

卢陈, 吴尧, 杨裕桂, 等. 珠江磨刀门河口环流结构动力特征分析[J]. 海洋学报, 2022, 44(12): 9–18, doi:10.12284/hyxb2022165

Lu Chen, Wu Yao, Yang Yugui, et al. Characterizing the circulation flow structure in the Modaomen Estuary of the Zhujiang River[J]. Haiyang Xuebao, 2022, 44(12): 9–18, doi:10.12284/hyxb2022165

珠江磨刀门河口环流结构动力特征分析

卢陈^{1,2,4}, 吴尧^{1,2,3*}, 杨裕桂^{1,2}, 袁菲^{1,2}

(1. 珠江水利委员会 珠江水利科学研究院, 广东 广州 510611; 2. 水利部珠江河口治理与保护重点实验室, 广东 广州 510611; 3. 河海大学 港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098; 4. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 珠海 519000)

摘要: 河口环流结构关系到物质运输、泥沙沉积和地貌变化等物理过程。根据 2019 年磨刀门河口原型观测平台洪枯季连续观测分层潮流资料, 统计洪枯季、大小潮河口东、西汉的涨落潮流及历时变化特征, 利用理论方法解析河口东西汉平面环流和重力环流结构, 进一步引入混合参数研究河口纵向环流中的潮汐应变环流。研究发现枯季东、西汉在转潮时刻存在东涨西落的平面环流结构, 洪季平面环流特征较不明显; 枯季重力环流强度整体略大于洪季, 西汉重力环流强于东汉, 表层向海环流流速可达 0.2~0.25 m/s, 而底层向陆环流流速相对较小。洪季大潮期由潮不对称性驱动的潮汐应变环流相对较大, 进而增强了纵向环流的强度。河口垂向余流结构同样表现洪枯季、大小潮的变化规律。洪季余流整体较大, 西汉在小潮期表层余流流速超过 0.6 m/s, 而东汉余流则明显呈现表层向海、底层向陆的分布特征, 枯季余流整体较小, 表明其对物质运输和河口地形塑造作用较弱。

关键词: 平面环流; 重力环流; 潮汐应变环流; 物质运输

中图分类号: P343.5; P731.21

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2022)12-0009-10

1 引言

河口的动力过程是河口泥沙等物质运输和沉积、地貌演变以及河口生态健康的重要基础。作为海洋与河流的交汇区, 河口动力过程受到径流、潮流、密度、滩槽地形、科氏力和风等物理要素的共同影响^[1-2]。复杂动力环境和边界条件驱动形成了平面环流、重力环流以及潮汐应变环流等为主导的河口动力环境, 也是河口动力学研究的基本问题之一, 关系到河口三角洲的水文过程、生态环境、河道变迁和冲淤演变等实际问题, 研究环流结构的时空变化特征并探讨其物理机制, 有助于提升河口水安全保障能力, 促进区域经济社会高质量发展^[3-4]。

由于动力条件和地形的空间变化, 河口的环流结构呈现三维分布特征^[5]。潮波在不同河道间的传播过程中存在相位差, 导致不同支汉轴向的动力过程呈现时空分布差异^[6], 形成的平面环流结构影响各支汉间悬沙的交换和分配^[7-8]。含盐水体随涨潮上溯的过程中, 与径流作用时呈现层化与混合交替的现象, 这种层化作用产生的河口纵向环流结构亦或是掺混时的湍流也对河口处表底层的悬沙输运有重要影响^[9]。目前, 对河口平面环流结构和纵向环流结构都开展了一定程度的研究, 但河口平面环流较多地关注河口湾等中大尺度的环流变化特征, 如 Chesapeake 湾^[10]、Ise 湾^[11] 和 Delaware 湾^[12] 等, 而且对于河口纵向环流中的重力环流与潮汐应变环流的区分研究相对较少^[13]。

收稿日期: 2022-04-16; 修订日期: 2022-07-09。

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(42006157); 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室“一带一路”水与可持续发展科技基金(2020492111)。

作者简介: 卢陈(1984—), 男, 湖南省永州市人, 从事河口海岸动力学方面研究。E-mail: ganghanguochen@163.com

* 通信作者: 吴尧, 男, 工程师, 主要研究河口水动力及泥沙运动。E-mail: wyaker@hotmail.com

作为粤港澳大湾区重要的泄洪纳潮口门和珠江河口最大的输水输沙通道,磨刀门河口的泥沙运动在多种动力要素作用下形成了中心拦门沙及两侧东、西汉道的典型地貌形态(图 1),河口的径潮相互作用以及典型滩槽形态反过来又进一步强化了河口的平

面环流及纵向环流结构,使之呈现更为复杂的时空变化特征^[14-15]。准确识别磨刀门河口的环流结构,有助于深入认识磨刀门河口泥沙的搬运沉积及拦门沙塑造过程,能为磨刀门咸潮上溯等水安全治理、磨刀门出海航道布置等实际问题提供理论支撑。

