v_n = 0$, n 为边界的外法向。

2) 污染物固边界采用不可入条件, 即污染物扩散法向浓度梯度为 0。

$$\frac{\partial S}{\partial n} = 0 \quad (9)$$

污染物开边界, 边界出流时:

$$\frac{\partial (DS)}{\partial t} + \frac{1}{C_\xi C_\eta} \left[\frac{\partial}{\partial \xi} (DSuC_\eta) + \frac{\partial}{\partial \eta} (DSvC_\xi) \right] = 0 \quad (10)$$

采用浓度示踪法时, 当示踪剂扩散范围较小,

其运动范围尚未到模型边界时, 计算精度有保证; 当关注区域很大时, 随着计算时间延长, 示踪剂必然会扩散输运到边界附近(增大模型范围只是示踪剂到达边界的时间延长), 边界应考虑示踪剂回归影响, 本文计算时采用开边界污染物梯度与内侧一致假定考虑了边界污染物回归, 即假定污染物梯度与内侧一致的边界条件:

$$\frac{\partial^2}{\partial \xi^2}(DSuC_\eta) = 0 \quad (11)$$

$$\frac{\partial^2}{\partial \eta^2}(DSuC_\xi) = 0 \quad (12)$$

2.3 模型建立及数值方法

为计算茅尾海纳潮量以及与外海的水交换情况, 数学模型计算域覆盖了钦州湾、防城湾两湾水域, 模型西边界至越南茶古岛、东边界至北海的冠头岭, 模型东西长 102 km、南北长 62 km, 计算单元面积 4 217 km²。开边界分 2 段, 为西边界和南边界, 计算域具体范围及网格见图 2(仅绘出行列号为 5 的整数倍的网格线及网格边界, 每个大网格含 25 个计算网格单元)。

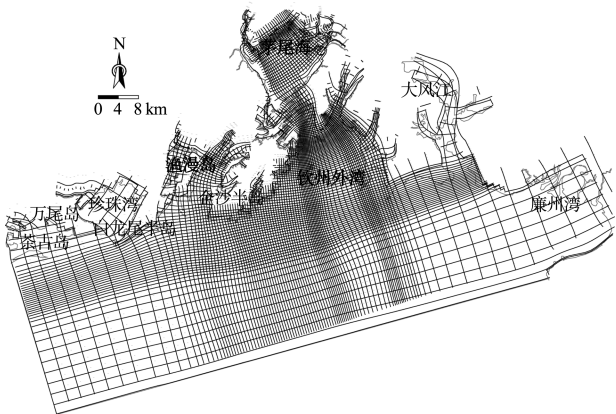


图 2 数学模型范围和网格

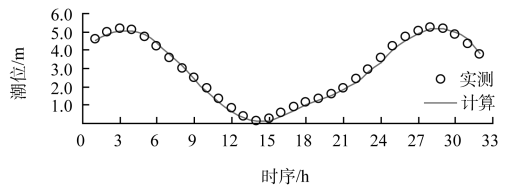
模型计算区域的离散采用正交曲线网格, 空间步长介于 13~1 263 m, 工程区网格步长不超过 40 m, 计算时间步长为 20 s, 可满足计算精度要求。数值求解采用 ADI 法^[12], ADI 法是一种显式-隐式交替使用的有限差格式, 把一个时间步长分成两步进行, 前半步隐式计算 ζ 方向流速分量及潮位, 显式计算 η 方向流速分量; 后半步隐式计算 η 方向流速分量及潮位, 显式计算 ζ 方向流

速分量, 该方法理论成熟、计算效率高、稳定性好, 在工程数值模拟计算中得到了广泛应用。

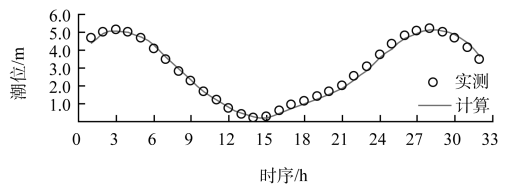
模型地形资料主要取自 2008—2013 年实测水深数据, 外海采用海图, 前者来源于茅尾海整治工程、防城港核电厂、龙门大桥、三墩扩区、企沙离岸岛港区等建设项目资料中的实测数据, 水深基准面均采用果子山理论最低潮面。根据 MIKE21 全球潮汐预报系统提供的外海潮位数据作为开边界条件。钦州湾海域浅滩较多, 采用冻结法对动边界进行处理, 动边界控制水深采用 5 cm。

