

# 水东湾近岸海域双向射流系统初步研究\*

杨留柱<sup>1,2</sup>, 刘宏坤<sup>1</sup>, 任 杰<sup>1</sup>, 喻丰华<sup>2</sup>

(1. 中山大学近岸海洋研究中心, 广东 广州 510275;

2. 珠江水利科学研究院, 广东 广州 510611)

**摘 要:** 基于环境流体动力学数值模型模拟了水东湾动力场, 探讨了沙坝-潟湖型潮汐汊道地貌结构下的双向射流特征, 模拟结果表明: 落潮射流体受东侧岸线束缚, 发育不对称, 西侧自由发展, 东侧表现为附壁射流; 涨潮射流体西侧发育附壁射流, 东侧边界基本不受地形影响, 为自由射流。潟湖及通道内余流均指向口外, 通道外余流则表现出中间落潮优势带与两侧涨潮优势带的复合结构。在通道两侧存在一对反向的环流结构, 东侧发育微弱的逆时针环流, 西侧发育强劲的顺时针环流。

**关键词:** 潮汐汊道; 水东湾; 双向射流; 余流

**中图分类号:** P733 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2011) 02-0116-04

## Preliminary Study on the Bi-directional Jet System of Coastal Waters in the Shuidong Lagoon

YANG Liuzhu<sup>1,2</sup>, LIU Hongkun<sup>1</sup>, REN Jie<sup>1</sup>, YU Fenghua<sup>2</sup>

(1. Coastal Ocean Research Center, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;

2. Pearl River Water Resources Scientific Research Institute, Guangzhou 510611, China)

**Abstract:** The Environmental Fluid Dynamics Code numerical model is used to simulate the hydrodynamic field of coastal waters in the Shuidong Lagoon. The results show that the ebb flow is bounded by eastern shoreline and develops asymmetricly. The west ebb flow is unaffected by topography and grows freely. The east jet shows wall-attached jet properties. Residual currents in the Shuidong Bay and tidal inlet are seawards. Residual currents out of inlet show a compound structure, with the ebb flow in the middle zone and the flood flow in lateral zones. A pair of circulations in adverse directions exist on both sides of the channel, with a weak anti-clockwise circulation in the east channel and a strong clockwise circulation in the west.

**Key words:** tidal inlet; Shuidong lagoon; bi-direction jet; residual current

自 19 世纪 20 年代根据混合长度理论求出紊流射流的解以来, 射流的成果日益丰富。经典的射流理论认为, 河口出流水体和泥沙通常以轴向射流或平面射流形式扩散, 其扩散形式受惯性力、摩擦力和浮力之间的相互关系制约<sup>[1]</sup>。文献 [2-3] 对河口射流理论有了进一步的发展和完善, 提出了河口漂浮输出水流扩展和变薄模式, 并用浮力射流的

相关理论研究了密西西比河的河口过程。近年, 文献 [4-6] 用卫星跟踪漂浮器的方法发现并对爱尔兰海的非等密度射流进行了研究。上述研究成果多针对单向射流体。

水东湾位于广东省西部电白县境内, 是一个大型沙坝围抱的半封闭潟湖湾 (图 1)。海湾通过一条长 7 km、宽 500~800 m、深 5~15 m 的潮汐水

\* 收稿日期: 2010-03-11

基金项目: 广东省自然科学基金资助项目 (9151027501000111, 06023122); 国家自然科学基金重点基金资助项目 (50839005); 国家自然科学基金资助项目 (40406016); 国家 908 专项基金资助项目 (908-02-01-04)

作者简介: 杨留柱 (1983 年生), 男, 硕士; 通讯作者: 任杰; E-mail: renjie@mail.sysu.edu.cn

道与外海相通，水道两端发育有涨、落潮三角洲堆积体。由于门口较窄，瀉湖湾内主要受潮汐动力的影响，潮汐通道内、外侧出口岸线放宽，涨、落潮流皆具有明显的射流特征，并且因其距博贺湾较近，涨、落潮流皆会受到博贺湾潮流一定程度的影响。过去对水东湾的研究主要集中在自然环境与动力条件<sup>[7-8]</sup>，潮汐通道流速的不对称分布特性及射流扩散模式<sup>[9-10]</sup>；本文从一个新的视角—双向射流体系发育特征，重新审视沙坝—瀉湖型潮汐河道这种地貌结构的动力过程，研究有一定的新意，理论成果对于丰富潮汐河道的研究以及射流理论具有一定的参考意义。

## 1 资料及方法

### 1.1 资料收集

中山大学河口海岸研究所于 1982—1987 年在水东湾及其周围海域 5 次同步水文观测（含夏、秋和冬季）及多年潮位与波浪观测资料；2000—2001 年水东港单点系泊的风与波浪观测以及周围海区同步水文观测资料。