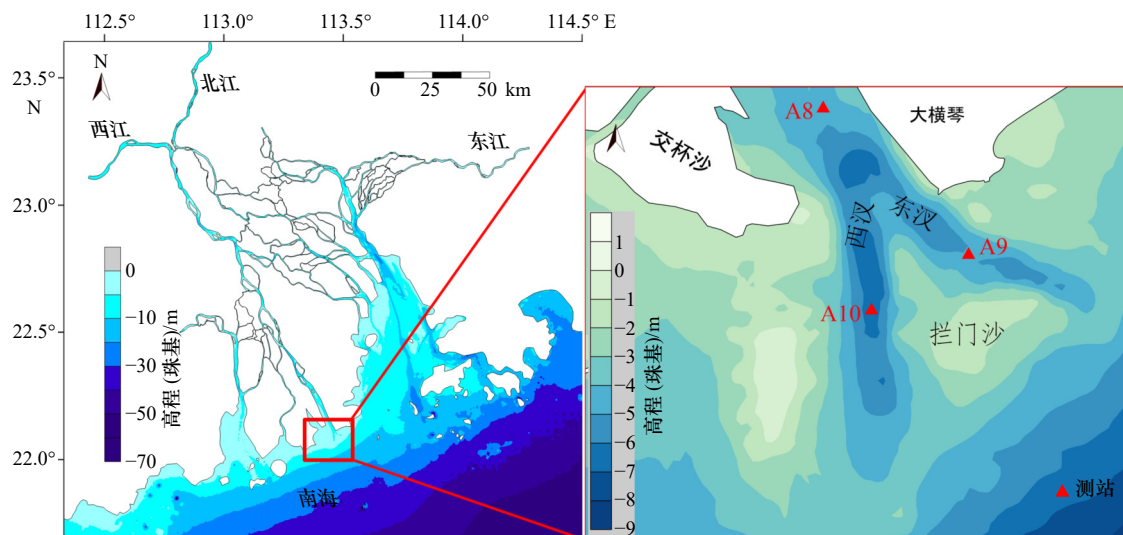


图 1 珠江口和磨刀门河口位置

Fig. 1 The location of the Zhujiang River and Modaomen Estuary

2 数据资料及研究方法

2.1 资料来源及测点布置

磨刀门作为典型的径流型口门,其环流结构和水沙动力随洪枯季径流变化而呈现显著的季节差异。根据磨刀门上游马口站的实测径流资料,其洪枯季多年平均径流量分别为 $10\,900\text{ m}^3/\text{s}$ 和 $3\,339\text{ m}^3/\text{s}$ 。磨刀门河口三灶站大潮潮差可超 2.5 m ,小潮潮差则不足 1 m ,大小潮潮动力的周期性变化显著。河口口门区含沙量则呈现空间分布差异,洪季平均含沙量介于 $0.04\sim 0.08\text{ kg}/\text{m}^3$,而枯季平均含沙量则介于 $0.01\sim 0.02\text{ kg}/\text{m}^3$ 。

本研究选取包含洪枯季的河口潮流、盐度连续观测资料,分析磨刀门河口环流动力的时空变化特征。2016年,珠江水利科学研究院在珠江河口成功投放 12 个原型观测浮标站,其中磨刀门河口共布置 3 个测站(图 1),通过声学多普勒流速仪、OBS3A、风速风向仪等,分别监测其流速、流向、盐度、浊度、风速、风向等要素。本文重点选用 3 个测站的 2019 年 6 月(洪季)和 2019 年 10 月(枯季)流速、流向数据进行分析,各测量要素的观测频率为 15 min ,声学多普勒流速仪测量的流速流向垂向分层设置为 0.2 m 每层。

2.2 测点位置

如图 2 所示,磨刀门河口测站分别布置于原滩槽格局的出口、东汉及西汉位置。其中 A8 测站位于磨刀

门水道出口大横琴水文站西侧,水深约为 6 m ,A9 测站位于原东汉槽道上,水深约为 3 m ,A10 测站位于西汉槽道出口,水深约为 4.2 m ,站点具体坐标见表 1。

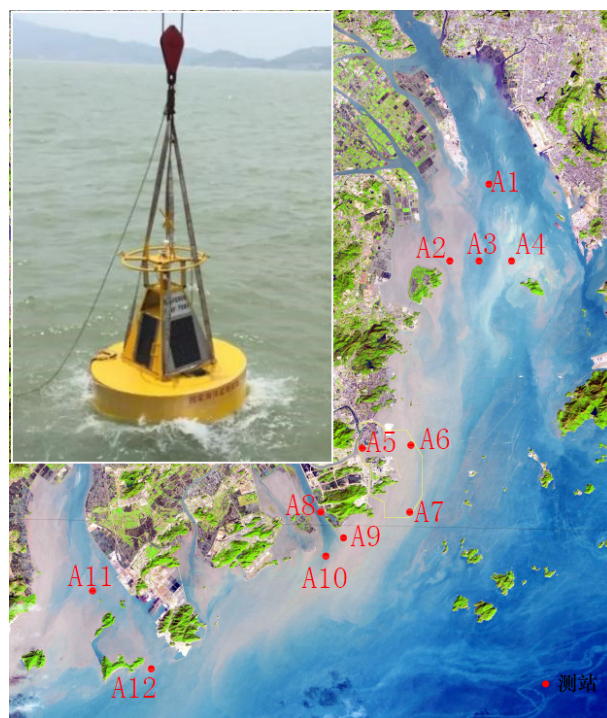


图 2 珠江河口原型观测平台站点位置

Fig. 2 The location of the prototype observation platform in the Zhujiang River Estuary

表1 测站位置表
Table 1 The field measured sites

| 测站 | 纬度 | 经度 | 水深/m |
|-----|---------------|----------------|------|
| A8 | 22°04'35.98"N | 113°28'13.01"E | 6 |
| A9 | 22°03'28.70"N | 113°34'35.28"E | 3 |
| A10 | 22°02'14.99"N | 113°31'59.00"E | 4.2 |

2.3 研究方法

2.3.1 重力环流

基于分-汇河道同步观测资料计算纵向密度梯度 $\partial\rho/\partial x$,进而定量计算重力环流^[9]:

$$u_c(\xi) = \frac{gh^3}{48N_z\rho} \frac{\partial\rho}{\partial x} (1 - 9\xi^2 - 8\xi^3), \quad (1)$$

式中,相对水深 $\xi = \frac{z}{h}$, h 为水深, z 为某一深度; ρ 为密度; x 为纵向位移; g 为重力加速度; u_c 为重力环流的流速,向海流速为正,向陆流速为负,随相对深度 ξ 而变化;涡动黏性系数 N_z 依据以下公式计算:

$$N_z = 5 \times 10^{-4} + 2.5 \times 10^{-5} h |\bar{u}| (1 + 7Ri_o)^{-0.25}, \quad (2)$$

式中, \bar{u} 为水深平均流速; Ri_o 为整体 Richardson 数,可依据以下公式计算:

$$Ri_o = -\frac{g\Delta\rho h}{\rho(\Delta u)^2}, \quad (3)$$

式中, $\Delta\rho$ 为表底层的密度差; Δu 为速度差。

2.3.2 潮汐应变环流

混合参数是衡量潮汐应变环流的重要参考,可以用来研究潮汐应变环流的变化特征。本研究引入混合参数 M 区分垂向环流结构中的潮汐应变环流,混合参数 M 定义如下^[16]:

$$M^2 = \frac{C_D u_T^2}{\omega N_o H^2}, \quad (4)$$

式中, C_D 为底部拖曳系数; u_T 为水深平均的潮流幅值; ω 为相应的潮流圆频率; $N_o = (\beta g s_{\text{ocean}}/H)^{1/2}$ 为河口最大盐度层化所对应的浮力频率, $\beta \cong 7.7 \times 10^{-4}$ 为盐度膨胀系数,相应的 s_{ocean} 为河口可能出现的表底层最大盐度差异; H 为总水深。混合参数 M 代表了潮汐时间尺度和混合时间尺度之比,当 $M > 1$ 时,混合时间尺度小于潮汐时间尺度,潮周期内出现混合和层化的交替变化,当 $M < 1$ 时,混合时间尺度大于潮汐时间尺度,河口呈部分混合或强层化特征^[13]。