2.4 模型验证

潮流数学模型验证采用 2009 年 1 月水文测验资料^[9], 验证地形与水文测验相配套。该次水文测验有同步 15 条测流测沙垂线和 3 站潮位, 验证点具体位置见图 1, 包括小、中、大潮 3 个潮动力过程。验证时段为 2009 年 1 月 1 日—16 日(覆盖实测大、中、小潮), 这里仅列出大潮期 H_1 、 H_2 两潮位站和 L_1 、 L_9 、 L_{11} 、 L_{14} 共 4 站流速流向的验证曲线, 见图 3、4。验证表明计算值与实测值吻合较好, 说明模型采用地形、边界条件和模型参数等都是合适的, 能够较好地复演钦州湾海域天然流场, 可进行进一步模拟研究。

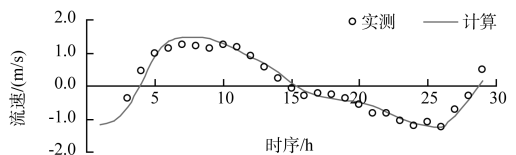


a) H_1 潮位站



b) H_2 潮位站

图 3 大潮期部分潮位验证曲线



a) L_1 流速

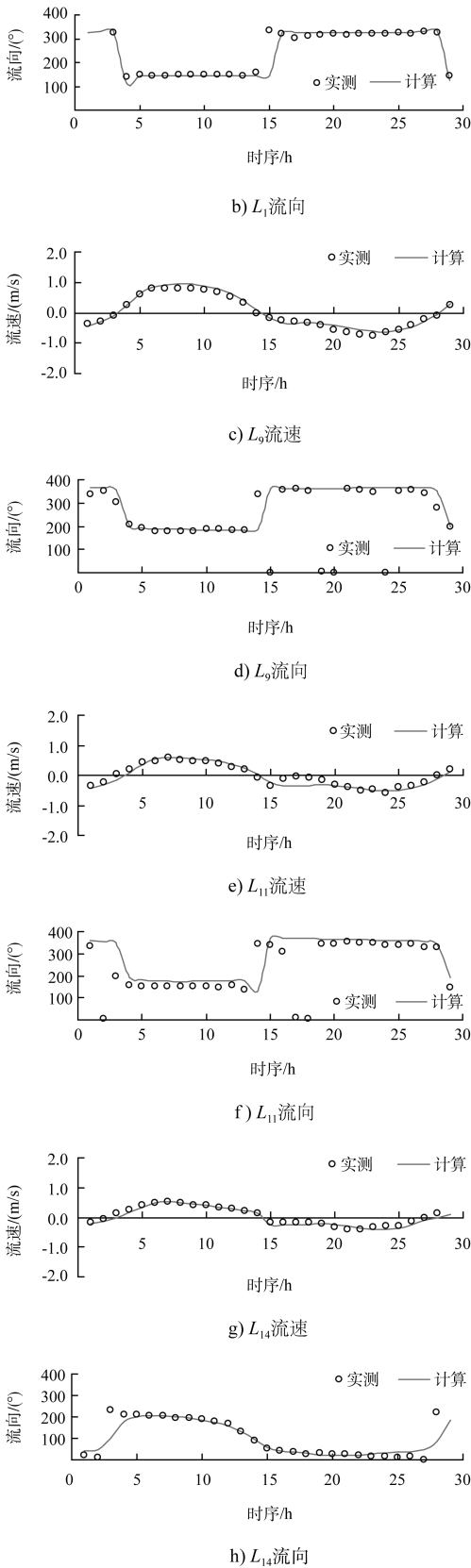


图4 实测大潮部分站位潮流验证曲线

图5给出了2009年岸形时大潮期涨、落急时刻模型计算流态。北部湾潮波传播主方向东北—西南向，涨潮流自西南向东北，落潮反之。湾内潮流运动受岸线约束明显，呈往复流状态，涨潮期，外海的西南向来流在钦州湾湾口转为北偏西进入湾内，钦州外湾涨潮流在青菜头汇聚后，过龙门海峡进入茅尾海，进入茅尾海的涨潮流呈发散状；落潮流路基本沿涨潮流原路返回。

