

# 基于随机游动模型的铁山港水交换的数值模拟

王丽娜<sup>1</sup>, 潘伟然<sup>1,2\*</sup>, 骆智斌<sup>1,2</sup>, 张国荣<sup>1,2</sup>, 陶小琴<sup>1</sup>, 郑艺妃<sup>1</sup>

(1. 厦门大学海洋与地球学院, 2. 福建省海陆界面生态环境重点实验室(厦门大学), 福建 厦门 361102)

**摘要:** 采用三维浅海水动力模型和粒子随机游动模型, 模拟了铁山港潮汐、潮流场, 分析了湾内水体平均驻留时间的时空特征和物质迁移特征. 研究表明, 铁山港海水交换主要受潮汐控制, 上层海水与湾外水交换率大, 平均驻留时间为 9.84 d, 下层海水为 25.18 d; 腹大口小的海湾内湾顶水交换较慢, 湾口和湾中水交换较快; 落潮期水体交换速度明显快于涨潮期. 采用单点中性粒子追踪公馆河入海处等 5 个较典型位置水体的运动轨迹, 结果表明北暮—营盘附近口门海域和石头埠沿岸水交换活跃, 利于水体物理自净扩散; 湾顶、白沙河和沙田均水交换缓慢, 容易造成物质的沿岸堆积.

**关键词:** 铁山港; 三维数值; 随机游动; 水体交换; 驻留时间

**中图分类号:** P 731.26

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0438-0479(2014)06-0840-08

铁山港地处北部湾东北部顶端, 毗邻广东省英罗港. 港湾呈鹿角状, 湾口朝南, 呈喇叭状敞开与北部湾相通, 口门宽约 32 km. 该湾水域南北长约 40 km, 海湾面积 340 km<sup>2</sup>, 其中滩涂面积约占海湾总面积的 50%. 湾内掩护良好, 无大的河流注入, 两岸多为开阔平坦的台地, 滩涂资源和港口资源丰富. 随着北部湾经济的快速发展, 铁山港被列为重点港口开发区和临海工业发展基地. 港口的开发建设对港域的水动力条件和水域环境容量产生一定的影响, 每年排放入湾的生活污水和工业污水有增无减, 湾内水质受到了不同程度的影响. 因此, 研究铁山港湾的水交换机制, 认识港湾的物质输送与扩散规律, 对铁山港湾的环境治理和污染控制、合理开发利用海湾资源具有重要的指导意义.

海湾水交换能力的研究方法, 有箱式模型<sup>[1-2]</sup>、基于保守物质盐度特征分布<sup>[3]</sup>或放射性示踪物质浓度分布的对流-扩散模型<sup>[4-7]</sup>、标志质点的拉格朗日粒子追踪模型等. 拉格朗日粒子追踪模型跟随流体质点研究其动力特征, 能够更直观更准确地描述水体的迁移和交换特性, 因此广泛用于水交换的研究中. 早期的粒子追踪模型忽略了扩散过程, 在近岸弱流区往往低

估了海水的水交换能力. 随机游动模型根据湍动扩散的拉格朗日的方法, 在模拟质点的运动时既包括了粒子的对流运输, 又包括了由随机位移表示的湍动扩散, 比粒子追踪更能真实地反映水体的交换情况. Dimou 等<sup>[8]</sup>建立了水深平均的二维随机游动粒子追踪模型, 模拟充分混合的河口海湾地区的输运过程, 并对浓度分布和驻留时间进行了验证, 结果符合良好. Bilgili 等<sup>[9]</sup>应用随机游动模型模拟了 Great 河口湾及其近岸海域各分区水体输运, 较好地阐释了各分区间水交换差异和特征.

目前, 国内外对于铁山港水交换的研究相对较少, 既往研究主要从环境与生物分布变化说明水体自净能力对生态和环境的影响<sup>[10-11]</sup>. 蒋昌波等<sup>[12]</sup>利用二维对流扩散方程, 计算水体指标物质的浓度变化进而估算铁山港海水的半交换期, 从物理角度初步分析了铁山港建港前后水交换能力的差异. 本文采用基于拉格朗日粒子追踪法的随机游动模型, 研究区域锁定在石头埠南岸以北海域, 将湾内分为 3 个子区域. 通过计算港湾整体和各子区域的水体平均驻留时间和水体交换率, 进一步分析各子区域水体交换能力的水平和垂直差异以及不同潮时水交换能力的影响, 更加细致地描述铁山港水体交换的三维分布特征和时间的微观变化.

## 1 模型及方法介绍

每一随机步长内, 粒子的速度都是由平均流速和

收稿日期: 2013-09-18

基金项目: 海洋公益性行业科研专项(2010418012); 福建省科技计划重点项目(2010Y0064)

\* 通信作者: panwr00@sina.com

随机流速构成的,其中平均流速由水动力模型给出,而随机流速则由随机游动模型模拟而得.通过三维水动力模型和随机游动模型的联立-耦合,计算得出铁山港水交换率.

