

# 深沪湾水交换特性的研究\*

刘浩, 潘伟然, 骆智斌

(厦门大学海洋系, 福建 厦门 361005)

**摘要:** 纳潮量与水交换时间的大小直接决定了半封闭海湾内污染物的稀释速率, 因此对其进行深入探讨对于预测湾内水质的长期变化具有重要意义。本文以 11 个分潮共同驱动一个三维斜压海流模式用以模拟深沪湾的潮汐潮流, 进而计算出深沪湾的纳潮量。另外, 浓度为  $1 \text{ g/m}^3$  的保守示踪物在模型启动之初被作为初始条件均匀投放在湾内, 观察其后示踪物浓度随涨落潮流的变化情况, 进而可以估算出深沪湾的半交换周期约为 14 d。

**关键词:** 深沪湾; 纳潮量; 水交换时间; 数值模拟

**中图分类号:** P731.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-6336(2008)02-0157-04

## Study on water exchange characters in the Shenhu Bay

LIU Hao, PAN Wei-ran, LUO Zhi-bin

(Department of Oceanography, Xiamen University, Xiamen 361005, china)

**Abstract:** Both of the tidal prism and period of water exchange are generally used as an index to examine the dilution rate of pollutants in a semi-enclosed bay, so understanding them is significant to predict the long-term variation of water quality. Eleven tides are used to force the baroclinic coastal model by a three dimensional to reproduce the tidal regime in the Shenhu Bay. Based on the validated simulations, the tidal prism is estimated further, which also is unanimous with our observations. In addition, the period of water exchange is numerically examined by means of the concentration (mass) variation of conservative tracers, which were set to be  $1 \text{ gn}^{-3}$  initially. It is suggested that the half-exchange time is about 14 d.

**Key words:** Shenhu Bay; tidal prism; water exchange; numerical simulation

深沪湾位于福建省东南沿海 ( $118^{\circ}38' \sim 118^{\circ}42' \text{ E}$ ,  $24^{\circ}37' \sim 24^{\circ}41' \text{ N}$ ), 与台湾岛隔海峡相望 (见图 1)。深沪湾总面积约为  $29 \text{ km}^2$ , 滩涂湿地资源丰富, 构成了独特而重要的生态体系。另外, 深沪湾还是我国著名的古森林遗迹保护区<sup>[1]</sup>, 具有极为重要的考古价值。但是近年来围垦导致海湾面积缩小、水交换能力下降以及新的淤积发生, 这些都直接损害了湾内海洋资源的可持续利用, 并且严重制约着港口航运业的发展。因此了解目前深沪湾的纳潮量和水交换能力, 对于未来围垦及其他海洋工程项目的规划实施都具有现实的指示作用。

## 1 研究方法

### 1.1 一般介绍

关于半封闭海湾水交换特性的研究, 前人已做了许多卓有成效的工作。例如, 魏皓等人<sup>[2]</sup>使用 HAM-SOM 动

力模型所驱动的水质模型模拟了渤海各个浅水湾的半交换周期; Liu 等<sup>[3]</sup>通过 POM 模型的数值模拟并结合对同位素<sup>228</sup>Ra 现场浓度调查, 估算出胶州湾的滞留时间约为 52 d。相比于他们的研究, 我们所涉及的研究区域更小 (总面积只有  $29 \text{ km}^2$ ), 而且相应的观测资料也很少, 这都给我们在模型设计和验证上带来困难。尽管如此, 我们还是希望通过数值模拟与现场调查相结合的方法, 对深沪湾的水交换特性有一个清晰的认识。在现场调查方面, 我们选定三个水位站进行为期一个月 (2006 年 4 月 15 日 ~ 5 月 15 日) 的水位测量, 测量结果一方面可用以数模的验证, 另一方面所测得的调和常数通过外插还可以获得模型运转所需的开边界条件; 另外, 我们还分别在小潮 (4 月 21 ~ 22 日) 和大潮 (4 月 29 ~ 30 日) 期间出海对三个站点以及湾口断面的潮流进行持续观测, 观测时间不少于 25 h。数模方面, 我们重点模拟深沪湾的纳潮量和

\* 收稿日期: 2007-01-18, 修订日期: 2007-04-04

基金项目: 中国博士后科学基金资助 (20060400737)