2.3.3 河口余流

河口余流的物理机制除了受径潮作用的影响,还受风和纵向密度梯度的影响^[17]。由于河口余流的周期远大于潮流,本文基于分-汇河道洪枯季大小潮同步水流观测资料,使用低通滤波器定量计算河口余

流。8阶 Butterworth 滤波器是定量计算河口余流的有效方法,公式如下:

$$\bar{H}(f) = [1 + (\tan \pi f \Delta t)^{2n}]^{-1}, \quad (5)$$

式中, \bar{H} 为滤波增益,半增益周期设置为 48 h 以去除半日/全日周期的潮流信号; f 为频率,而 f_c 为半增益对应的频率; Δt 为时间间隔; n 为滤波的阶数。值得注意的是,驱动潮汐应变环流的物理机制为潮汐混合不对称,因此潮汐应变环流同样具有明显的潮周期信号,在低通滤波时可被有效地去除。

3 潮流特征分析

3.1 全年流速统计分析

在磨刀门河口,口门处(A8测站)潮流受河道边界约束,涨、落潮流向基本与河道走向一致,呈西北-东南向;拦门沙东汉(A9测站)、西汉(A10测站)涨、落潮流与深槽走向基本一致,东汉潮流为西北-东南向,西汉潮流接近南-北向。受径流作用,河口各测站落潮流速显著大于涨潮流速,西汉年平均落潮流速为 0.43 m/s,涨潮流速为 0.23 m/s,落潮流速接近涨潮流速两倍;东汉年平均落潮流速为 0.29 m/s,涨潮流速为 0.2 m/s,东西汉涨潮流速较为接近,西汉落潮流速显著大于东汉(表2)。

表2 珠江口原型观测站磨刀门水域测站平均流速和流向
Table 2 The statistical data of average flow velocity and direction at Modaomen based on the prototype observation platform in Zhujiang River Estuary

| 测站 | 潮型 | 全年 | | 枯季 | | 洪季 | |
|-----|----|-----------------------------|------------|-----------------------------|------------|-----------------------------|------------|
| | | 流速/ (m·s ⁻¹) | 流向/ (°) | 流速/ (m·s ⁻¹) | 流向/ (°) | 流速/ (m·s ⁻¹) | 流向/ (°) |
| A8 | 落潮 | 0.51 | 154 | 0.48 | 155 | 0.53 | 153 |
| | 涨潮 | 0.27 | 334 | 0.29 | 334 | 0.24 | 337 |
| A9 | 落潮 | 0.29 | 146 | 0.26 | 152 | 0.31 | 141 |
| | 涨潮 | 0.2 | 293 | 0.2 | 294 | 0.21 | 292 |
| A10 | 落潮 | 0.43 | 196 | 0.39 | 204 | 0.45 | 191 |
| | 涨潮 | 0.23 | 350 | 0.26 | 334 | 0.22 | 367 |
| 平均 | 落潮 | 0.41 | 165 | 0.38 | 170 | 0.43 | 162 |
| | 涨潮 | 0.23 | 326 | 0.25 | 321 | 0.22 | 332 |

3.2 典型时空差异分析

选取典型洪枯季(2019年6月和10月)磨刀门河口东西汉的潮流观测资料,研究磨刀门河口东、西汉潮动力的大小潮及洪枯季差异。西汉水动力强度明显大于东汉,东汉整体以东南-西北向涨落潮往复流

为主,西汉则为南向略偏西落潮流主导,涨潮动力较弱且流向较为散乱。洪季整体落潮动力强于涨潮动力,枯季西汉涨落潮动力较为相当,涨落潮动力受径流季节变化影响显著。除此之外,涨落潮流速、流向

随着周期性大小潮变化呈现波动特征(图3),西汉大潮期流速最大可超过1 m/s,小潮期流速最大仅为0.5~0.7 m/s;东汉大潮期最大流速接近0.5 m/s,小潮期最大流速基本不足0.3 m/s。

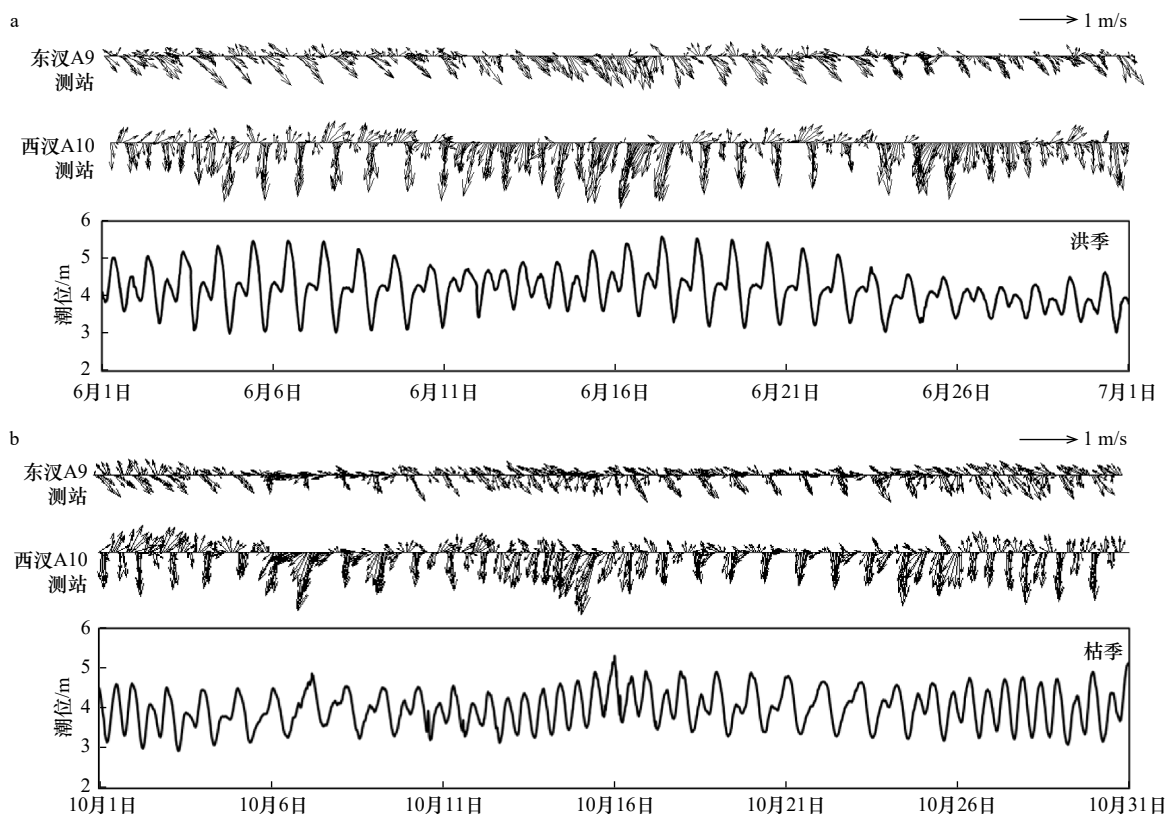


图3 2019年6月(洪季)(a)和10月(枯季)(b)东、西汉流速流向和潮位特征

Fig. 3 The characteristic of flow velocity, direction and tidal level at east and west branches in June (flood season) (a) and October (dry season) (b) 2019