### 1.1 水动力模型

利用浅海三维动力模型,实现铁山港三维流场的数值模拟.模型在垂直方向上以固定水深分层,潮间带处理采用干/湿网格技术.在计算中采用 Mellor-Yamada 紊流模型<sup>[13-14]</sup>和半隐式差分格式.模型以平均海平面作为  $x-y$  平面, $z$  取垂直向上为正,通过 Boussinesq 近似和静水压强假定,得到不可压缩流体的控制方程如下:

连续性方程:

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

水平方向动量方程:

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \mathbf{U} \cdot \nabla \mathbf{U} = f\mathbf{U} - \frac{1}{\rho_0} \nabla P + A_M \nabla^2 \mathbf{U} + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_M \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial z} \right), \quad (2)$$

$z$  方向动量方程:

$$0 = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial z} - g, \quad (3)$$

利用自由表面运动学边界条件计算水位场:

$$-\frac{\partial \zeta}{\partial t} - u \frac{\partial h}{\partial x} - v \frac{\partial h}{\partial y} + w = 0, \quad (4)$$

压力场计算:

$$p(x, y, z) = p_{\text{air}} + g\rho_0 \zeta + g \int_z^0 \rho(x, y, z', t) dz', \quad (5)$$

温度场计算:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = A_H \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_H \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad (6)$$

盐度场计算:

$$\frac{\partial S}{\partial t} + u \frac{\partial S}{\partial x} + v \frac{\partial S}{\partial y} + w \frac{\partial S}{\partial z} = A_H \left( \frac{\partial^2 S}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 S}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_H \frac{\partial S}{\partial z} \right), \quad (7)$$

密度场计算:

$$\rho = 1\,024.14 - (0.073\,5 + 0.004\,69T)T + (0.802 - 0.002T)(S - 35.0), \quad (8)$$

各式中, $t$  为时间步长, $P$  为压强向量, $\mathbf{U}$  为水平流速向量, $u, v, w$  分别为  $x, y, z$  方向的流速, $\zeta$  为水位, $h$  为当地静水深, $p_{\text{air}}$  为标准大气压, $T$  为温度, $S$  为盐度, $f$

为柯氏力参数, $p$  为压力, $\rho_0$  为海水密度标准值, $\rho$  为海水实际密度, $A_M, K_M$  分别为正压模式水平和垂直涡动粘性系数, $A_H, K_H$  分别为计算的水平与垂直方向的弥散系数.

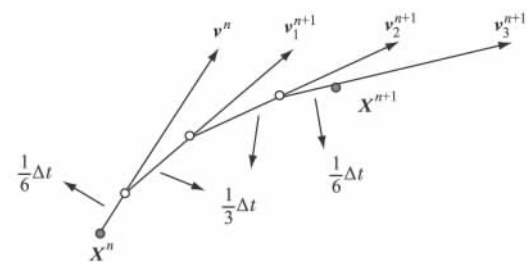
### 1.2 随机游动模型

随机游动模型由 Bugliarello 等<sup>[15]</sup>于 1964 年提出.1971 年, Yang 等<sup>[16]</sup>将表征物质的量通过粒子数转化成物质浓度.该方法在流场内通过释放的大量粒子来反映物质的迁移扩散,跟踪确定这些粒子时域性的空间分布,再将其反算成浓度场,进而了解物质迁移自净的过程与特征.随机游动模型中,粒子的对流运输过程由水动力模型中求得的流场确定,扩散过程则通过湍动扩散项加以表述.粒子的位移表示如下:

$$\mathbf{X}^{t+\Delta t} = \mathbf{X}^t + \mathbf{U}\Delta t + \frac{1}{2} \left( \mathbf{U} \cdot \nabla_H \mathbf{U} + \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} \right) \Delta t^2 + \mathbf{R}(t) \sqrt{2\mathbf{K}_h \Delta t}, \quad (9)$$

其中, $\mathbf{X}^t$  是某粒子在  $t$  时刻的位置向量, $\mathbf{X}^{t+\Delta t}$  则是在  $t + \Delta t$  时刻的位置向量, $\mathbf{U}$  为质点在瞬时位置  $\mathbf{X}^t$  时的对流速度向量, $\Delta t$  为随机游动时间步长, $\mathbf{R}(t)$  为符合  $(0, 1)$  正态分布的随机数向量, $\mathbf{K}_h$  为水平方向上的湍动扩散系数张量.

采用 4 阶龙格库塔法<sup>[17]</sup>求解其中的微商项,计算中性粒子的位移变化.



$$\mathbf{X}^{n+1} = \mathbf{X}^n + \frac{1}{6} \Delta t (\mathbf{v}^n + 2\mathbf{v}_1^{n+1} + 2\mathbf{v}_2^{n+1} + \mathbf{v}_3^{n+1}). \quad (10)$$

本文采用 2 种时间指标来衡量铁山港的水体交换能力:1) 稳态时间,标志质点到达湾外即为与外海水进行过交换更新,将研究区域内示踪粒子数降至原来 10% 所需的时间定义为稳态时间;2) 根据 Takeoka<sup>[18]</sup>的定义表达平均驻留时间 (mean residence time),而此时流出海域的粒子数与初始粒子数之比为该海域的水交换率.

$$\tau_r = \int_0^\infty \frac{R(t)}{R_0} dt = \int_0^\infty r(t) dt, \quad (11)$$

其中, $\tau_r$  为平均驻留时间, $r(t) = \frac{R(t)}{R_0}$  为剩余函数,指  $t$  时刻仍然留在某域中的物质总量与初始时刻该域内