作者简介: 刘浩 (1972-), 男, 天津塘沽人, 博士, 副研究员, 从事近岸海域动力过程的研究。

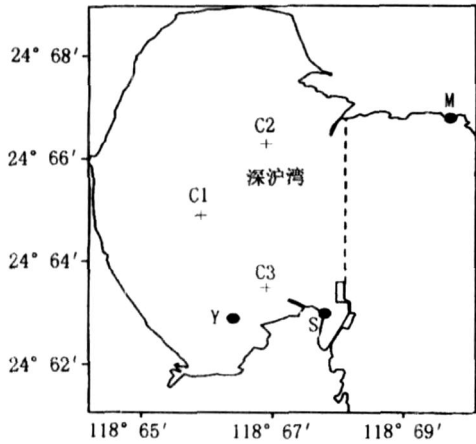


图 1 深沪湾的研究区域及站位

M—梅林码头, S—深沪码头, Y—鱼排渔港; c1, c2, c3 为 3 个船舶站位;虚线为湾口 ADCP 走航断面

Fig 1 Shenhu Bay and observation stations

M—Meilin Port, S—Shenhu Port, Y—Yupai c1, c2 and c3 are three ship moorings The dashed line indicates a cross section, along which the tidal current profiles are measured using the towed ADCP.

示踪物的浓度变化。

1.2 模型设计

本文采用近岸海域三维斜压原始方程海流模型 (ECOM)模拟深沪湾的潮汐潮流。其基本特征简述如下:水平和垂直方向分别采用正交曲线坐标系和随地形变化的 sigma坐标系;自由表面可以模拟水位变化;垂直和水平方向的混合扩散分别采用 2.5 阶的 Mellor-Yamada 湍流闭合模式<sup>[4]</sup>和 Smagorinski 模式;内外模态分别处理速度较慢的内重力波和速度较快的外重力波以提高整个模式计算效率等。

模型的外模态在深沪湾进口处采用下列 Reid 边界条件<sup>[5]</sup>:

$$\tau = \tau + u_n \sqrt{H/g} \tag{1}$$

其中:  $u_n$  是垂向平均流速;  $n$  代表垂直于开边界的法向单位矢量;  $H$  为水深;  $g$  为重力加速度;  $\tau$  和  $\tau$  分别是水位和潮位,而潮位  $\tau$  又可以表示为 11 个分潮,即  $K_1, O_1, P_1, Q_1, M_2, S_2, N_2, K_2, M_4, MS_4$  和  $M_6$  的叠加,用以表示潮波在开边界处的传播,即

$$\tau = \sum f_i H_i \cos[\omega_i \cdot t + (\nu + u_i) - g_i] \tag{2}$$

其中:  $f_i$  是交点因子;  $\nu_i, u_i$  分别是格林威治初始相位和交点订正角;  $\omega_i$  潮汐角频率;  $g_i$  是迟角;  $H_i$  是振幅;下标  $i$  代表分潮。

模型的内模态在深沪湾进口处采用 Orlandi 辐射边界条件<sup>[6]</sup>,能够有效抑制内波在通过深沪湾开边界时产生反射现象。

由于研究区域狭小,故本文采用高精度的计算网格,水平方向的网格分别  $x = 85.18 \text{ m}, y = 86.73 \text{ m}$ ,垂直方向分 10 个 sigma 层,内外模态的时间步长分别取 10 s 和 0.5 s 已满足 CFL 条件。

1.3 纳潮量的计算公式

纳潮量在本文被定义为在任意一个潮周期从低潮时刻到高潮时刻累计通过湾口进入到湾内的新增潮水量,因此,纳潮量的大小直接决定了湾内污染物的稀释程度。假定湾口断面为单位宽度,则一个潮周期的纳潮量可表示为

$$Q = \int_{T_{\text{low}}}^{T_{\text{high}}} U D dt \tag{3}$$

式中:  $T_{\text{low}}, T_{\text{high}}$  分别对应一个潮周期的低潮和高潮时刻;  $U$  为垂直于湾口断面的法向的垂向平均流速;  $D = H + \eta$ , 其中  $H, \eta$  分别为湾口平均水深和瞬时水位。