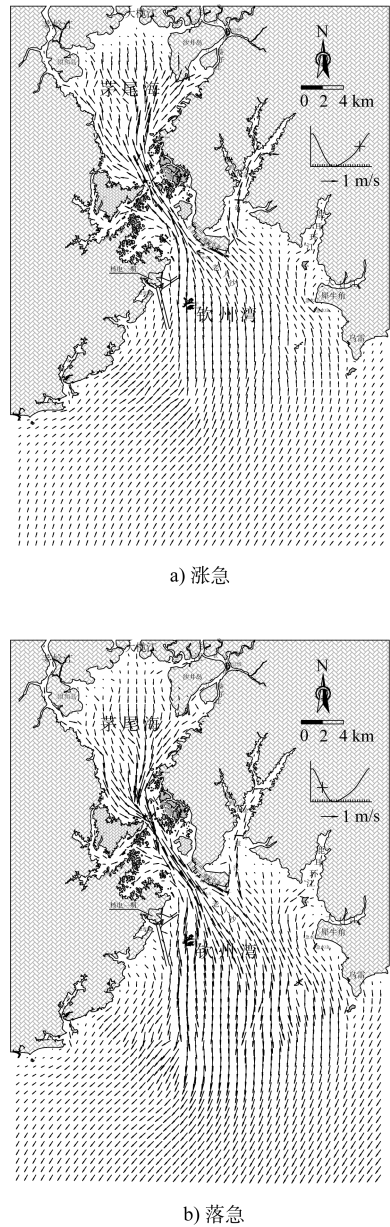


图5 大潮期工程海域涨、落急流态

3 纳潮量和水体半交换周期研究

3.1 湾口填海工程对水道分流比影响

涨、落潮流均沿东、中、西水道进入或流出茅尾海, 分析湾口两侧实施三墩扩区、企沙离岸人工岛工程对3条水道分流比的影响, 见表1。各水道的涨、落潮分流比以及填海工程引起的变化特征与全潮期相同, 填海工程引起各水道分流比变化幅度略有不同。全潮期, 批复规划工况的东、中、西水道潮流分流比为33.5:28.2:38.3, 湾口两侧填海工程实施后, 东、中、西水道潮流分流比调整为31.5:27.5:41.0。结果表明, 通过各水道的潮流量自大到小依次为: 西水道、东水道、中水道。湾口两侧实施大规模填海工程后, 由于湾口西侧企沙离岸人工岛港域航道的开挖、湾口东侧三墩扩区对落潮流的阻挡作用, 使得西水道潮流分流比有所增加, 增加幅度约7%; 东、中水道内潮流分流比呈减小态势, 减小幅度分别为6%、2%。

表1 不同方案各水道内的潮流分流比

涨落潮	填海前后	东水道	中水道	西水道
涨潮期	湾口填海前	33.5	26.3	40.1
	湾口填海后	31.6	25.5	42.9
落潮期	湾口填海前	33.5	29.6	36.9
	湾口填海后	31.5	29.0	39.5
全潮期	湾口填海前	33.5	28.2	38.3
	湾口填海后	31.5	27.5	41.0

3.2 纳潮量计算结果与分析

1) 纳潮量计算方法。

茅尾海纳潮量是反映内湾海水交换能力的重要参考指标, 也是钦州港深水航道维护的主要动力因素。纳潮量^[13]定义为在一个潮周期从低潮时刻到高潮时刻通过断面的潮通量, 假定统计断面宽度为 B , 则一个潮周期的断面潮通量可表示为:

$$Q = \int_{t_0}^{t_0+T} \int_0^B (h + \xi_t) v_t db dt \quad (13)$$

式中: T 对应一个潮周期从低潮时刻到高潮时刻的时间; t_0 为低潮时刻; h 、 ξ_t 、 v_t 分别为单位宽度断面 t 时刻的水深、瞬时水位和断面的法向的垂向平均流速。