的物质总量之比。

铁山港分湾顶、湾中和湾口 3 个子区域(图 1),分别标为  $P_1, P_2$  和  $P_3$ , 湾外记为  $P_4$ . 在随机游动方法<sup>[19]</sup>中, 每个粒子代表恒定量的扩散质, 假设初始时刻在研究域  $i$  中投放的粒子总数为  $n_i^0$ , 经过  $t$  时刻从域  $i$  流到域  $j$  的粒子数为  $n_{ij}^t$ , 每个粒子所代表的扩散质为  $m_p$ , 那么  $R_i^0 = n_i^0 m_p, R_i^t = \sum_{j=1}^3 n_{ij}^t m_p$ , 则区域  $i$  的平均驻留时间可以表示为:

$$\tau_{r(i)} = \int_0^\infty \frac{R_i^t}{R_i^0} dt = \int_{t_0}^\infty \frac{\sum_{j=1}^3 n_{ij}^t m_p}{n_i^0 m_p} dt = \int_{t_0}^\infty \frac{\sum_{j=1}^3 n_{ij}^t}{n_i^0} dt. \quad (12)$$

时间的数值积分上限取充分大的  $M\Delta t$ , 各分区驻留时间的近似解表达式为:

$$\tau_{r(i)} \approx \sum_{k=0}^M \frac{\sum_{j=1}^3 n_{ij}^k}{n_i^0} \cdot \Delta t, \quad (13)$$

其中,  $M$  为总时间步数,  $\Delta t$  为时间步长,  $n_{ij}^k$  为第  $k$  个时间步从区域  $i$  流到区域  $j$  的粒子数。

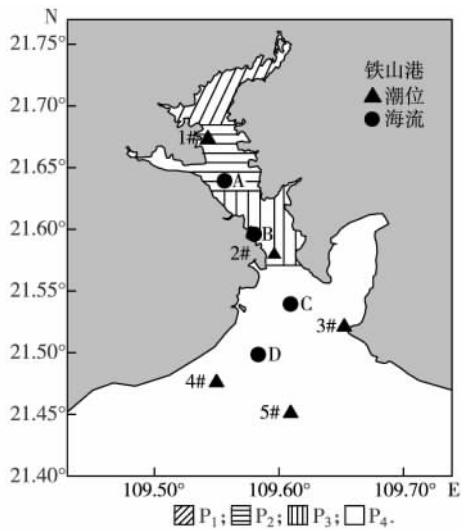


图 1 模拟区域及站点

Fig. 1 Simulated area and measuring stations

## 2 数值模拟分析

### 2.1 水动力模拟

#### 2.1.1 计算参数设置与验证

数值模拟区域范围:  $109.45^\circ \sim 109.74^\circ E, 21.40^\circ \sim 21.77^\circ N$ , 海底地形数据由海图水深插值处理得到。水平空间步长 200 m, 平面网格单元数为 30 000 个; 垂

向共均分 5 层, 底摩擦系数 0.002 5; 潮汐开边界利用调和常数 ( $M_2, S_2, N_2, K_2, O_1, P_1, Q_1, K_1$ ) 确定。白沙河和公馆河分别取径流量 2 和  $16 \text{ m}^3/\text{s}$ <sup>[20]</sup>。采用“冷启动”方式, 初始水位场和流场均取为零; 模型从 2011 年 6 月 15 日 0 时开始计算, 持续计算 35 d。

水位、潮流的数值结果采用 5 个临时验潮站的实测潮位数据(2011 年 6 月 19 日 0 时至 7 月 19 日 23 时)和 4 个海流锚系的实测流速资料(2011 年 6 月 19 日至 25 日)进行验证(图 2~4)。经对比, 模拟结果与实测结果基本一致。

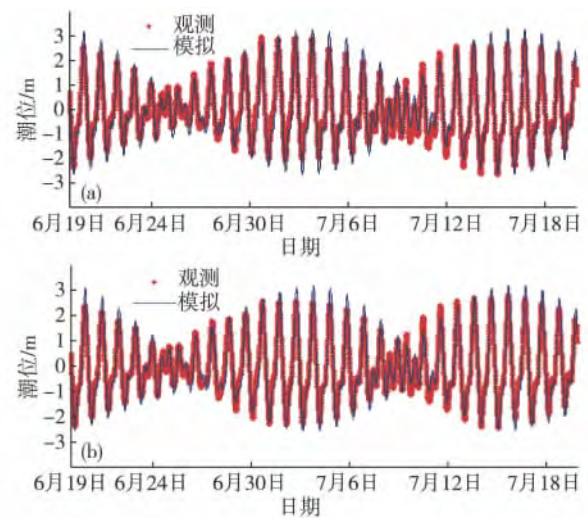


图 2 1# 站(a)和 2# 站(b)水位计算值和实测值比较  
Fig. 2 Comparison between the computed and measured water level at NO. 1 (a) and NO. 2 (b) stations

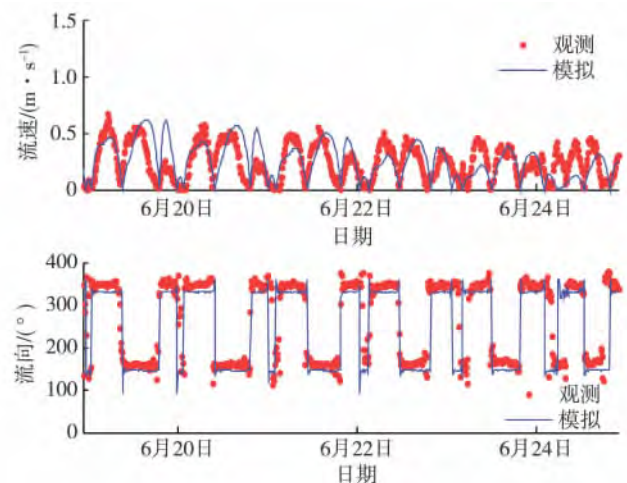


图 3 A 站表层流速和流向计算值与实测值比较  
Fig. 3 Comparison between the computed and measured current velocity and direction at A station