进一步研究洪枯季磨刀门河口涨落急最大流速、涨落潮平均流速及历时的时空变化特征,洪季落潮动力显著大于涨潮动力,西汉落潮动力显著大于东汉,西汉洪季落潮平均流速约为0.4 m/s,东汉洪季涨潮平均流速则约为0.15 m/s(图4a,图4b)。枯季磨刀门河口涨潮动力略有增强,落潮动力相应减弱。由于西汉在枯季仍为主要的径流下泄通道,因此其洪枯季差异较不明显;东汉则存在显著的洪枯季差异,枯季涨潮动力显著增强甚至大于落潮,落潮动力显著降低,其中最大落急流速仅为0.58 m/s,比洪季落急流速减小0.24 m/s,而东汉枯季涨潮平均流速增大至0.15 m/s,其洪季涨潮平均流速仅约为0.1 m/s。

其次,东、西汉的大小潮流速,尤其是流向存在显著的差异。整体来看,西汉为磨刀门河口主槽,动力作用较强,以西南向落潮流为主导,小潮期基本无涨潮流,大潮期存在较弱的东北向涨潮流;东汉水深

较浅,动力明显较弱,以东南向落潮动力为主导,涨落潮流向较为散乱,大潮期涨潮动力增强,出现西北向涨潮流(图3)。

从图4c中可以看出,洪季东、西汉的落潮流历时均超过16 h,涨潮流历时均不足8 h,东、西汉的涨落潮历时较为接近,东、西汉主要表现为同涨或同落。枯季西汉落潮流历时为15.6 h,远超过涨潮流历时9.2 h;东汉则基本相反,其落潮流历时仅为9.0 h,涨潮流历时为15.8 h。

4 环流结构分析

4.1 平面环流特征分析

从图5可以看出,磨刀门河口洪季东、西汉涨落潮流历时基本一致,枯季东、西汉涨落潮流历时则存在明显的差异,枯季西汉落潮历时比涨潮历时长约6 h,表明西汉枯季以落潮流主导,东汉反之。因此,

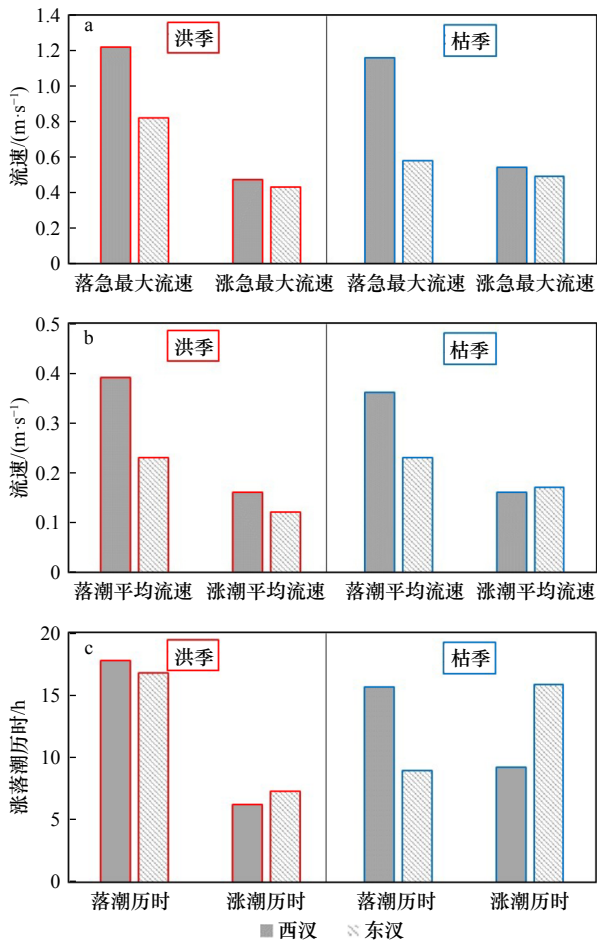


图4 洪枯季涨落潮流速、历时差异

Fig. 4 The flood and ebb tide flow, duration difference at wet and dry seasons

枯季磨刀门河口在潮周期一定时段内呈现东涨西落的平面环流形态。为进一步分析平面环流形态的洪枯季、大小潮差异,选取洪枯季大小潮时刻进行对比分析。从图5a可以看出,洪季大潮时,径流动力和潮动力均较强,东、西汉的涨落潮基本同步,涨潮流速均超过0.2 m/s,落潮流速超过0.6 m/s,此时,磨刀门河口不存在平面环流形态。洪季小潮时,径流动力占主导优势,东、西汉均以落潮动力为主导,西汉均为落潮流,对槽道的冲刷塑造作用最强,最大流速接近0.8 m/s(图5b),东汉在涨潮时刻径潮动力较为相当,流速较小且涨潮流不明显。

对于枯季大潮,潮动力作用相对较强。东汉由落转涨时,西汉仍处于落潮阶段,西汉由落转涨的时刻滞后东汉约3 h,表明在此期间,东、西汉呈现东涨西落的平面环流形态,东汉涨潮最大流速接近0.4 m/s。而后西汉由涨转落时,东汉仍为涨潮流,两者相差约3 h,此时河口仍呈现东涨西落的平面环流形态(图5c)。对于枯季小潮,在涨落潮转流时刻,东、西汉同样呈现东涨西落的平面环流结构,但其持续时间较短,约1~2 h(图5d)。综上可知,洪季径流作用相对较强时,大小潮期磨刀门河口东、西汉涨落潮基本同步,表明强径流作用会抑制平面环流的产生。对于枯水期,尤其是大潮期潮动力较强时,转潮时刻前后是平面环流出现的时机。