2) 纳潮量计算与分析。

在钦州湾湾口和茅尾海口门分别设置断面(图1), 钦州湾断面统计钦州湾湾口纳潮量, 龙门断面统计茅尾海纳潮量。为研究不同位置填海对茅尾海纳潮量的影响, 在批复规划基础上增设2个填海方案进行模拟, F0: 钦州湾批复规划; F1: 在F0基础上, 将龙门海峡通道宽度由604 m拓宽到1.1 km; F2: 在F1的基础上, 湾口两侧实施三墩扩区和企沙离岸岛填海工程, 湾口宽度由16.5 km缩窄到9.4 km。

统计大潮动力条件下各方案的断面纳潮量(表2)。批复规划方案条件下, 茅尾海纳潮量为 $6.33 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。龙门海峡由604 m拓宽到1.1 km后, 钦州湾、茅尾海内纳潮量分别增加0.8%、1.3%; 湾口两侧大规模填海后, 湾口宽度由16.5 km缩窄到9.4 km, 茅尾海内纳潮量无明显变化, 钦州湾纳潮量减少0.8%。

表2 钦州湾两个断面纳潮量统计

断面	纳潮量/ (10^8 m^3)			潮量变化值/ (10^8 m^3)		潮量变化百分比/%	
	F0	F1	F2	F1	F2	F1	F2
钦州湾 湾口断面	15.128 9	15.251 3	15.124 0	0.122 4	-0.127 3	0.8	-0.8
龙门断面	6.334 8	6.417 2	6.417 2	0.082 4	0.000 0	1.3	0.0

从断面纳潮量变化来看, 龙门海峡潮汐通道拓宽后, 茅尾海内纳潮量均明显增加; 湾口两侧大规模填海工程实施后, 茅尾海纳潮量无明显变化。说明龙门海峡潮汐通道畅通是维持茅尾海纳潮量的关键因素, 湾口大规模填海工程对茅尾海纳潮量无明显不利影响。

3.3 水交换计算结果与分析

3.3.1 水交换计算方法

以溶解态的保守物质为示踪剂, 假定关注区域内示踪剂浓度均匀分布, 给定关注区域污染物初始浓度 $C_0 = 1 \text{ mg/L}$, 关注区域外污染物浓度为 $C_1 = 0$, 在潮流作用下, 关注区内水体产生交换, 区域内平均浓度变为 $0 < C < 1 \text{ mg/L}$ 。关注区域

的保守物质浓度稀释为初始浓度值的一半时所需要的时间，即为水体的半交换周期^[14]，半交换周期短，表明水体交换能力强；反之表明水体交换能力弱^[15]。污染物平均浓度计算公式如下：

$$\tau_i = \frac{\sum c_i \times volume_i}{\sum volume_i} \quad (14)$$

式中： τ_i 表示第 i 时刻关注区污染物平均浓度； $volume_i$ 表示单位海水体积； c_i 表示第 i 时刻单位海水体积的污染物浓度值。

3.3.2 计算结果与分析

选取龙门断面以北作为示踪剂投放区域，以批复规划作为本底方案，模拟计算湾口两侧围填海工程实施前后茅尾海水体交换率变化情况，水交换模式共运行 15 d。计算时，茅岭江和钦江均按截断考虑，既没有污染物下泄、也没有清水下泄。

1) 湾口围填海工程实施前研究。

首先以批复规划为例，以实测大、中、小潮的中潮位(均为涨潮期)分别作为示踪剂初始释放时刻，模拟茅尾海内半个月的水体交换情况。不同计算起始潮动力下茅尾海内示踪剂平均浓度变化过程线见图 6。由图 6 可知，以大、中、小潮的中潮位分别作为计算起始时刻，茅尾海水体半交换周期分别为 4.1、4.1、6.7 d，不同计算起始潮动力的茅尾海水体交换能力不同，污染物扩散速度随潮动力的增强而加快，说明水动力条件是影响水体交换率的主要原因。本文在研究湾口填海工程对茅尾海水体交换能力影响时，采用小潮中潮位作为示踪剂计算初始时刻。