1.4 保守示踪物对流扩散方程

本文选择保守物质作为示踪物,考察涨落潮流所引起的物质浓度变化规律,进而对深沪湾水交换特性做出定量估计。根据 ECOM 模型本身的特点,示踪物的对流扩散方程可写为

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \left( \frac{\partial u c}{\partial x} + \frac{\partial v c}{\partial y} + \frac{1}{D} \frac{\partial c}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left( A_H \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( A_H \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{1}{D} \frac{\partial}{\partial z} \left( K_H \frac{\partial c}{\partial z} \right) \tag{4}$$

式中:  $c$  为示踪物的浓度;  $u, v$  分别为  $x, y$  方向的流速;  $A_H, K_H$  分别为水平和垂向扩散系数。

2 结果与分析

2.1 模型验证

表 1 列出了 3 个水位站点上  $M_2$  和  $K_1$  分潮振幅、迟角的计算结果,可以看出深沪湾的潮汐以半日潮为主。误差分析显示:  $M_2$  分潮振幅均方根误差为 1.98 cm,迟角 2.45°;  $K_1$  分潮振幅的均方根误差为 2.45 cm,迟角为 1.26°。本文模型无论是对半日潮还是对全日潮的模拟都显示了较好的精度。

表 1  $M_2$  和  $K_1$  分潮实测和计算调和常数的比较

Tab 1 Comparisons of measured and simulated amplitude and phase lag of major tides

站点	$M_2$				$K_1$			
	实测值		计算值		实测值		计算值	
	H / cm	g / °	H / cm	g / °	H / cm	g / °	H / cm	g / °
梅林码头	192.15	331.96	189.78	333.41	32.44	269.16	34.72	270.37
鱼排渔港	189.57	332.07	188.43	334.04	32.37	269.64	34.89	269.72
深沪码头	190.12	332.12	188.63	335.26	32.40	269.68	35.01	271.01

由于小潮期间实测潮流很小,且易受海面风应力影响,因此图 2 只给出了大潮期间实测流速与模拟潮流的对比情况。可以看出:即使在大潮期间,深沪湾的流速值也很小,约为 10 cm/s。对比结果显示,除了 c2 站上流速值存在较大误差外(实测流速出现几个较为明显的奇异

值),另外两个站点的模拟结果还是比较好的。根据图 2 所显示的流速特征可以判断:深沪湾的潮流具有典型的半日潮的特征,并且湾的中北部(c1, c2 站)以往复流为主,而在 c3 站所在的南部则呈现出明显的旋转流的性质。

2.2 深沪湾的纳潮量

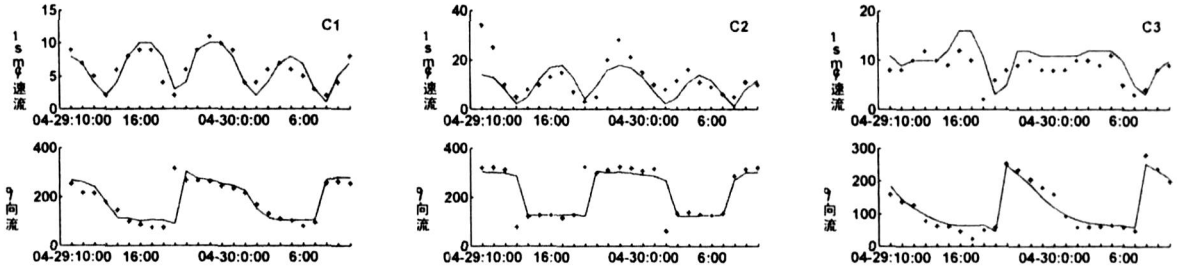


图 2 三个船舶站位上实测(星号)与模拟(实线)垂向平均流速的对比

Fig. 2 Comparisons of measured (star points) and simulated (solid line) depth-mean currents at three ship moorings