### 1.2 研究方法

观测资料仅局限在有限的空间点上，难以反映场的动力特征，本文采用具有动边界处理技术的 EFDC 数学模型为工具，来揭示沙坝—瀉湖海岸双向射流的结构。EFDC 模型在国内外已有许多成功应用，与 POM, ECOM 模型相比，EFDC 模型优势为：灵活的变边界处理技术，通用的文件输入格式，能快速的耦合水动力、泥沙和水质模块。变边界模型采用设置干湿临界水深进行判断的方法来模拟潮流的漫滩过程。在执行干湿判断过程中，全部遵循质量守恒定律<sup>[11]</sup>。本次计算设定干湿临界水深为 0.1 m。

模型研究区域北面包括水东和博贺 2 个瀉湖湾，南至小放鸡岛一线，南北宽约 12 km，西起宴镜岭，东至莲头岭，东西长约 30 km，研究范围见图 1。

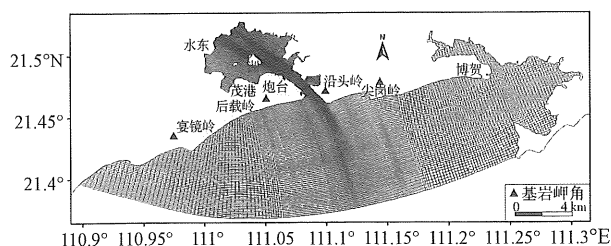


图 1 研究范围及 EFDC 模型计算网格

Fig. 1 The research region and modeling grid of EFDC

模型网格采用正交曲线网格，运用网格局部加密技术，在水东瀉湖湾和潮汐通道内进行了加密。网格数为 239（列）×198（行），网格在  $\xi_1$  方向平均空间步长 130 m，外海最大长度达 480 m，通道、瀉湖湾内步长最小为 18 m，在  $\xi_2$  方向平均空间步长 120 m，最大 280 m，通道附近最小空间步长 27 m，计算网格如图 1 所示。

水东瀉湖湾内无径流注入，不考虑河流入流边界；外海边界控制水位由广东省沿海大范围模型计算给出。根据观测资料，本文对模型计算成果与实测值进行了验证，水东港潮位站的水位平均绝对误差在 0.09 m，流速也与观测资料吻合较好。

## 2 结果与讨论

### 2.1 落急射流体

图 2a 为落急射流体分布示意图，可以看出，受到射流口地形的不对称的影响（东侧沙坝向海凸出），落潮喷射流的扩散也是不对称的：在通道口附近，落潮流由于在西岸率先脱离岸线的约束，落潮喷射流在西岸得以较充分的扩展；而在东岸落潮流出通道口后继续受到东侧沿岸沙坝的制约，流速沿程基本上没有太大变化，直至脱离东岸沙坝的约束之后才得以扩展。

射流体在脱离两岸约束向海扩展的过程中，其方向是逐渐偏向 WS 向的，可能由以下原因造成：射流体在流动过程中受到科氏力的作用而向右偏；受到潮汐通道深槽偏 WS 走向的影响；射流口地形不对称的作用；博贺湾落潮流的影响，由图 2a 可以看到博贺湾近岸的落潮流由东向西发育成为强劲的沿岸流使得水东湾射流体偏向 WS。

### 2.2 涨急射流体

图 2b 为涨急射流体分布示意图，可以看出，涨潮时潮流分别由大放鸡岛的东、西两侧向西北方进入湾外海域。其中西支由北、西北向流至宴镜岭附近海域，东支自小放鸡岛附近海域流至拦门沙以东、尖岗岭以南的海域折转东北进入博贺湾，从落急流场可以看到博贺湾落潮流主要经济的南侧于小放鸡岛附近流出外海（图 2a），所以水东湾外拦门沙以东至博贺区域有一顺时针运动的旋转流存在。而在水东湾口两侧存在着由于涨落潮流流路的差异引起的两个方向相反的环流。在通道内由于过水断面急剧缩小，涨潮流速明显比湾内及湾外海域大；另外还可以发现涨潮射流体西侧流速梯度较大，使断面流速分布呈现明显的不对称，主要由于西侧的大洲岛作为射流体的侧边界对射流的侧向摩擦作用