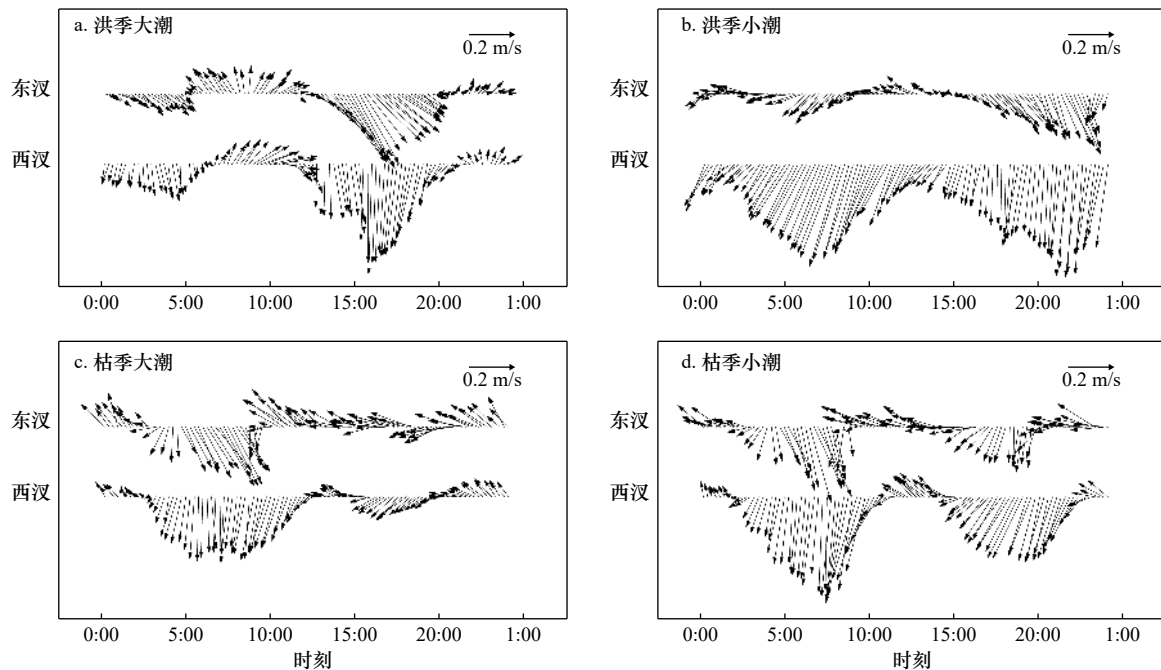


图5 平面环流的时空分布特征

Fig. 5 Temporal and spatial distribution characteristic of the plane circulation

4.2 重力环流时空变化特征分析

结合磨刀门出口 A8 原型观测平台资料, 计算河口东、西汉的纵向密度梯度, 进而利用式(1)的理论

方法定量计算重力环流的时空变化特征。从图 6 可以看出, 河口东、西汉均呈现表层向海、底层向陆的重力环流形态, 且表现出一定的时空差异性。

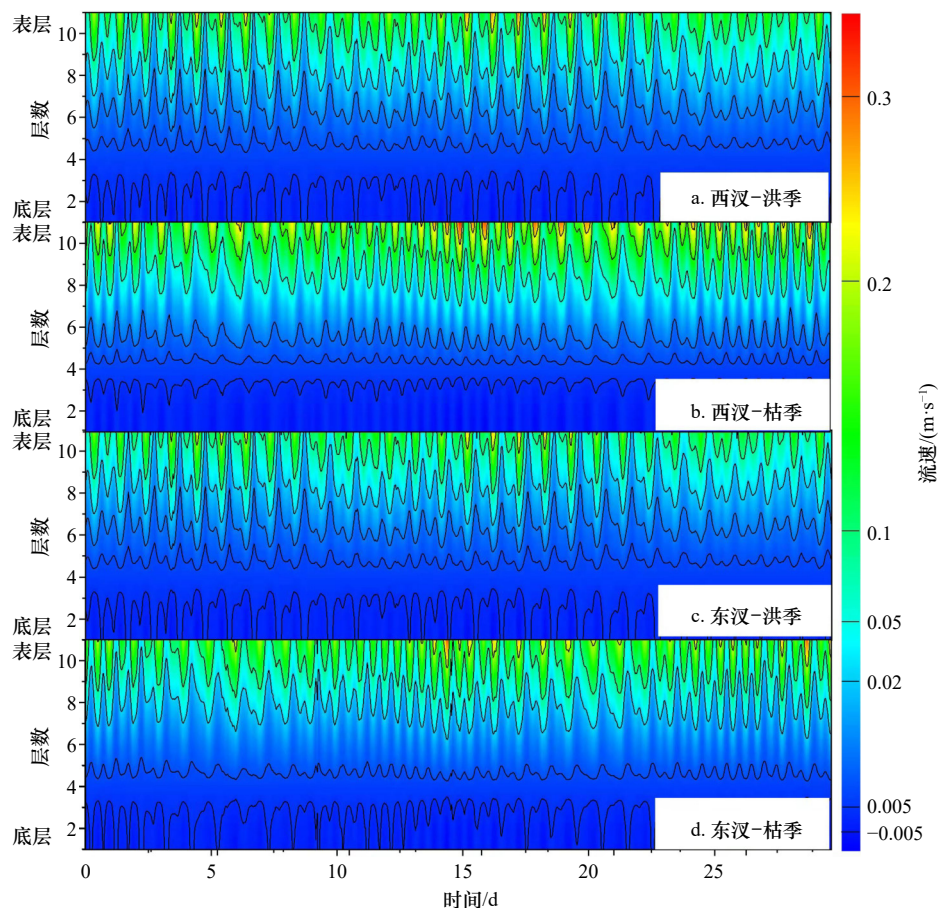


图 6 重力环流时空变化特征

Fig. 6 Temporal and spatial variations characteristic of gravity circulation

从东西汉差异来看, 磨刀门西汉水深相对较大, 西汉的重力环流强度大于东汉, 西汉局部时段表层向海重力环流流速超过 0.25 m/s, 东汉表层向海重力环流流速最大约为 0.2 m/s, 东、西汉底层向陆重力环流流速差异相对较小。