#### 2.1.2 铁山港潮流模拟

铁山港年平均潮差 2.53 m, 最大潮差 6.25 m, 属

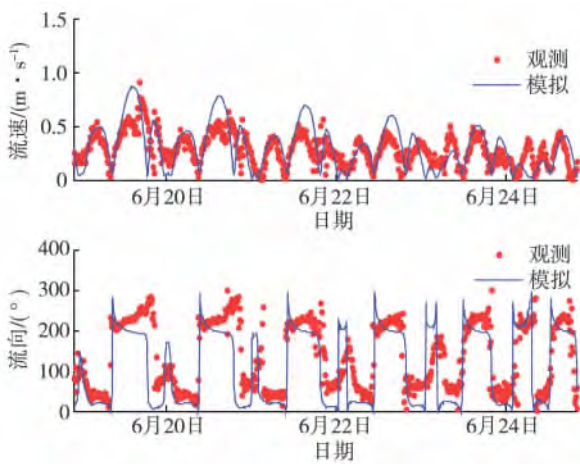
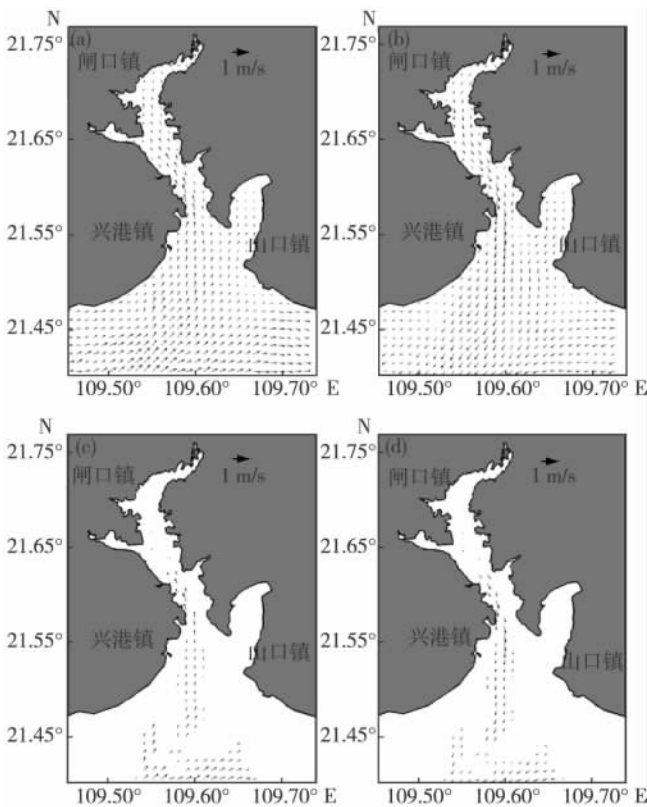


图 4 D 站表层流速和流向计算值与实测值比较

Fig. 4 Comparison between the computed and measured current velocity and direction at D station



(a) 表层涨急; (b) 表层落急; (c) 近底层涨急; (d) 近底层落急.

图 5 涨(落)急潮流场分布图

Fig. 5 The tidal current field of the flood (ebb) on the surface (near-bottom) layer

强潮型海湾, 正规全日潮且潮汐日不等现象显著. 当外海潮波传入湾内时, 水动力沿湾口至湾顶逐渐减弱. 根据资料验证的大潮期间(2011 年 6 月 30 日 0 时

至 24 时)模拟流场分布(图 5), 港湾潮流的主流向与航道走向一致. 湾外涨潮流除东进流往安铺湾外, 沿北—东北向进入铁山港口门处, 分别沿西侧深槽和东侧深槽北上流入湾中, 此时流速大于湾外; 部分流向丹兜海, 流速略小. 受地形约束, 湾顶的涨潮流从西北向转向东北向. 湾顶的落潮流向为南向和东南向, 湾内水流沿水道向南和西南方向流出湾外. 落潮流向分布总体与涨潮流相反, 潮流运动形式属往复流. 落潮流速大于涨潮流速, 落潮历时短于涨潮历时; 小潮期间最大流速约 0.4 m/s, 大潮期间最大流速可达 0.7 m/s; 航道深槽和湾口处流速较大, 近岸处流速较小; 流速的垂向变化, 表层流速最大, 中层次之, 底层最小, 流向基本一致.

### 2.2 铁山港水体交换能力

铁山港无较大陆地径流注入, 水交换主要受潮流控制. 结合湾顶、湾中和湾口的功能区、地形和水动力诸条件, 基于水动力模型和随机游动模型的联立运算, 研究各区域水交换能力和差异. 粒子分别在高潮、落急和低潮、涨急时段释放, 对质点进行周月(30 d)运动迹线的追踪计算; 每个网格均匀分布 10 个粒子, 在水体上层和下层共释放 43 240 个粒子.

#### 2.2.1 水体交换时间的时空分布

根据本文模拟 6 月 15 日 0 时起, 35 d 铁山港的流场和式(13), 可计算出粒子在不同潮时投放时各区域的平均驻留时间, 具体如表 1.

表 1 上、下层水体的平均驻留时间

Tab. 1 The mean residence time of the upper and deep water column

潮时	湾顶		湾中		湾口		全湾	
	上层	下层	上层	下层	上层	下层	上层	下层
涨急	16.03	29.36	12.62	28.09	7.36	22.86	11.63	26.59
高潮	14.18	29.19	7.81	26.73	3.72	18.86	7.97	24.59
落急	13.83	28.99	6.99	25.79	3.79	16.97	7.58	23.51
低潮	15.38	28.80	13.18	27.81	8.72	21.94	12.17	26.01
平均	14.86	29.08	10.15	27.10	5.90	20.16	9.84	25.18

注: 平均是将 4 个潮时的计算结果做平均.

