

# 深圳湾潮能通量分布特征的研究

吴婉蓉, 郑阳, 李强, 毛献忠

(清华大学 深圳研究生院, 深圳 518055, Email: maoxz@sz.tsinghua.edu.cn)

**摘要:** 海湾潮能通量的分布对湾内地形地貌的塑造、污染物迁移扩散等有重要影响, 同时地形地貌又会影响到潮能通量。本文采用 Delft3D 水动力模型研究了深圳湾内的水动力以及潮能通量分布特征。结果表明: 大潮的平均潮能通量是小潮的 2.3 倍, 丰水期湾顶潮能通量约是枯水期的 1.5 倍; 潮能通量与水深和海湾形态相关, 海湾形态决定潮能通量的分布, 而潮能通量又影响地形; 水深较大的湾口潮能通量最大, 湾中部至湾顶海床抬升和断面扩张, 潮能通量大幅下降, 只有湾口的 20%~5%; 由于潮能动力不足, 内湾泥沙淤积较为严重; 深圳河至湾顶受径流影响, 潮能通量增大, 是维系河口潮沟稳定的动力。

**关键词:** 深圳湾; 潮能通量; 地形地貌; 数值模拟

## 1 引言

海湾是一个复杂的自然系统, 受到潮汐、径流、风、降水和蒸发等多种物理过程的影响。其中, 潮汐和径流是海湾主要的动力。湾内地形地貌的演变、泥沙的运输、污染物的扩散、生物的生态结构等都在很大程度上受潮能通量的影响。另一方面, 海湾的地形地貌也会在一定程度上影响湾内的潮能分布。因此, 研究海湾内潮能通量分布特征对于了解湾内的动力和泥沙沉积过程具有重要意义。

Carbajal 等<sup>[1]</sup>模拟加利福尼亚湾的潮汐能量发现能量耗散主要集中在三角洲浅水区和海峡附近。Harari 等<sup>[2]</sup>研究了 Santos 沿海地区的潮汐循环, 表明动能跟随测深轮廓, 越深的区域越强, 接近海岸线时较弱。张学庆等<sup>[3]</sup>模拟大辽河口潮能通量分布, 得出沿程动能空间分布与水深分布一致, 势能空间分布与潮差变化一致的结论。Liu 等<sup>[4]</sup>对伶仃洋潮汐能量的研究表明单位面积潮汐能量的变化反映了地形在能量汇聚或发散中的作用。倪培桐等<sup>[5]</sup>分析了珠江黄茅海河口湾在强风及潮流作用下的能量输送。

深圳河湾是深圳与香港的界河, 深圳湾两岸分别有福田红树林国家级自然保护区和香港米埔拉姆萨尔国际重要湿地保护区<sup>[6-8]</sup>。填海工程、污水排放等人类活动对深圳湾环境产生很大影响, 也影响了湾内潮能通量的分布, 导致湾内泥沙淤积严重<sup>[7,9]</sup>。本文主要研究深圳湾的潮汐能量分布特征, 为研究深圳湾泥沙输运与淤积等提供科学依据。

## 2 研究方法

### 2.1 区域概况

深圳湾位于珠江口伶仃洋东部（图 1），是一个外窄内宽的半封闭性跨境海湾，流入珠江口后汇入南海。深圳湾水域面积约 90.8 km<sup>2</sup>，湾中轴为 NE—SW 走向，长约 13 km，宽度约 4~8 km，平均水深 2.9 m，内湾淤积严重，落潮时大面积露滩<sup>[8]</sup>。入湾河流主要有深圳河、大沙河、新洲河和香港元朗河等，深圳河流量约占入湾流量的 70%。深圳湾的潮汐类型是不规则半日潮，年均潮差 1.37 m，湾内落潮历时略大于涨潮历时。近 20 年，填海工程使水域面积缩小，湾内动力减弱，导致深圳湾内湾淤积严重<sup>[7]</sup>。