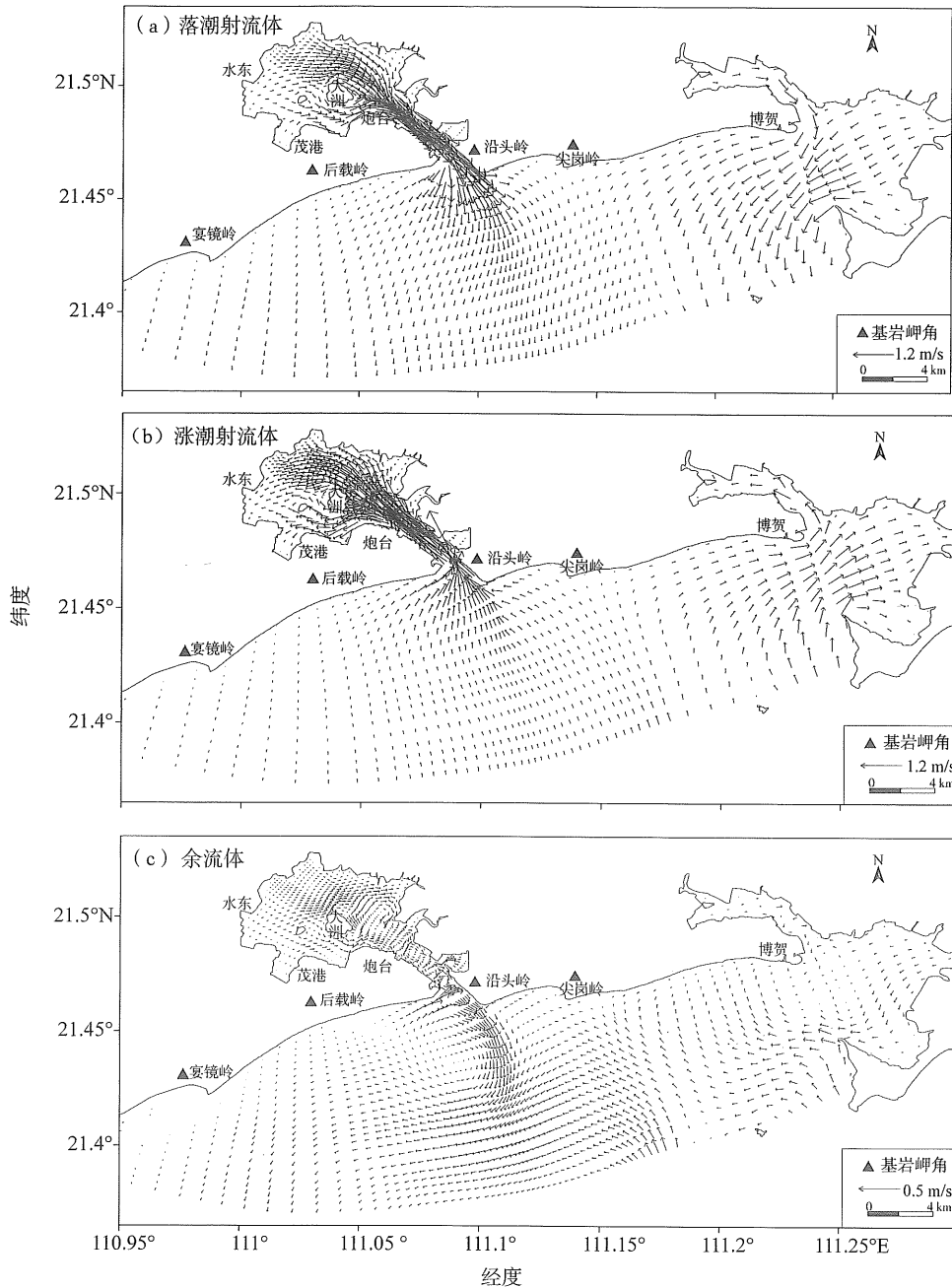


图 2 水东湾射流体结构示意图

Fig. 2 Dynamic structure of the bidirectional jet in the Shuidong Lagoon

较强, 发育附壁射流, 而射流体东侧边界基本不受地形影响, 为自由射流。

### 2.3 射流区余流结构

潮余流是潮波运动过程中因非线性作用所引起的持久性余流, 只有在岸边近海区和地形复杂的海湾或河口区潮余流才比较明显。图 2c 为余流场分布示意图, 图中可以看出水东湾附近海域的余流是很显著的。

在水东湾拦门沙以外海域由于粤西沿岸流的作用其余流方向基本以西向为主。在落潮三角洲的深

槽区余流指向外海, 表明落潮流占优势; 在潮汐通道口东、西两侧余流方向皆指向通道口, 说明此区域以涨潮流占优, 这与 Oertel<sup>[13]</sup> 提出的理想潮汐通道口外的“净落潮三角洲流场”相符, 即由辐聚的涨潮流场与自由射流的落潮流场而产生, 流场有一个轴向落潮流优势带, 两侧各有一个涨潮流优势带。在瀉湖湾及通道内余流以指向外海为主, 表明在瀉湖湾及通道也是落潮流占优势, 但在通道内的部分区域由于地形的作用余流指向瀉湖, 即以涨潮流占优。