如表 1 所示, 海水平均驻留时间的空间分布呈现湾口 < 湾中 < 湾顶、上层 < 下层的特征. 铁山港上层水体的平均驻留时间为 9.84 d, 利用铁山港夏季大面调查资料的实测盐度为指标物质<sup>[21]</sup>, 根据涨潮海水交换率<sup>[22]</sup>和落潮海水交换率<sup>[23]</sup>定义估算得出, 上层海水平均驻留时间为 11.73 d, 两者结果相近. 略有差异

的原因是除地形、潮流、温盐、斜压效应及降雨、径流的综合作用外,夏季西南风产生的表层风海流对湾内上层海水的湾口输送具有阻滞影响,延长了驻留时间.垂向上海水交换率差异显著,下层水体的平均驻留时间为 25.18 d,充分交换外海水需比上层多近 2 倍的时间.海湾地形和岸形的变化造成“陷水”效应及摩擦作用、削弱湾中下层的潮流动力,使下层水体可能滞留而不易迁移;另外,铁山港欧拉余流较弱,且下层流向比较紊乱,如深槽表层余流指向湾外,底层则向湾内或向岸流动,出现流向湾顶的补偿性余流,阻碍了下层水体与外海水的交换.

海水平均驻留时间的潮时分布呈现落潮期 < 涨潮期的特征.落潮流利于海水的湾外输运,使湾内水体驻留时间明显缩短,落急时和高潮时驻留时间相近;涨潮流利于新鲜海水的湾内输运,同时对湾内水体产生顶托作用,虽然产生水体交换,但交换后仍滞留其中而未及时外泄,只能等到转流并随落潮流输向湾口,涨急和低潮时的湾内水体驻留时间变化趋势接近.因此不同潮时投放粒子的数值示踪实验可观察到,低潮时投放粒子,一般其水体的驻留时间最长,落急时投放产生的水体驻留时间最短.涨潮时段大部分粒子被迫向水动力较弱的湾顶迁移,延长了粒子输运至口外的时间;落潮时段,粒子随潮流向湾口运动,很快到达湾外.

### 2.2.2 各分区水交换率

铁山港水交换的主要特征是,自湾口向湾顶,水体交换能力自南向北依次减弱;岸界陆域的侧向黏滞使得沿岸和滩涂水体交换缓慢,口门与水道深槽则水体交换活跃.如图 6,湾口上层的水体最先开始交换,

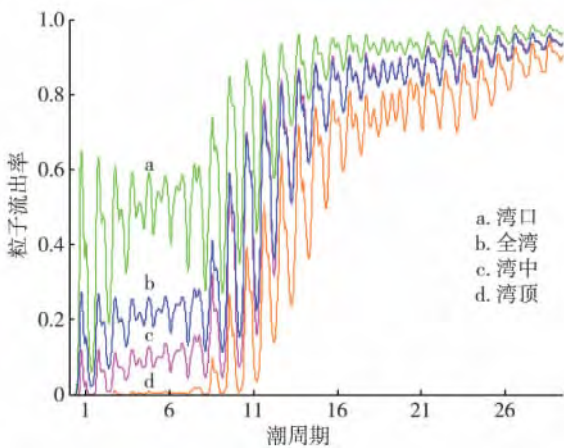


图 6 上层各区水体与外海水交换率  
Fig 6 Exchanged rate of up layer water between inner and outside of the bay

大约 1 个潮流周期后一半的水体即被置换;湾中水体随潮流往复震荡,虽有交换但多滞留湾内,8 个潮周期后水体才充分交换并大量涌入湾外;湾顶环流较弱,水交换缓慢,12 个潮周期后逐渐与湾外水交换.26 个潮周期后,上层水体交换达到稳态,此时,湾顶、湾中、湾口水体的交换率分别为 0.85,0.91,0.95.各区下层水体的交换顺序和格局与上层相似(图 7),但是整体交换能力偏低,交换达到稳态时间要超过 1 个月,30 d 内,湾口水体交换率只有 0.23,湾中不到 0.10,湾顶更弱,还不到 0.01.