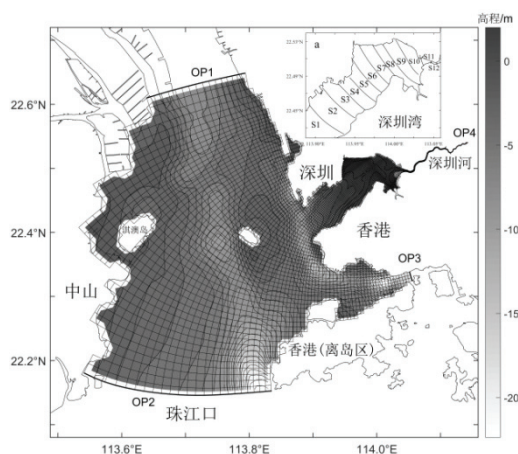


图 1 研究区域和网格，（a）深圳湾断面设置

### 2.2 建模和验证

采用 Delft3D-FLOW 水动力模型。该模型采用  $\sigma$  坐标下正交网格，求解三维浅水动力学方程<sup>[10-11]</sup>。模型的控制方程、离散格式以及边界条件等详见文献<sup>[12-13]</sup>。

研究区域包括深圳河、深圳湾以及珠江口部分水域，总面积约 1592.7 km<sup>2</sup>，共 7350 个网格，珠江口网格步长约为 220~1700 m，深圳湾内网格步长约为 60~500 m，网格和边界设置如图 1。在珠江口深圳机场站（OP1）、水域大澳潮位站（OP2）以及乐安排潮位站（OP3）断面，设置潮位边界条件；在离深圳河口大约 16 km 的非感潮河段（OP4），设置流量边界条件。文献[14]采用实测资料对潮位和潮流进行验证，高低潮位平均误差 0.06 m，流速平均误差 0.08 m/s，流向误差 30.0°，模拟结果和实测资料吻合较好，反映模型能很好地模拟珠江口和深圳湾的动力情况。模型参数率定和验证详见文献[14]。

深圳湾水深浅，垂向混合好，本研究主要分析湾内潮能通量平面分布特征。湾内以及深圳河口共设置 12 个断面，依次标记为 S1-S12（图 1a）。

### 2.3 潮能通量计算

通过模型计算得到湾内水深平均流速 ( $U, V$ ) 和潮位分布 ( $z$ )，计算分析相应网格上潮汐能及其通量。对于总水深  $H$  的每个单元，单位面积的能量  $E$  为<sup>[15-16]</sup>：

$$E = \rho H \left( \frac{U^2 + V^2}{2} + gz \right) \quad (1)$$

其中， $\rho$  为水体密度， $U$  和  $V$  分别为  $\xi$  和  $\eta$  方向水深平均流速分量。

单位时间单宽潮能通量  $\bar{E}_f$  和潮周期 ( $T$ ) 平均单宽潮能通量  $\bar{E}_{fT}$  分别为<sup>[3,17]</sup>：

$$\bar{E}_f = \left( \frac{U^2 + V^2}{2} + gz \right) \rho H(U, V) \quad (2a)$$

$$\bar{E}_{fT} = \frac{1}{T} \int_0^T \left( \frac{U^2 + V^2}{2} + gz \right) \rho H(U, V) dt \quad (2a)$$