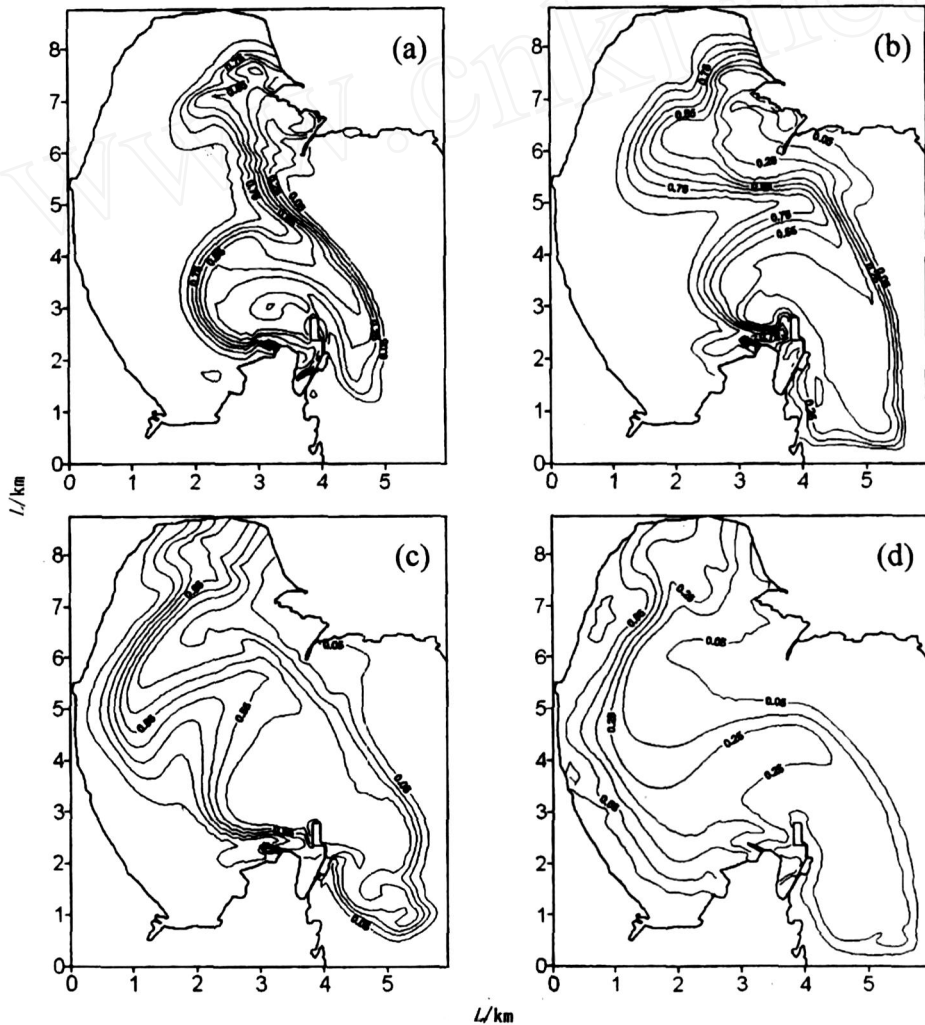


图 3 保守示踪物表层浓度( $g \cdot m^{-3}$ )分布  
(a) 第 2 d, (b) 第 5 d, (c) 第 10 d, (d) 第 20 d

Fig. 3 Surface concentration ( $g \cdot m^{-3}$ ) of conservative tracers at  
(a) 2<sup>nd</sup>, (b) 5<sup>th</sup>, (c) 10<sup>th</sup>, (d) 20<sup>th</sup> d.

深沪湾在基准海平面时的海水体积约为  $1.7006 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 我们称之为深沪湾的固有容量。本文模型根据公式 (3) 计算的 2006 年 4 月 21 ~ 22 日 (小潮)、24 ~ 25 日 (中潮) 以及 29 ~ 30 日 (大潮) 期间的纳潮量分别为  $6.51 \times 10^7$ ,  $9.98 \times 10^7$  和  $1.32 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。与此同时, 用 ADCP 实测数据估算的小潮和大潮期间的纳潮量分别为  $7.14 \times 10^7$  和  $1.26 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。两者相比, 小潮的计算值偏小 8.8%, 而大潮值偏大 4.8%。考虑到实测误差以及海面风场因素所带来的误差, 我们的计算结果还是令人满意的。另外计算结果显示: 中潮时的纳潮量也可达到深沪湾固有容量的 58.7%, 说明深沪湾具有良好的水交换特性。