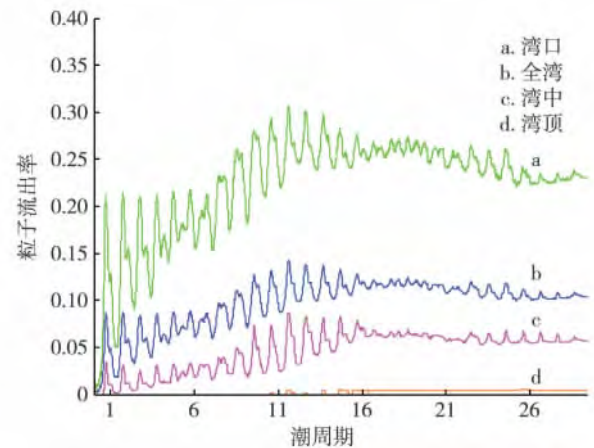
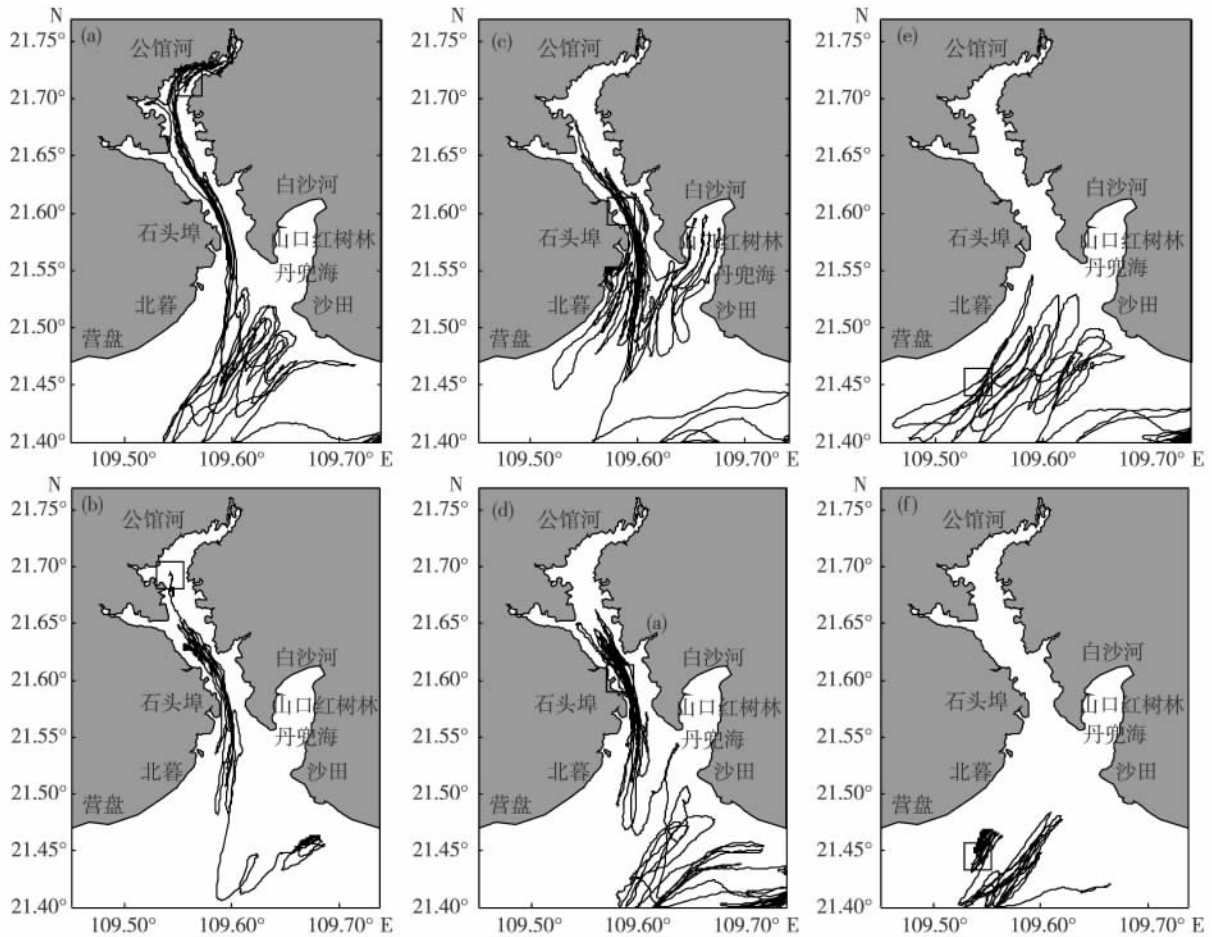


图 7 下层各区水体与外海水交换率  
Fig 7 Exchanged rate of lower layer water between inner and outside of the bay

### 2.3 铁山港沿岸主要区域水体运输轨迹

作为模拟应用,在铁山港沿岸选择典型区域,利用中性示踪粒子释放点源模拟各区域附近水体的输移,通过粒子运动轨迹的跟踪模拟,明确湾内典型区域水交换的活跃区和滞缓区,进一步分析物质在各水区之间的迁移扩散规律及港湾海水运动与物理自净能力之间的联系.如图 8 和 9,工况模拟在公馆河入海处、白沙河入海处、北暮—营盘近海、石头埠和沙田等 5 处设置模拟粒子点源.水动力模型从 2011 年 6 月 15 日 0 时开始计算,持续计算 35 d.模型计算稳定后,分别在点源的表层和近底层进行粒子释放,粒子释放时间点为 2011 年 6 月 19 日 0 时.黑色方框表示初始投放位置.每 10 min 记录一次释放粒子的位置坐标,绘制粒子一个月的运动轨迹.

公馆河入海处的表层粒子,在湾顶滞留超过 10 d (图 8(a)),容易造成物质的堆积,最终 15 d 后随落潮流迁移出湾口;石头埠释放点靠近口门水道,水流通畅,粒子在湾中南北往复运移过程中,与湾口距离逐



(a), (c), (e) 为表层; (b), (d), (f) 为近底层.