潮能通量等于势能通量和动能通量（潮流能通量）的总和。

## 3 结果与讨论

### 3.1 潮能通量分布特征

深圳湾内潮能通量主要受潮汐和深圳河径流影响，枯水期大潮涨急时刻的潮能通量分布如图 2a，涨、落急时各个断面的潮能通量与断面宽度如图 2b。

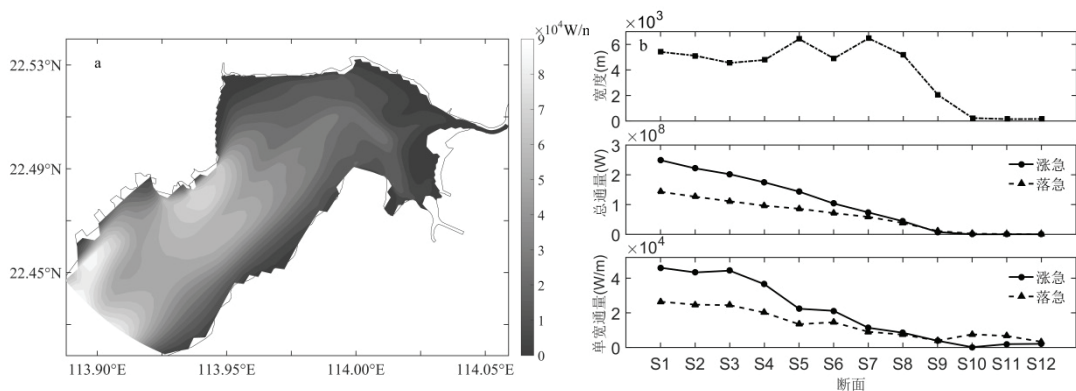


图 2 (a) 涨急潮能通量分布，(b) 潮能通量与断面宽度的关系

涨急时，潮能通量最大值发生在水深最大的湾口，约  $9 \times 10^4$  W/m。断面总潮能通量从

湾口到湾顶逐渐下降，而断面单宽潮能通量波动下降。靠近湾口的断面 S1 的单宽潮能通量约为  $4.6 \times 10^4$  W/m。断面 S2 的单宽潮能通量下降 6%，总潮能通量下降 11%，而断面 S3 有 2% 的回升，这是由于断面变窄，单宽潮能通量下降幅度减小，甚至有所回升。同样，由于断面宽度变窄，断面 S5~S6 单宽潮能通量下降 5%，总潮能通量下降 28%，断面 S7~S10 单宽潮能通量下降 66%，总潮能通量下降 89%。断面 S3~S5，S6~S7，断面宽度逐渐增大，断面 S3~S5 单宽潮能通量下降 50%，总潮能通量下降 29%，断面 S6~S7 单宽潮能通量下降 46%，总潮能通量下降 29%。到湾顶处平均潮能通量小于  $1 \times 10^4$  W/m。

落急时刻，潮能通量分布与涨急时基本相似，靠近湾口的断面 S1 的单宽潮能通量约为  $2.6 \times 10^4$  W/m，断面 S1~S8 的潮能通量都小于涨急时刻。断面 S8~S12，受深圳河径流和落潮流的共同影响，落急潮能通量大于涨急。

从潮能通量总体分布看，海湾的断面形态影响潮能通量的分布，从湾口断面 S1 到湾顶 S10，断面总潮能通量逐渐下降，当断面变宽时，单宽潮能通量的下降幅度相对于总潮能下降幅度有所增大，当断面变窄时，单宽潮能通量下降幅度相对于总潮能下降有所减小，在断面收缩幅度很大时，单宽潮能通量甚至有所增长。表明海湾形态会影响潮能通量的分布。