此外, 河口重力环流强度还呈现明显洪枯季及大小潮变化特征。从洪枯季差异和大小潮差异来看, 当纵向密度梯度力较小时, 枯季大潮期重力环流强度相对较大, 小潮期重力环流强度有所减小, 表层向海重力环流流速基本不足 0.2 m/s, 表明大潮期层化作用相对较强, 小潮期表底层水体混合相对较好。洪枯季的重力环流同样呈现明显差异, 枯季重力环流强度整体略大于洪季, 对于西汉, 枯季底层垂向环流强度相对较大, 表明枯季河口的层化作用较为显著。实际上, 河口沿程重力环流强度呈现不同的洪枯季及大小潮

变化特征。对于磨刀门河口东、西汉中部, 在潮流作用占主导的枯季大潮期, 重力环流强度相对较大。而对于河口不同空间位置处在洪季小潮期, 径流作用主导时层化作用较强, 重力环流现象明显。

5 环流的动力机制

5.1 平面环流

影响河口平面环流形态的因素包括科氏力、滩槽地形、风以及沿岸流等物理要素。科氏力使得河口下泄径流存在向西偏转的趋势, 因此在科氏力作用下, 磨刀门河口无论洪枯季落潮流均以西汉为主槽, 其水流水动力明显强于东汉。目前磨刀门西汉槽道深度约为 4.2 m, 东汉相对较浅, 枯水期在科氏力作用下, 径流量较小的下泄水流出现主要集中于西汉较深河槽, 是导致枯季磨刀门河口东涨西落平面环流形态

的重要原因。此外,滩槽地形也可直接影响平面环流的形成机制,由于不同汉道的长度、宽度、深度、平面形态等几何构型以及底摩擦等物理特性的不同,使得潮波在不同潮汐汉道间的传播存在振幅和相位的差异,在 Berau 河口相关研究发现滩槽地形导致相连汉道的相位差超过 2 h,是形成平面环流结构的重要物理机制^[18]。

在南海东北季风的驱动下,冬季磨刀门河口海域具有稳定西南向沿岸流,夏季磨刀门河口大小潮期的沿岸流特征各异,其受径流和季风共同影响。枯季稳定的沿岸流形态有利于平面环流结构的产生。总体来说,在涨落潮转潮期,东涨西落的平面环流形态有利于两汉中间位置处泥沙捕集,是促进磨刀门河口拦门沙发育的动力机制。而稳定的拦门沙及两侧汉道的滩槽形态,反过来亦是河口平面环流产生的重要物理要素,这反映了河口环流动力过程与滩槽形态的互馈作用。

5.2 河口纵向环流

水面纵向比降引起的正压效应、由盐水入侵引起的斜压效应与底摩擦引起的湍流混合效应之间保持平衡状态。早期研究中假定垂向上水体混合是恒定的,经典的河口纵向环流理论认为,河口盐淡水混合产生的纵向盐度梯度与河床纵向底坡度相互作用是其产生的物理机制,忽略了垂向混合和层化作用(垂向盐度梯度变化)对纵向环流的影响^[1]。实际上,仅由斜压力,即纵向密度梯度驱动的河口纵向环流称为重力环流,是河口纵向环流的重要组成部分^[19]。在前述研究中,在潮流作用占主导的枯季大潮期,重力环流强度相对较大,是河口纵向环流的重要组成成分。而在洪季较强的径流作用下,重力环流流速相对较小,河口垂向上水体混合较好。在长江口等一些国内外的重要河口研究中均发现,盐淡水混合引起的重力环流是河口纵向环流的重要组成部分^[20]。对于弱层化型和部分混合型河口而言,重力环流则不是形成河口纵向环流的主要因素,如德国莱茵河口,美国哈得孙河口。本研究在磨刀门河口对此进一步加以证实,因此经典理论中的重力环流在磨刀门的河口纵向环流物理机制研究中具有重要的指导意义。

实际上,除了重力环流,表征垂向水体在潮间混合和层化状态交替变化的潮汐应变环流也同样是河口纵向环流的重要组成部分,其驱动机制主要为潮汐混合不对称性。为了深入分析磨刀门河口纵向环流的动力结构,区分重力环流和潮汐应变环流对河口纵

向环流的影响程度^[9]。本研究进一步引入混合参数 M ,探讨潮汐应变环流的时空变化特征。洪季混合参数整体大于枯季,大潮期混合参数大于小潮期。枯季小潮时,混合参数 M 为 0.6~0.75,小于临界值 1,表明此时水体的混合时间尺度长于潮汐时间尺度,没有形成充分混合及层化的交替变化状态,这可能与枯季小潮时河口整体动力条件较弱有关。洪季大潮时混合参数为 1.51~1.89,均大于临界值 1,表明磨刀门河口水体的层化与混合交替状态驱动显著的潮汐不对称性,从而产生潮汐应变环流,进而增强河口纵向环流强度。而洪季小潮和枯季大潮时混合参数较为接近,分别为 1.05~1.55 和 1.03~1.47,变化范围整体均大于 1,表明存在一定程度的潮汐应变环流作用,但其数值小于洪季大潮的混合参数,这可能是由于洪季小潮较强的径流动力以及枯季大潮较强的潮动力对河口水体周期性的层化与混合存在一定的抑制作用。由于目前混合参数与潮汐应变环流的定量关系尚未得到深入揭示,因此无法量化计算潮汐应变环流的具体大小,本研究仅作为不同洪枯季、大小潮期间其对河口纵向环流贡献的参考。

5.3 物质输运

通常来说,河口余流可以用来表征泥沙等物质的输移方向。计算余流常用若干个潮周期内平均或者利用滤波法去除主要分潮,在此基础上研究磨刀门河口东西汉洪枯季、大中小潮的垂向多层余流特征,分析东西汉在不同径潮动力下垂向的物质输运特征。

从图 7 可以看出,磨刀门河口的余流呈现明显的表底层差异性和时空分布特征。洪季西汉呈现大量径流,在不同潮型下表底层余流方向均指向下游,此时潮动力仅对西汉的余流强度有所影响,而不改变余流方向,小潮期表层余流流速超过 0.6 m/s,中层余流流速约为 0.5 m/s,大潮和中潮期中上层余流流速约为 0.3 m/s,相比小潮条件下余流流速减小(图 7a)。由于枯季河口下泄径流量减少,枯季西汉的余流流速明显减小,小潮期垂向上余流方向均指向下游,表层余流流速可达 0.4 m/s,大潮和中潮条件下余流流速较小,基本介于 -0.1~0.1 m/s,整体来说径潮作用较为相当,呈现正压驱动的表层余流向海而斜压驱动的底层余流向陆,从余流的垂向结构看也表现为垂向环流结构(图 7b),但由于大中潮期余流强度较弱,整体对物质输运的作用相对较小。对于东汉,无论洪枯季垂向的余流均表现为表层向海、底层向陆的分布特征。其中洪季表层向海余流相对较大,余流大小为 0.2~0.3 m/s,近底层向陆余流量值超过 0.1 m/s(图 7c),枯