图 8 公馆河(a,b)、石头埠(c,d)、北暮—营盘(e,f)示踪粒子轨迹

Fig 8 The trajectories of particles at Gongguan river (a,b), Shitoupu (c,d), Beimu-Yingpan (e,f)

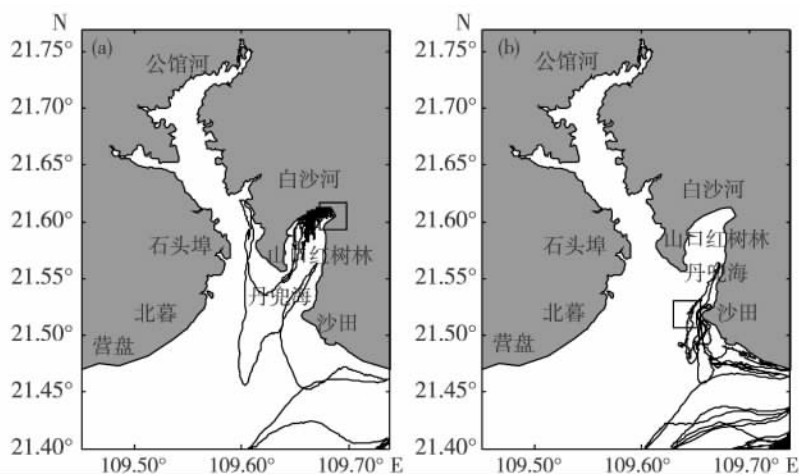


图 9 白石河(a)和沙田(b)表层示踪粒子运动轨迹

Fig 9 The trajectories of particles at Baisha river(a) and Shatian(b)

渐缩短并迅速向湾外迁移,20 个涨落潮之后即随落潮流迁移至外海. 这两处释放的粒子,涨潮时均沿着深

槽向湾顶运动,落潮时顺着东槽和西槽向外海迁移. 当两处释放的粒子迁移至北暮—沙田以北海区时,由

于沙田港外海水浅,水流分散,在潮流东向分支的胁迫下一部分粒子(图 8(c))沿沙田港深槽进入丹兜海;另一部分随外海潮波向东进入安铺湾.铁山港西岸北暮—营盘附近海域(图 8(e)),粒子在涨落潮流的作用下,运动轨迹呈东北—西南向的折返,移动范围变大且不向湾中迁移,水交换活跃,有利于物质向外海输运.相对于表层,近底层水体迁移速度缓慢,粒子的运动轨迹受地理环境影响明显.口门中央沙丘堆积将水道分为东、西两深槽,西槽较弯曲,属涨潮冲刷槽;东槽顺直宽阔,属落潮冲刷槽.故湾内公馆河、石头埠处释放的粒子基本沿东槽随落潮流向外海迁移(图 8(b)和(d));北暮—营盘附近海域,近底层释放的粒子在涨落潮流的驱动下,徘徊于东西水槽且逐渐向外海迁移(图 8(f)).丹兜海内主要为滩涂,水深较浅,因此本文只模拟了白沙河入海处和沙田附近示踪粒子在表层的运动轨迹.由图 9(a)可见,白沙河入海处释放的粒子基本滞留在丹兜海内,水交换滞缓,物质不易向湾口输运.沙田处释放的粒子主要沿东南岸向东迁移并在岸边堆积,或随涨落潮流东西向震荡并逐渐远离岸边向外海迁移.

总体上,湾内释放的示踪粒子在往复流作用下运动轨迹较为规则,沿主流方向从北向南迁移,范围扩大至西岸北暮—营盘附近海域和口门外则沿东北—西南向的折返,移动范围增大,水交换活跃,有利于物质的湾外迁移扩散.东岸沙田一带的粒子主要沿岸向东输运,粒子漂移范围较小,水交换比较缓慢,物质容易堆积于岸.白沙河入海处水体交换滞缓,物质基本滞留本埠,不易迁移.

### 3 结 论

基于随机游动模型对铁山港水体交换进行了数值模拟,分析了铁山港水交换能力的时空分布特征;通过跟踪典型区域的粒子水体输移轨迹,进一步分析了物质的迁移扩散规律及港湾海水运动与物理自净之间的联系.得出以下结论:

- 1) 铁山港水体交换主要受潮流动力控制.
- 2) 铁山港上层水体交换率快,平均驻留时间为 9.84 d,26 个潮周期后交换达到稳态;下层水体交换率较慢,平均驻留时间为 25.18 d,水交换达到稳态时间超过 1 个月.
- 3) 将湾内分为 3 个子区域,各区水体平均驻留时间总体为湾顶 > 湾中 > 湾口,水体交换能力呈湾口 > 湾中 > 湾顶的特征分布.湾口靠近外海,潮致交换强

烈.湾顶水浅且远离湾口,水交换周期最长.下层水体在湾顶和湾中的驻留时间相差不大,且有从南向北输运的趋势.当交换达到稳态,湾顶、湾中、湾口上层水体的交换率分别为 0.85,0.91,0.95.下层湾口水体只有 0.23 与湾外水置换,湾中不到 0.10,湾顶少于 0.01.

4) 落潮期湾内水体交换能力强于涨潮期.

5) 公馆河入海处、白沙河入海处、北暮—营盘近海、石头埠和沙田等 5 个主要区域附近水体运动轨迹特征显示,湾顶公馆河入海处水体交换缓慢,易产生物质的滞留;湾中和湾口水体交换活跃,有利于物质较快地运移湾外;湾内示踪粒子涨潮时沿航道向湾顶运动,落潮时顺着东槽和西槽流向湾外,并随外海潮波向东北流去;西岸北暮—营盘附近释放的粒子在外海潮波作用下,呈东北—西南向折返,有利于物质较快迁移;东岸沙田附近海域的粒子轨迹受沿岸流影响,物质沿岸向东输运;白沙河入海处的示踪粒子基本在丹兜海内滞留,水交换滞缓,不利于物质输运.