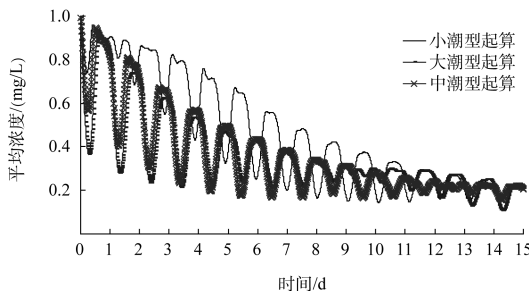


图 6 不同计算起始潮型茅尾海内示踪剂平均浓度过程线

小潮、中潮位作为计算起始时刻，茅尾海内示踪剂平均浓度随潮位的变化过程见图 7，不同时刻茅尾海内示踪剂等值线分布见图 8。茅尾海内示踪剂平均浓度随着涨、落潮过程是呈周期变化的，涨潮期湾外大量较清洁海水进入茅尾海，示踪剂被稀释，平均浓度逐渐降低，在高潮位附近浓度降为最低；落潮期，部分示踪剂被落潮流带出茅尾海，但随着茅尾海潮量逐渐减少，示踪剂平均浓度逐渐升高，在低潮位附近浓度升到最高值，长期来看茅尾海内示踪剂平均浓度是逐渐减小的。从茅尾海湾顶向湾口水交换能力逐渐变快，在第 6.7 d 以后茅尾海内示踪剂的平均浓度保持恒小于初值浓度的一半，可认为茅尾海水体半交换周期为 6.7 d，但部分水域示踪剂浓度仍超过 0.5 mg/L，到第 10 d 内湾各区域示踪剂浓度均不超过 0.5 mg/L。

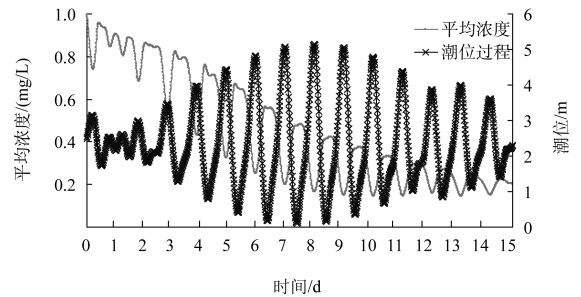
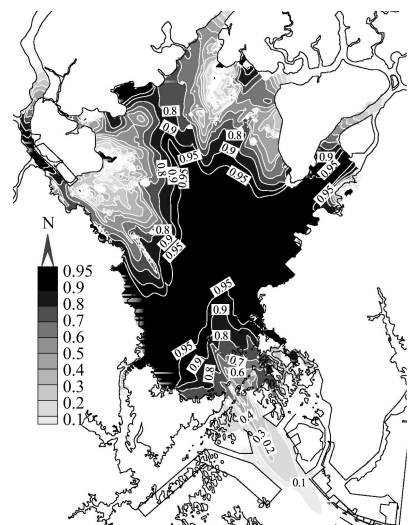
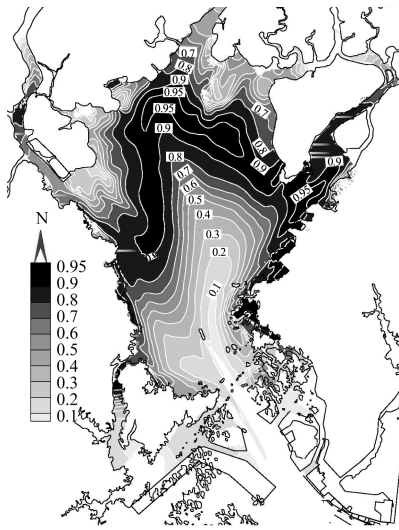