### 3.1.1 大小潮和径流的影响

深圳湾丰枯水期大、小潮完整潮周期内的平均潮能通量沿各断面的分布见图 3。

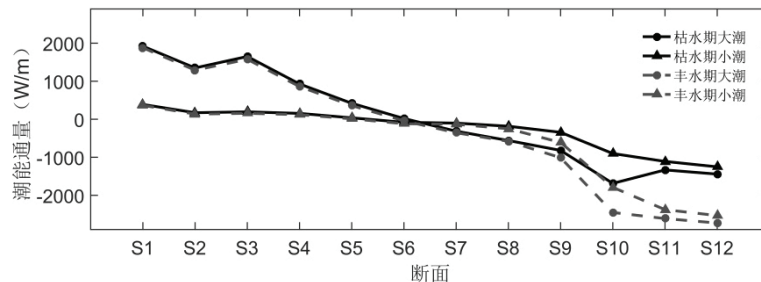


图 3 丰、枯水期湾内潮能通量沿断面分布

无论丰、枯水期，大、小潮的平均潮能通量分布基本相似，从湾口断面 S1 到断面 S6，通量向内，呈下降趋势，表示全潮周期外湾以外海水体流入为主；从断面 S6 到 S12，潮能通量向外，呈上升趋势，主要受径流和潮流共同影响，越靠近河口断面潮能通量越大。大潮时沿程潮能通量基本都大于小潮，湾内平均潮能通量约为小潮时的 2.3 倍。

无论大小潮，丰、枯水期潮能通量分布基本相似。湾顶附近潮能通量主要受深圳河径流影响，因此丰水期流量大，其潮能通量也大，湾顶丰水期平均潮能通量约是枯水期的 1.5 倍。离湾顶越远，丰、枯水期平均潮能通量差距越小，到湾中部断面 S6，两者相差不到 5%。湾中部断面 S6 到湾口丰枯水期的潮能通量基本接近。因此，无论大小潮，从能量通量角度看，深圳河的径流只影响到湾中部海域，外湾基本受潮汐控制。

### 3.1.2 潮能通量和地形的响应关系

深圳湾落急时刻潮能通量分布与地形分别如图 4a、4b，两者等值线分布特征非常相似。潮能大水深大，潮能小水深小，由此说明潮能是塑造地形地貌的动力。具体表现在：在湾口至湾中部两个主要潮流通道，湾口北侧和湾口中部到湾中北侧，潮能通量较大，因此形成了水深相对较大的主要潮流通道；海湾南侧至元朗河、以及内湾北侧至红树林一带，潮能通量很小，因此造成严重淤积，水深很小；深圳河至湾顶受径流影响，潮能通量又有增大，形成了深圳河流入深圳湾的潮沟，因此潮能通量是维系河口潮沟稳定的动力。