### 参考文献:

- [1] 中村武弘,富樫宏由.海水交换率による大村湾の水质汚染予測に関する研究[C/OL]//第 27 回海岸工学講演会论文集,1980:487-491. <http://library.jsce.or.jp/jsce/open/00008/1980/27-0487.pdf>.
- [2] 魏皓,田恬,周峰,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:自然科学版,2002,32(4):519-525.
- [3] 王寿景.厦门西港海水交换计算[J].台湾海峡,1990,9(2):108-111.
- [4] 匡国瑞.海湾水交换研究-海水交换率的计算方法[J].海洋环境科学,1986,5(3):45-48.
- [5] Tadeoka H. Exchange and transport time scales in the Seto Inland Sea[J]. Continental Shelf Research,1984,3(4):327-341.
- [6] 孙英兰,张越美.丁字湾物质输运及水交换能力研究[J].青岛海洋大学学报:自然科学版,2003,33(1):1-6.
- [7] 许苏清,潘伟然,张国荣,等.浔江湾海水交换时间的计算[J].厦门大学学报:自然科学版,2003,42(5):629-632.
- [8] Dimou K N, Adams E E. A random-walk, particle tracking model for well-mixed estuaries and coastal waters[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science,1993,37(1):99-110.
- [9] Bilgili A, Proehl J A, Lynch D R, et al. Estuary/ocean exchange and tidal mixing in a Gulf of Maine Estuary; a Lagrangian modeling study[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science,2005,65:607-624.
- [10] 何本茂,韦蔓新,李智.铁山港海草生态区水体自净能力

- 与水、生、化之间的关系[J]. 海洋环境科学, 2012, 31(5):662-673.
- [11] 何本茂, 韦蔓新. 铁山港湾水体自净能力及其与环境因子的关系初探[J]. 海洋湖沼通报, 2006(3):21-26.
- [12] 蒋昌波, 李媛, 官志鑫, 等. 铁山港建港前后水体交换能力的数值模拟[J]. 热带海洋学报, 2013, 32(1):81-86.
- [13] Mellor G L, Yamada T. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems[J]. Reviews of Geophysics, 1982, 20(4):851-875.
- [14] Galperin B, Kantha L H, Hassid S, et al. A quasi-equilibrium turbulent energy model for geophysical flows[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1988, 45(1):55-62.
- [15] Bugliarello B, Jackson E D. Random walk study of convective diffusion[J]. Journal of the Engineering Mechanics Division, 1964, 90(4):49-77.
- [16] Yang C T, Sayre W W. Stochastic model for sand dispersion[J]. Journal of the Hydraulics Division, 1971, 97(2):265-288.
- [17] Joy K I. Numerical methods for particle tracing in vector field [EB/OL]. [2013-09-16]. <http://graphics.cs.ucdavis.edu/~joy/ecs277/other-notes/Numerical-Methods-for-Particle-Tracing-in-Vector-Fields.pdf>.
- [18] Takeoka H. Fundamental concepts of exchange and transport time scales in a coastal sea[J]. Continental Shelf Research, 1984, 3(3):311-326.
- [19] 李小宝, 袁德奎, 陶建华. 大型海湾水交换计算中随机游动方法的应用研究[J]. 应用数学和力学, 2011, 32(5):587-598.
- [20] 邓朝亮, 黎广钊, 刘敬合, 等. 铁山港湾水下动力地貌特征及其成因[J]. 海洋科学进展, 2004, 22(2):170-176.
- [21] 潘伟然. 湄洲湾海水交换率和半更换期的计算[J]. 厦门大学学报:自然科学版, 1992, 31(1):65-68.
- [22] Parker D S, Norris D P, Nelson A W. Tidal exchange at Golden Gate[J]. Journal of the Sanitary Engineering Division, 1972, 98(2):305-323.
- [23] 柏井诚. 海水交换概念と海水交換率[J]. Journal of the Oceanographical Society of Japan, 1984, 40(2):135-147.

## Numerical Simulation on Water Exchange in Tieshan Bay Based on a Random Walk Model

WANG Li-na<sup>1</sup>, PAN Wei-ran<sup>1,2\*</sup>, LUO Zhi-bin<sup>1,2</sup>,  
ZHANG Guo-rong<sup>1,2</sup>, TAO Xiao-qin<sup>1</sup>, ZHENG Yi-fei<sup>1</sup>

(1. College of Ocean & Earth Sciences, Xiamen University,

2. Fujian Provincial Joint Key Laboratory for Marine Environmental Science, Xiamen University, Xiamen 361102, China)

**Abstract:** The tides and tidal currents in Tieshan Bay were simulated with a three-dimensional hydrodynamic model together with a random walk particle-tracking model. The temporal and spatial distribution characteristics of mean residence time and transportation of substances in Tieshan Bay were analyzed as well. The structure of the tidal currents was revealed to play a decisive role in water exchange in Tieshan Bay. Higher exchange rate was shown in the upper layer. The mean residence time was 9.84 d for the upper layer, and 25.18 d for the bottom layer. The capability of water exchange decreased significantly from mouth to top of the bay and was distinctly higher in the low-flow periods than that in the high-flow periods. Single neutral particle undergoing advection-dispersion was introduced at five typical locations in the flow model, and the path lines were simulated. Resulting from a single particle tracking run, the water exchange was faster in the area of Beimu-Yingpan and Shitoubu, which could be conducive to the physical self-purification. Moreover, the water exchange was slower in the top of the bay, as well as Baisha river and Shatian, leading to substances accumulated along the coast easily.

**Key words:** Tieshan Bay; three-dimensional numerical; random walk; water exchange; residence time