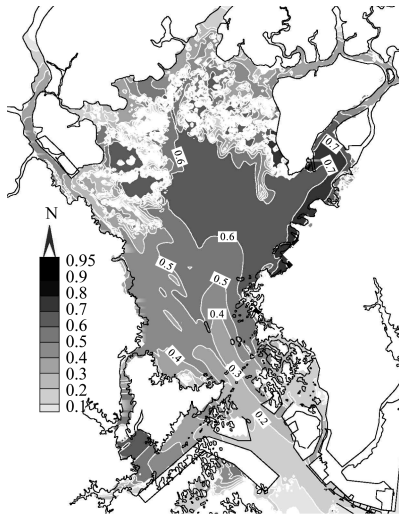
图 7 小潮计算起始时刻示踪剂平均浓度随潮位变化过程线



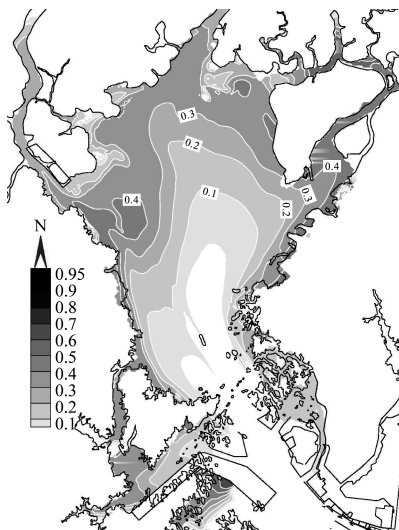
a) 第2 d



b) 第4 d



c) 6.7 d (半交换周期)



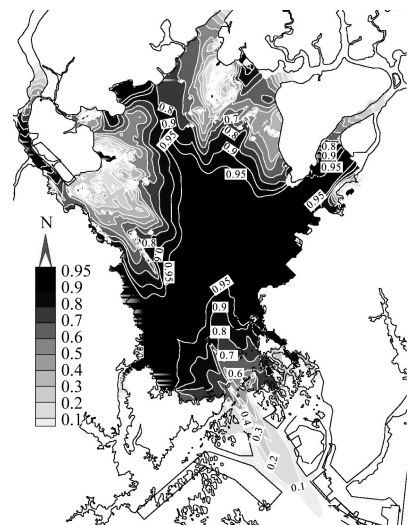
d) 第10 d

2) 湾口围填海工程实施研究。

计算分析了湾口两侧围填海工程实施后茅尾海水体交换情况, 图 9 绘出了围填海工程后不同时刻的茅尾海内示踪剂浓度等值线分布, 同一时刻填海工程前后的示踪剂浓度等值线分布基本一致。另外绘出工程前后茅尾海内示踪剂平均浓度过程线(图 10), 提取不同时刻示踪剂平均浓度值(表 3)。由图表可知, 湾口两侧大规模围填海工程实施后, 同一时刻茅尾海内示踪剂平均浓度有降低趋势, 其水体半交换周期减少约 0.75 h, 原因是现在填海工况对湾口缩窄程度有限, 且填海区主要位于高滩缓流区, 另外围填区前沿有港域和航道开挖, 使得湾口虽然缩窄但平均水深增大, 填海形态还使湾口流态由东北—西南向往南—北向偏转, 因此湾口的局部交换能力是有所加强的, 进而使茅尾海水交换也呈现出增快趋势。需要说明的是, 湾口区的交换能力是与湾口宽度有关的, 当湾口宽度过于缩窄时, 交换能力也将相应下降。

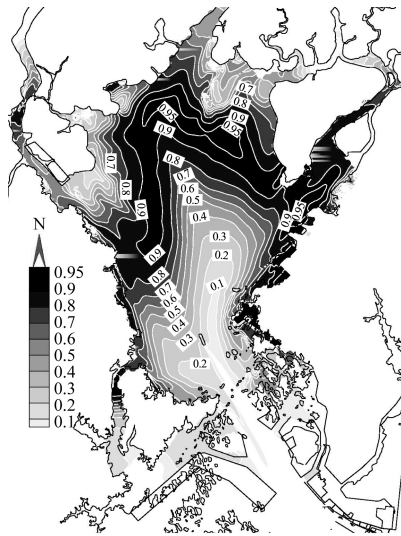
表 3 工程前后不同时刻茅尾海内示踪剂平均浓度

时间/d	茅尾海水体平均浓度/(mg/L)		时间/d	茅尾海水体平均浓度/(mg/L)	
	工程前	工程后		工程前	工程后
1	0.904	0.902	6	0.268	0.263
2	0.839	0.834	6.7 (半交换周期)	0.500	0.500
3	0.716	0.709	7	0.200	0.198
4	0.541	0.533	10	0.186	0.188
5	0.379	0.372	15	0.203	0.206