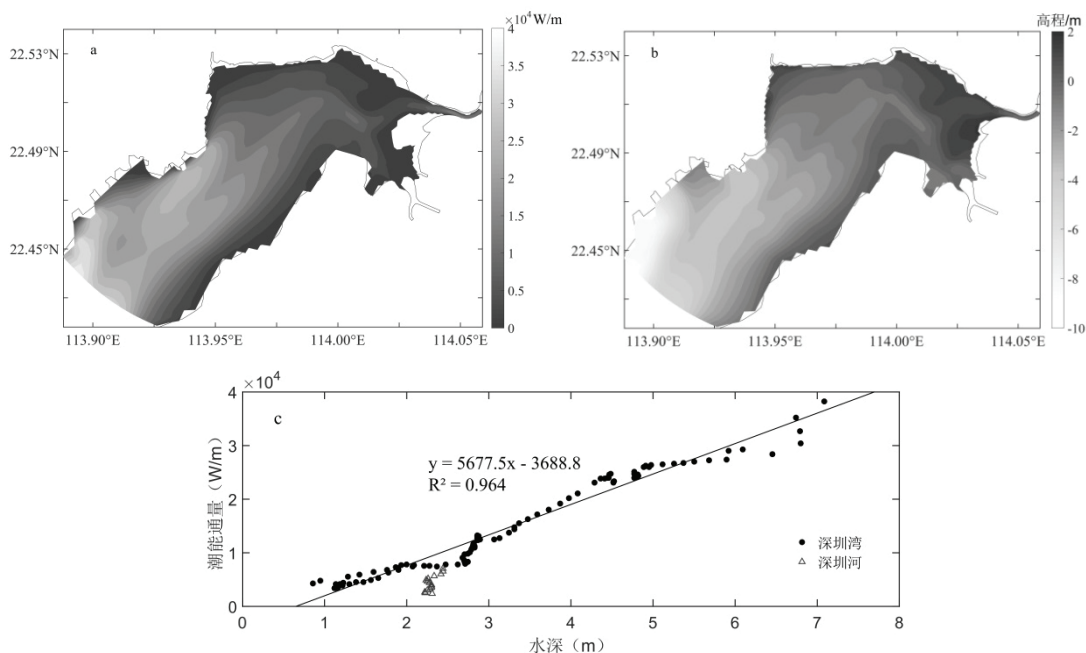


图4 (a) 落急时潮能通量分布, (b) 深圳湾地形, (c) 水深与潮能通量关系

再考察断面平均水深与断面单宽潮能通量的关系, 见图 4c, 单宽潮能通量某种程度上已消除了断面宽度的影响, 和断面平均水深有非常好的线性关系, 包括深圳湾 (拟合优度 0.964) 和深圳河 (也单独存在线性关系, 拟合优度 0.591), 断面单宽潮能通量越大, 断面平均水深也越大, 进一步说明单宽潮能通量影响地形的分布。

### 3.2 势能通量特点

由公式 (2), 势能与潮位相关, 是相对于基面 (理论深度基准面) 的参考值。假设  $\eta$  垂直于流线, 落急时刻深圳湾平均潮位约 2.60 m, 而最大平均流速约 0.25 m/s, 湾内动能通量比势能通量小两个数量级, 势能约占总能量的 95% 以上。由此, 公式 (2) 可近似为:

$$\bar{E}_f \approx \rho g z H \bar{U} \quad (3)$$

深圳湾尺度较小, 同一时刻湾内潮位相差不大 (一般小于 0.30 m), 因此式 (3) 中的

$\rho g z$  变化较小, 能量通量和单宽流量基本成正比关系。图 5 是落急时刻沿  $\zeta$  方向  $\eta$  断面平均潮能通量与单宽流量的关系, 二者呈很好的线性关系, 其斜率即为  $\rho g z$ , 如式 (4)。假设  $\zeta$  近似为流线,  $\eta$  垂直于流线, 则  $\eta$  方向的流速  $V=0$ , 湾内水位变化小于 0.3m, 用平均潮位 2.6 m 计算得  $\rho g z$  的值约为 25800。该值接近线性拟合的斜率, 二者相差小于 10%, 差异主要是由于实际流线与  $\eta$  断面之间存在一定夹角, 而且公式 (3) 忽略了动能的影响。

$$\frac{dE_f}{d(HU)} \approx \rho g z \quad (4)$$

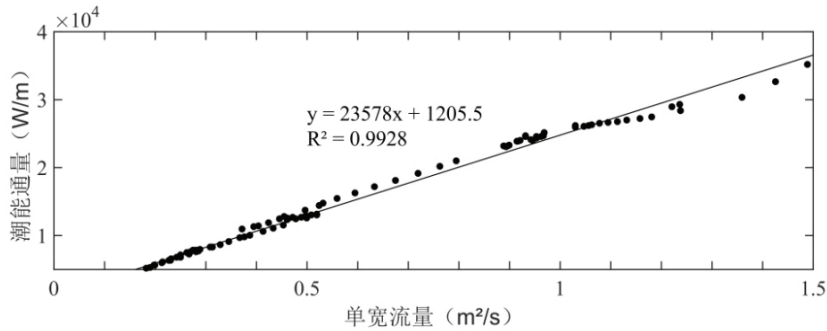


图 5 单宽潮能通量与单宽流量关系

### 3.3 潮能通量变化特点

深圳湾潮周期平均潮能通量分布见图 6a, 在湾口中中部至北侧, 潮能通量流入湾内, 而湾口中中部至南侧, 潮能通量流出深圳湾, 说明涨潮流主要沿北侧深槽流入深圳湾, 而落潮流主要从南侧流出深圳湾。深圳湾北侧以净流入为主, 南侧以净流出为主; 在湾中部北侧以及湾顶南侧都存在漩涡, 内湾北侧通量较小。湾内潮能通量分布进一步说明涨、落潮流能塑造了进、出深圳湾的潮汐主槽通道。