### 2.3 深沪湾的水交换特性

通过考察湾内示踪物的浓度 (质量) 变化可以揭示深沪湾的水交换特性。具体做法就是首先假定湾内 (图 1 虚线以左海域) 示踪物的初始浓度为  $1 \text{ g/m}^3$  (约为 170 t), 同时湾外不存在示踪物。模型在潮汐强迫下运行 30 d, 湾内示踪物的浓度 (质量) 在湾外涨落潮水的稀释下而不断变化。另外, 本文还假定示踪物是保守的, 这是为了排除物质本身性质变化可能造成的质量 (浓度) 变化。图 3 给出了表层示踪物浓度在第 2、5、10、20 d 时分布特征, 从中可以清晰看到湾内、外海水的交换路径。就像其他北半球的海湾一样, 这里潮波运动也具有典型的北进南出的特征。事实上, 我们在湾口断面上的 ADCP 观测结果也证实了这一特征。另外, 从图 3 可以看到: 最后滞留在湾内的示踪物主要积蓄在西南沿岸。这是因为那里的潮流流速较弱而且以旋转流为主, 二者共同决定了弱水交换特性。

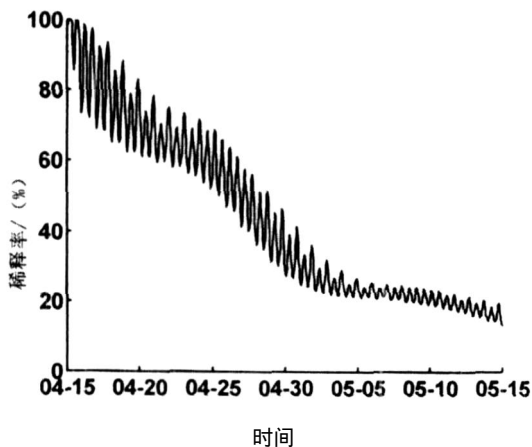


图 4 保守示踪物稀释率的时间变化

Fig 4 Time series of the dilution rate of conservative tracers

为了能够定量展示深沪湾水交换特性, 图 4 给出了湾内示踪物的稀释率的时间变化曲线。这里的稀释率定义为在某一特定时刻湾内现存示踪物的质量与初始质量 (170 t) 的比值。湾内现存示踪物的质量从长期看是逐渐减少的, 但是随涨落潮过程又呈周期变化。图 4 显示: 湾内示踪物的质量降为初始质量的一半的时间只需 12 d (落潮), 尽管之后涨潮过程又可将湾外的一部分示踪物带入湾内从而导致湾内示踪物的质量恢复到初始质量的一半以上, 但是在第 14 d 以后湾内示踪物的质量再也不能恢复到上述数值。因此, 可以认为 14 d 是深沪湾的半交换周期, 意味着湾内有至少一半的海水在此期间完成更新。同理, 根据图 4 我们还可推测 30 d 是深沪湾的 80% 交换周期。

### 3 结论

本文采用一个三维近岸海流模式模拟了深沪湾潮汐潮流的基本特征, 并与实测结果吻合较好。在此基础上, 我们对深沪湾的纳潮量估算, 小潮、中潮和大潮时的模拟结果分别为  $6.51 \times 10^7$ ,  $9.98 \times 10^7$  和  $1.32 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 也与湾口 ADCP 的实测数值定性吻合。另外, 我们还以保守示踪物作为判据, 对深沪湾在潮汐作用下的水交换特征给出了定性定量的分析, 得出了 50% 和 80% 的水交换周期, 分别为 14 d 和 30 d。

### 参考文献:

- [1] 唐丽玉, 王绍宏. 深沪湾——福建海岸演化的信息库 [J]. 福建地理, 1999, 14 (1): 5-8.
- [2] 魏皓, 田恬, 周锋, 等. 渤海水交换的数值研究——水质模型对半交换时间的模拟 [J]. 青岛海洋大学学报, 2002, 32 (4): 519-525.
- [3] LU Z, WEI H, LU G S, *et al*. Simulation of water exchange in Jiaozhou Bay by average residence time approach [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2004, 61: 25-35.
- [4] MELLOR G L, YAMADA T. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems [J]. Reviews of Geophysics and Space Physics, 1982, 20: 851-875.
- [5] BLUMBERG A F. A primer for ECOMED, version 1.3 [M]. Mahwah N J: HydroQual, Inc. 2002.
- [6] ORLANSKI I. A simple boundary condition for unbounded hyperbolic flows [J]. Journal of Computational Physics, 1976, 21: 251-269.