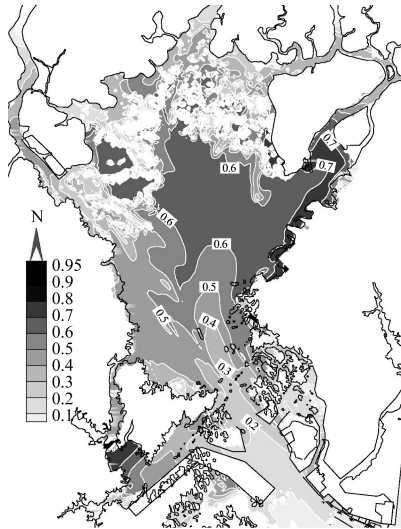


a) 第2 d

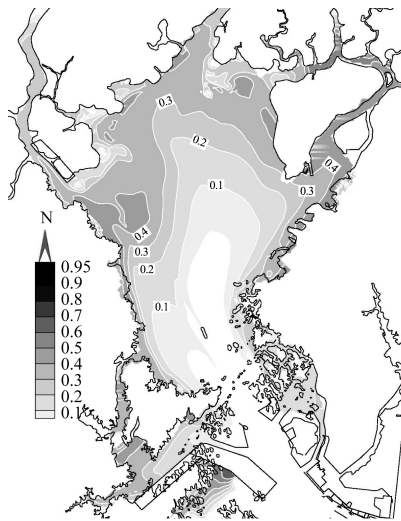
图 8 工程前茅尾海内示踪剂浓度分布 (单位: mg/L)



b) 第4 d



c) 6.7 d (半交换周期)



d) 第10 d

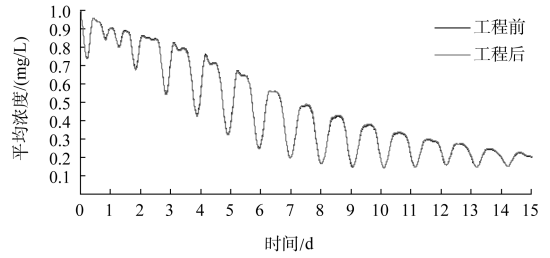


图 10 围填海工程前后茅尾海内示踪剂平均浓度过程线

4 结语

1) 纳潮量统计成果表明龙门海峡潮汐通道畅通是维持茅尾海纳潮量的关键因素，龙门海峡宽度由 604 m 扩宽到 1.1 km 后，茅尾海内纳潮量增加 1.3%；钦州湾湾口大规模填海对茅尾海纳潮量无明显影响。

2) 钦州湾批复规划条件下，以大、小潮作为示踪剂投放时刻时，茅尾海内水体半交换周期为 4.1、6.7 d，说明水动力条件是影响水体交换率的主要因素，污染物扩散速度随潮动力的增强而加快。

3) 茅尾海形似“口袋”，纳潮量较大，在不考虑污染源持续输入的条件下，随着时间的推移，内湾污染物浓度呈明显下降趋势，半交换周期不超过 7 d，因此如能适当控制内湾入汇的污染物总量和强度，茅尾海水环境还是可控的。

4) 钦州湾湾口两侧实施一定幅度的围填海工程(甚至幅度较大)，当湾口主通道仍留有近 10 km 宽度时，相对于龙门海峡仅 1 km 多的控制宽度，外湾口的排污能力还是较强的，不计外湾污染物排放对内湾的影响条件下，湾口的规划填海工程对内湾水交换率基本不影响。

5) 示踪剂保守扩散型的水交换数学模型应注意开边界污染物浓度的回归影响，如果示踪剂初始区域相对于模型范围较大时，随着时间延长，开边界处的污染物浓度也会增加，忽略回归影响会导致水交换率变快，本文假定边界沿线污染物浓度梯度与计算域内侧一致进行回归考虑，推广于其他区域应用时应确保假定与实际基本相符。

图 9 围填海工程后茅尾海内示踪剂浓度分布 (单位: mg/L)

(下转第 124 页)