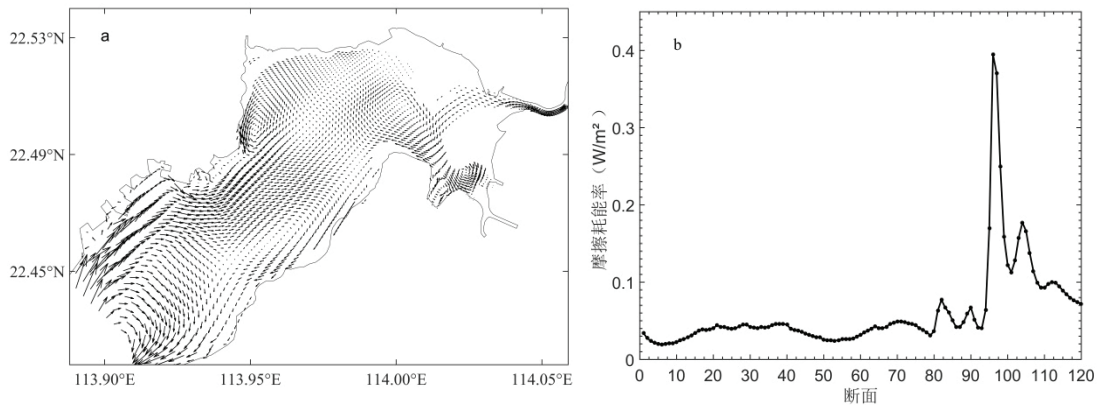


图 6 (a) 潮周期平均潮能通量分布, (b) 平均摩擦耗能率

进一步分析潮能损耗, 假定  $\zeta$  方向近似于流线,  $\eta$  方向垂直于流线, 因此  $\eta$  方向的流速  $V=0$ , 因此湾内的控制方程可简化为一维方程<sup>[18]</sup>:

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial(HU)}{\partial \xi} = 0 \quad (5a)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial \xi} + g \frac{\partial z}{\partial \xi} + gU \frac{\sqrt{U^2}}{HC^2} + \frac{\tau_T}{H} = 0 \quad (5b)$$

其中  $C$  为谢才系数,  $\tau_T$  为湍流应力项。

把方程 (5) 代入潮能通量沿  $\xi$  方向梯度, 再整理方程后可得出能量方程。

$$\begin{aligned} \frac{\partial E_f}{\partial \xi} &= \frac{\rho}{2} \cdot \frac{\partial \left[ (U^2 + 2gz) HU \right]}{\partial \xi} = \frac{\rho}{2} \left( U^2 \frac{\partial(HU)}{\partial \xi} + 2HU \cdot U \frac{\partial U}{\partial \xi} + 2gz \frac{\partial(HU)}{\partial \xi} + 2gHU \frac{\partial z}{\partial \xi} \right) \\ &= \frac{\rho}{2} \left[ U^2 \frac{\partial(HU)}{\partial \xi} + 2gz \frac{\partial(HU)}{\partial \xi} - 2HU \left( \frac{\partial U}{\partial t} + gU \frac{|U|}{HC^2} + \frac{\tau_T}{H} \right) \right] \\ &= \frac{\rho}{2} \left[ (U^2 + 2gz) \frac{\partial(HU)}{\partial \xi} - 2HU \left( \frac{\partial U}{\partial t} + gU \frac{|U|}{HC^2} + \frac{\tau_T}{H} \right) \right] \\ &= -\frac{\rho}{2} \left[ (U^2 + 2gz) \frac{\partial z}{\partial t} + 2HU \left( \frac{\partial U}{\partial t} + gU \frac{|U|}{HC^2} + \frac{\tau_T}{H} \right) \right] \\ \frac{\partial E_f}{\partial \xi} + \frac{\rho}{2} \cdot \frac{\partial(HU^2 + gz^2)}{\partial t} &= -\rho g U^2 \frac{|U|}{C^2} - \rho U \tau_T \end{aligned} \quad (6)$$