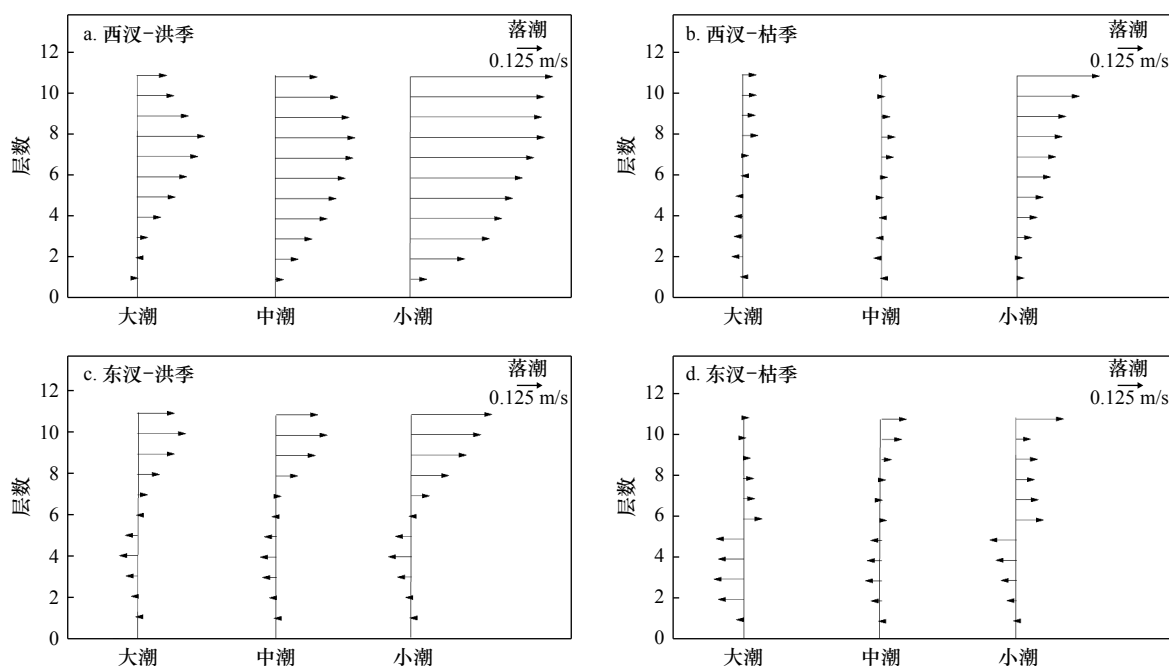


图 7 垂向河口余流的时空变化特征

Fig. 7 Temporal and spatial variations characteristic of vertical residual flow

季东汉表底层的余流强度较为相当,表底层最大余流均接近 0.2 m/s ,而方向相反,不同潮型条件下对余流强度的影响较小(图 7d)。由于与河口滩槽地形塑造息息相关的泥沙运动主要集中在近底层,由于洪枯季条件下东汉底层的余流方向均向陆,因此东汉泥沙呈现向陆推移的趋势,这与近几年东汉河道淤积特性基本一致。

结合前述分析可知,洪枯季不同径流作用下对磨刀门河口垂向的余流影响显著,无论东、西汉的垂向余流结构均表现出明显的洪枯季差异。潮差大小同样关系到河口余流的分布特征,尤其对于洪季西汉,不同潮差作用下余流强度变化明显,但不改变余流方向。潮差大小总体来说与底层向陆的余流强度呈正相关关系,而对表层的余流具有抑制作用。此外,枯季磨刀门河口典型东北季风条件会促进西汉表层的西南向余流,而对近底层泥沙运输具有显著影响的底层余流,其强度和方向直接关系到磨刀门河口拦门沙区域及两汉的地貌演变特性。总体上,余流强度及方向是直接关系泥沙等物质运输乃至河口冲淤的动力指标,而河口环流结构则通过影响垂向密度梯度使得水体呈现混合或层化状态,并改变紊动作用及湍流的垂向交换,进而控制着悬沙等物质的垂向沉降和扩散模式^[3]。探讨河口余流及河口环流结构为研究磨刀门河口地貌演变提供了良好的水动力分析基础,而深入辨析河口余流及河口环流对物质运输的贡献度和作用机制仍有待进一步开展研究。

6 结论

基于 2019 年珠江河口磨刀门东、西汉洪枯季河口原型观测平台潮流资料,分析河口涨落潮流速及历时的时空分布特征,研究河口平面环流、纵向环流结构并探讨其动力机制,主要研究结论如下:

(1) 西汉为磨刀门河口主汉,以南向略偏西落潮流为主导,小潮期基本无涨潮流,大潮期存在较弱的东北向涨潮流;东汉水深较浅,以东南向落潮动力为主导,涨落潮流向较为散乱。河口洪季落潮动力显著大于涨潮动力,枯季东汉涨落潮动力较为相当。

(2) 受科氏力、地形及风等因素影响,枯季涨落潮转流时刻呈现明显的东涨西落平面环流特征。枯季大潮东、西汉涨落潮历时相差约 6 h,枯季小潮则相差 1~2 h,较强的径流作用会抑制平面环流产生。

(3) 磨刀门河口重力环流呈现明显的时空分布特征。西汉的重力环流强度大于东汉,枯季重力环流强度整体略大于洪季。在潮流作用占主导且纵向密度梯度力较小时,大潮重力环流强度相对较大,小潮重力环流强度有所减小,表明大潮层化作用相对较强,小潮表底层水体混合相对较好。

(4) 主汉西汉在洪枯季基本呈现向海的余流,对槽道具有明显的冲刷塑造作用,东汉则表现为正压驱动的表层余流向海而斜压驱动的底层余流向陆。潮差大小则与底层向陆的余流强度呈正相关关系,但对表层的余流具有抑制作用。

参考文献:

- [1] 时钟,熊龙兵,倪智慧,等. 潮汐河口环流、湍流、混合与层化的物理学[J]. *海岸工程*, 2019, 38(1): 1-31.
Shi Zhong, Xiong Longbing, Ni Zhihui, et al. The physics of circulation, turbulence, mixing and stratification in tidal estuaries[J]. *Coastal Engineering*, 2019, 38(1): 1-31.
- [2] Kearney W S, Fagherazzi S. Salt marsh vegetation promotes efficient tidal channel networks[J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 12287.
- [3] Wu Yao, Zhang Wei, Zhu Yuliang, et al. Intra-tidal division of flow and suspended sediment at the first order junction of the Pearl River network[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2018, 209: 169-182.
- [4] 杨名名,吴加学,张乾江,等. 珠江黄茅海河口洪季侧向余环流与泥沙输移[J]. *海洋学报*, 2016, 38(1): 31-45.
Yang Mingming, Wu Jiaxue, Zhang Qianjiang, et al. Lateral residual circulation and sediment transport during the flood season in the Huangmaohai Estuary, Pearl River[J]. *Haiyang Xuebao*, 2016, 38(1): 31-45.
- [5] 高抒. 潮汐河道形态动力过程研究综述[J]. *地球科学进展*, 2008, 23(12): 1237-1248.
Gao Shu. Morphodynamic processes of tidal inlets: a review[J]. *Advances in Earth Science*, 2008, 23(12): 1237-1248.
- [6] He Yong, Wu Yao, Lu Chen, et al. Morphological change of the mouth bar in relation to natural and anthropogenic interferences[J]. *Continental Shelf Research*, 2019, 175: 42-52.
- [7] 易侃,龚文平. 伶仃洋河口横向环流[J]. *海洋学报*, 2015, 37(3): 1-14.
Yi Kan, Gong Wenping. Lateral circulation in the Lingding Estuary[J]. *Haiyang Xuebao*, 2015, 37(3): 1-14.
- [8] Fraccascia S, Winter C, Ernsten V B, et al. Residual currents and bedform migration in a natural tidal inlet (Knudedyb, Danish Wadden Sea)[J]. *Geomorphology*, 2016, 271: 74-83.
- [9] Geyer W R, MacCready P. The estuarine circulation[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2014, 46: 175-197.
- [10] Valle-Levinson A, Lwiza K M M. The effects of channels and shoals on exchange between the Chesapeake Bay and the adjacent ocean[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1995, 100(C9): 18551-18563.
- [11] Kasai A, Hill A E, Fujiwara T, et al. Effect of the Earth's rotation on the circulation in regions of freshwater influence[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2000, 105(C7): 16961-16969.
- [12] Wong K C. On the nature of transverse variability in a coastal plain estuary[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1994, 99(C7): 14209-14222.
- [13] 朱磊. 河势变化下河口环流结构及变异研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2018.
Zhu Lei. Alteration of estuarine circulation under the influence of morphological evolution[D]. Shanghai: East China Normal University, 2018.
- [14] 蔡华阳,杨昊,郭晓娟,等. 珠江磨刀门河口径潮动力耦合条件下余水位的多时空尺度分析[J]. *海洋学报*, 2018, 40(7): 55-65.
Cai Huayang, Yang Hao, Guo Xiaojuan, et al. Investigation of temporal-spatial distribution patterns of residual water level under the influence of tide-river interaction in the Modaomen Estuary, Zhujiang River[J]. *Haiyang Xuebao*, 2018, 40(7): 55-65.
- [15] 杨士瑛,鲍献文,陈长胜,等. 夏季粤西沿岸流特征及其产生机制[J]. *海洋学报*, 2003, 25(6): 1-8.
Yang Shiyang, Bao Xianwen, Chen Changsheng, et al. Analysis on characteristics and mechanism of current system in west coast of Guangdong Province in the summer[J]. *Haiyang Xuebao*, 2003, 25(6): 1-8.
- [16] Officer C B. *Physical Oceanography of Estuaries (and Associated Coastal Waters)*[M]. New York: John Wiley and Sons, Inc., 1976.
- [17] Schwing F B, Kjerfve B, Sneed J E. Nearshore coastal currents on the South Carolina continental shelf[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1983, 88(C8): 4719-4729.
- [18] Buschman F A, Hoitink A J F, van der Vegt M, et al. Subtidal flow division at a shallow tidal junction[J]. *Water Resources Research*, 2010, 46(12): W12515.
- [19] Holleman R C, Geyer W R, Ralston D K. Stratified turbulence and mixing efficiency in a salt wedge estuary[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2016, 46(6): 1769-1783.
- [20] 张丽芬,杨作升,张凡,等. 长江河口南槽纵向余环流: 径流、潮汐和地形耦合机制[J]. *中国科学: 地球科学*, 2021, 64(12): 2129-2143.
Zhang Lifen, Yang Zuosheng, Zhang Fan, et al. Longitudinal residual circulation in the south passage of Yangtze Estuary: combined influences from runoff, tide and bathymetry[J]. *Science China Earth Sciences*, 2021, 64(12): 2129-2143.

Characterizing the circulation flow structure in the Modaomen Estuary of the Zhujiang River

Lu Chen^{1,2,4}, Wu Yao^{1,2,3}, Yang Yugui^{1,2}, Yuan Fei^{1,2}

(1. Pearl River Hydraulic Research Institute, Pearl River Water Resources Commission, Guangzhou 510611, China; 2. Key Laboratory of Pearl River Estuary Regulation and Protection, Guangzhou 510611, China; 3. College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 4. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519000, China)

Abstract: The structure of circulation flow is related to physical processes such as material transport, sediment deposition and landform evolution. According to the continuous stratified tidal current data derived by the prototype observation platform of Modaomen Estuary in flood and dry seasons in 2019, the flow characteristic during the spring and neap tide at wet and dry seasons in the east and west branches were analyzed. Theoretical methods were used to explore plane circulation and gravity circulation structure in the east and west branches. Besides, the longitudinal circulation with the tidal strain circulation was explained by the mixed parameter. Plane circulation flow structure with ebb at west branch and rise at east branch during the dry season was found. Moreover, gravitational circulation at dry season was generally larger than that at wet season, and the gravitational circulation at west branch was stronger than the east branch, with 0.2–0.25 m/s surface velocity and much lower bottom velocity. The tidal strain circulation driven by the tidal asymmetry at wet season spring tide was relatively higher, which tends to favor the magnitude of vertical circulation. Additionally, the multi-layer residual current also displays seasonal and tidal variations. The residual current at wet season was relatively larger than the dry season, with the surface residual flow velocity more than 0.6 m/s during the neap tide at west branch. However, the downstream residual current at surface and upstream residual current at bottom was found at east branch. Much lower residual current velocity was found at dry season, indicating that the impact on the substance transport and morphological evolution was lower.

Key words: plane circulation; gravitational circulation; tidal strain circulation; material transport