由余流场示意图还可明显看出存在的环流现象。在落潮三角洲的通道深槽西侧存在着顺时针的环流, 这是该区域处于落潮射流体的影流区, 在强劲落潮流射流体卷吸作用下的结果。从理论分析来看, 在与深槽西侧对应的东侧区域应该发育方向相反的逆时针的环流, 但由于自东向西的沿岸流的影响该逆时针环流并不明显。另外在尖岗岭以西的博贺湾水域存在着一顺时针的环流, 与上述涨、落急流场分析结果一致; 在水东瀉湖湾大洲岛东侧水域存在着顺时针环流, 这可能是涨潮流受到大洲岛的阻隔而向东发育反向补偿流的结果。

### 3 结 论

基于 EFDC 数值模型模拟了水东湾动力场, 探讨了沙坝-瀉湖型潮汐河道这种地貌结构下的双向射流体的特征。研究表明, 水东湾涨、落潮射流表现出如下特征:

1) 受射流口不对称地形的影响, 落潮喷射流的扩散呈现不对称性, 在西岸得以较充分的扩展, 而在东岸落潮流出通道口后继续受到东侧沿岸沙坝的制约, 射流体在脱离两岸约束向海扩展的过程中, 其方向是逐渐偏向 WS 向的;

2) 涨潮射流体西侧由于大洲岛对射流体的侧向摩擦作用较强, 发育附壁射流, 而射流体东侧边界基本不受地形影响, 为自由射流。

3) 水东湾附近海域的余流作用显著, 在水东湾拦门沙以外海域余流方向基本以 W 向为主; 在落潮三角洲的深槽区余流指向外海, 表明落潮流占优势; 在潮汐通道口东、西两侧余流方向皆指向通道口, 说明此区域以涨潮流占优, 在瀉湖湾及通道内余流以指向外海为主, 表明落潮流占优。

4) 落潮三角洲的通道深槽西侧由于处于落潮射流体的卷吸作用发育顺时针的环流, 深槽东侧由于受到自东向西的沿岸流的作用, 在此发育的逆时针环流并不明显; 在尖岗岭以西的博贺湾水域存在顺时针的环流。

### 参考文献:

- [1] BATES C C. Rational theory of delta formation. *Am Assoc Petrol Geol Bull*, 1953, 37: 2119 - 2162.
- [2] WRIGHT L D, COLEMAN J M. Effluent expansion and interfacial mixing in the presence of a salt wedge, Mississippi River Delta [J]. *Geoph Res*, 1971, 76: 8649 - 8661.
- [3] WRIGHT L D, COLEMAN J M. Mississippi River mouth processes: effluency dunamics and morphological development [J]. *Geol*, 1974, 82: 751 - 778.
- [4] HILL A E, HORSBURGH K J, Garvine R W, et al. Observations of a density-driven recirculation of the Scottish coastal current in the Minch [J]. *Estuarine, Coastal, and Shelf Science*, 1997, 45: 473 - 484.
- [5] HORSBURGH K J, Hill A E, Brown J. A summer jet in St George's channel of the Irish Sea [J]. *Estuarine, Coastal, and Shelf Science*, 1998, 47: 285 - 294.
- [6] BROWN J, HILL A E, FERLAND L, et al. Observations of a seasonal jet-like circulation at the central North Sea cold pool margin [J]. *Estuarine, Coastal, and Shelf Science*, 1999, 48: 343 - 355.
- [7] 彭炳健. 粤西水东潮汐通道流速不对称性及流速模拟分析 [J]. *海洋科学*, 1987, 6: 17 - 22.
- [8] 田向平. 潮汐通道外泄水流喷射扩散对拦门沙形成的作用 [J]. *中山大学学报: 自然科学版*, 1990, 29 (3): 177 - 182.
- [9] 应秩甫. 水东潮汐通道和沿岸泥沙输移 [J]. *热带海洋*, 1988, 7 (4): 55 - 61.
- [10] 李春初, 应秩甫, 杨干然, 等. 粤西水东湾潮汐通道 - 落潮三角洲的动力地貌过程 [J]. *海洋工程*, 1990, 8 (5): 78 - 87.
- [11] HAMRICK J M. Application of the EFDC, environmental fluid dynamics computer code to SFWMD Water Conservation Area 2A [R]. The College of William and Mary, Virginia Institute of Marine Science, Williamsburg, Virginia, 1994.
- [12] 中山大学近岸海洋中心. 广东省沿海航道设计水位分析计算总报告 [R]. 广州: 广东省航道局, 2008.
- [13] OERTEL G F. Processes of sediment exchange between tidal inlets, ebb deltas and barrier islands [M] // Aubrey D G, Weisher L eds. *Hydrodynamics and sediment Dynamics of Tidal Inlets*. New York: Springer-verlag, 1988: 297 - 318.