因此, 能量守恒方程中潮能损耗主要来自底摩擦和湍流。在水深较小的海湾, 相对于底摩擦耗能, 湍流耗能一般较小<sup>19</sup>。从模型计算结果看, 湍能耗散不及底摩擦效果的 10%。图 6b 为湾内各断面潮周期平均摩擦耗能率。在湾口附近(断面 S1~S3), 水深较大( $H > 5$  m), 摩擦耗能率约为  $0.025 \text{ W/m}^2$ , 摩擦耗能约占 13.8%; 湾中部(断面 S3~S8), 水深减小( $H = 2-5$  m), 摩擦耗能率增大, 平均摩擦耗能约为  $0.036 \text{ W/m}^2$ , 摩擦耗能约占 15.8%; 中部到河口(断面 S8~S12), 水深进一步减小( $H < 2$  m), 摩擦耗能率大幅增大, 平均摩擦耗能率约为  $0.102 \text{ W/m}^2$ , 摩擦耗能约占 21.5%。深圳湾全水域摩擦耗能约占总潮能通量的 18%。

## 4 主要结论

(1) 深圳湾潮能通量随潮汐和径流不同差异较大, 大潮平均潮能通量约为小潮的 2.3 倍; 大潮涨、落急时刻湾口潮能通量分别约  $4.6 \times 10^4 \text{ W/m}$  和  $2.6 \times 10^4 \text{ W/m}$ ; 径流主要影响湾

顶附近潮能通量,湾顶丰水期平均潮能通量约为枯水期的 1.5 倍,湾中部丰、枯水期相差不到 5%,到湾口,两者基本相近,说明径流只影响到中部海域。

(2)深圳湾潮能通量与水深和断面宽度相关,断面决定潮能通量的分布,潮能通量影响地形。潮能通量较大的湾口位置水深相对较大,从湾口到湾顶潮能通量下降,海床逐渐抬高,水深变小;湾中部靠近深圳一侧海湾形态收缩,潮能通量相对较大,形成主要潮流通道,水深相对较大;从湾中部至湾顶断面形态扩张,潮能通量大幅下降,只有湾口的 20%~5%,泥沙淤积较为严重;深圳河至湾顶受径流影响,能量通量增大。

(3)断面单宽潮能通量与断面单宽流量呈现较好的线性关系,线性拟合的斜率接近  $\rho g z$ 。潮能通量在传递过程中一部分由于摩擦消耗,一部分由于湍流消耗。区域摩擦耗能约占区域总潮能通量的 18%,水深较大处,摩擦耗能率相对较小,水深变小,摩擦耗能率相对增大。

## 参 考 文 献

1. Carbajal N, Backhaus J O. Simulation of tides, residual flow and energy budget in the Gulf of California[J]. *Oceanologica Acta*, 1998, 21(3):429-446.
2. Harari J, Camargo R D. Numerical simulation of the tidal propagation in the coastal region of Santos (Brazil, 24°S 46°W)[J]. *Continental Shelf Research*, 2003, 23(16):1597-1613.
3. 张学庆, 刘晓敏, 王鹏程,等. 潮-径相互作用下大辽河口潮能通量的数值模拟[J]. *水动力学研究与进展*, 2012, 27(3):331-338.
4. Liu H, Wu C Y, Bao Y. Tidal Energy Flux and Transformation in the Lingdingyang Estuary[J]. *Iranian Journal of Pharmaceutical Research*, 2011, 1376(1):379-381.
5. 倪培桐, 陈卓英. 强风作用下珠江黄茅海河口湾的潮能通量与耗散研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2016, 6:118-124,129.
6. Li R, Li R, Chai M, et al. Heavy metal contamination and ecological risk in Futian mangrove forest sediment in Shenzhen Bay, South China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2015, 101(1):448-456.
7. Zhang S, Mao X Z. Hydrology, sediment circulation and long-term morphological changes in highly urbanized Shenzhen River estuary, China: A combined field experimental and modeling approach[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 529(529):1562-1577.
8. 万由鹏, 毛献忠. 深圳湾TIN和PO4<sup>3-</sup>-P数值模拟及减排效果分析[J]. *环境科学*, 2011, 32(2): 384-391.
9. 秦华鹏, 倪晋仁, 李义天. 基于泥沙数学模型的海湾填海海岸线选择[J]. *泥沙研究*, 2002, 3:52-58.
10. Waldman S, Bastón, S, Nimalidinne R, et al. Implementation of tidal turbines in MIKE 3 and Delft3D models of Pentland Firth & Orkney Waters[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2017, 147:21-36.
11. Rahman A, Venugopal V. Parametric analysis of three dimensional flow models applied to the tidal energy sites in Scotland[J]. *Estuarine Coastal & Shelf Science*, 2017, 189:17-32.
12. Canestrelli A, Nardin W, Edmonds D, et al. Importance of frictional effects and jet instability on the morphodynamics of river mouth bars and levees[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2014,



119(1):509-522.

13. WL|Delft Hydraulics, Delft3D-FLOW User Manual[K]. The Netherlands, Deltares 2014:189.
14. 郑阳. 人工岛方案对深圳湾水环境影响的数值研究[D]. 北京:清华大学, 2017.
15. 李蕾, 高郭平, 安佰超,等. 白令海峡及其邻近海域潮汐潮能数值模拟[J]. 极地研究, 2018, 30(1):1-13.
16. 佟景全, 雷方辉, 毛庆文, 等. 不考虑局地引潮势的南海正压潮能通量与潮能耗散[J]. 热带海洋学报, 2010, 29(3):1-9.
17. Kang D, Fringer O. Energetics of Barotropic and Baroclinic Tides in the Monterey Bay Area[J]. Journal of Physical Oceanography, 2012, 42(2):272-290.
18. Hon Y C, Cheung K F, Mao X Z, et al. Multiquadric Solution for Shallow Water Equations[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1999, 125(5):524-533.
19. 欧素英, 田枫, 郭晓娟,等. 珠江三角洲径潮相互作用下潮能的传播和衰减[J]. 海洋学报, 2016(12).

## Numerical study of characteristics of tide energy flux in Shenzhen Bay

WU Wan-rong, ZHENG Yang, LI Qiang, MAO Xian-zhong

(Graduate School at Shenzhen, Tsinghua University, Shenzhen, 518055, Email: maoxz@sz.tsinghua.edu.cn)

**Abstract:** The distribution of tidal energy fluxes has an important influence on the shaping of topography and geomorphology, the transport and diffusion of pollutants, etc. At the same time, the topography and geomorphology will affect the tidal energy fluxes. In this paper, the Delft 3D hydrodynamic model was used to study the hydrodynamic and tidal energy flux distribution in Shenzhen Bay. The results show that the average tidal energy flux of the spring tide is 2.3 times of that of the neap tide, and the energy flux at the bay head during the wet season is about 1.5 times of that in the dry season. The tidal energy flux is related to the water depth and the shape of the bay. The distribution of the tidal energy flux depends on the shape of bay, and affects the topography. At the mouth with deep water, the tidal energy flux reaches the largest. The tidal energy flux decreases greatly to 20% -5% from the middle of the bay to the Shenzhen estuary, corresponding to water depth decrease and cross section expansion. The weak tidal energy results the sediment deposition at the inner bay. The tidal energy flux increases from Shenzhen estuary to the top of the bay because of the runoff, which is the driving force to maintain the stability of the tidal channel.

**Key words:** Shenzhen Bay; tide energy flux; topography and geomorphology; numerical simulation