

河口航道双丁坝影响下异重流运动特性

黄 硕¹, 黄文锐², 刘曙光¹, 姜 厦¹, 沈 淇³

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 佛罗里达州立大学 工程学院, 塔拉哈西 32310; 3. 上海河口海岸科学研究中心, 上海 201201)

摘要: 在河口地区, 由密度梯度驱动而产生的异重流是影响航道内泥沙输移的重要因素之一。作为航道整治中常见的建筑物, 丁坝群可以缓解航道的泥沙淤积问题、提高通航能力。为探究双丁坝对异重流运动特性的影响, 运用粒子图像测速系统(PIV)开展了开闸式异重流实验, 研究了在不同束窄系数情况下, 航道异重流稳定阶段内的流场及湍流特性, 并对比分析了异重流在两个丁坝位置特征断面处的单宽流量及总流量。结果表明, 双丁坝改变了航道内的流场, 异重流在经过束窄断面后会向第二个丁坝后部区域横向扩散, 进而使得流速加大、高度降低; 异重流在两个丁坝束窄断面的单宽流量近似相同, 且与束窄系数无关; 异重流在束窄断面的总流量与断面宽度成正比, 在实际工程中可以通过适当调整丁坝长度来控制侵入航道的异重流总量。

关键词: 异重流; 双丁坝; 粒子图像测速; 流速场; 湍流特性; 流量

中图分类号: TV14

文献标志码: A

Effects of Double Groins on Motion Characteristics of Density Current in Estuarine Navigation Channel

HUANG Shuo¹, HUANG Wenrui², LIU Shuguang¹, LOU Sha¹, SHEN Qi³

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Florida State University, FAMU-FSU College of Engineering, Tallahassee 32310, USA; 3. Shanghai Estuarine and Coastal Research Center, Shanghai 201201, China)

Abstract: In estuaries, the density current driven by the density gradient is one of the most important factors affecting sediment transport in the channel. As the common buildings in the channel regulation, the groin group can alleviate the siltation and improve the navigation capacity. In order to explore the influence of double groins on the motion characteristics of density

current, the particle image velocimetry (PIV) was used to measure the flow fields and turbulence characteristics of the lock-exchange density current in the stable stage under different narrowing coefficients. The unit flowrate and total flowrate of the density current at the two groin sections were compared. The results show that the double groins change the flow field in the channel. After passing through the narrowed sections, the density current diffuses laterally to the rear area of the second groin, resulting in the increase of velocity and the decrease of height. The unit flowrate of the density current in both sections of the two groins is approximately the same, which is independent of the narrowing coefficient. The total flowrate of the density current in the narrowed section is proportional to the width of this section. In practical engineering, the appropriate lengths of the groins can control the total amount of density current intruding channel.

Key words: density current; double groins; particle image velocimetry; velocity fields; turbulence characteristics; flowrate

异重流指的是两种密度不同的流体, 因密度差异而发生相对运动的现象^[1]。河口作为河流与海洋的交汇区域, 盐度梯度大, 海洋盐水由底层潜入上溯, 河流淡水则由上层下泄, 进而形成了河口航道盐淡水异重流。

河口地区的盐淡水混合与分层化是一个重要的物理过程^[2], 河口水平方向上的密度梯度在重力作用下引起河口环流^[3], 导致了河口地区最大浑浊带的形成和航道内泥沙的大量淤积^[4-5]。为缓解河口航道泥沙淤积并提高通航能力, 世界各地的大型河

收稿日期: 2022-08-30

基金项目: 国家自然科学基金(51961145106); 上海市科技创新行动计划(22ZR1464200, 22230712900); 土木工程 I 类高峰学科建设项目(2022-3-YB-03); 上海市科技计划(21DZ1201002)

第一作者: 黄硕(1993—), 男, 博士生, 主要研究方向为河口异重流。Email: huangshuo@tongji.edu.cn

通信作者: 刘曙光(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为海洋科学、资源与环境、水利工程、岩土工程。E-mail: liusgliu@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

口通常采用修建导堤和丁坝群的方式开展航道整治工作^[6-7],但部分航道仍存在疏浚量远超预估值的问题^[8]。

河口航道内的丁坝群等整治建筑物改变了航道区域的水流结构^[9-10],加大了上游径流下泄和外海高盐水体入侵的阻力,影响着异重流的运动。由于航道回淤与河口异重流关系密切,是亟待解决的重要问题,近年来对河口航道内盐淡水异重流的研究日益增多。Huang等^[11]利用河口现场实测资料,将潮汐信号从时间序列数据中过滤出去,得出了异重流和盐度之间的经验关系。Zhu^[12]等研究了长江口深水航道整治工程后束窄的航道对分层流受潮汐作用的响应过程。Ma等^[13]对比分析了长江口深水航道内有无导堤与丁坝对河口环流和盐度分布的影响。Shen^[14]基于北槽深水航道实测资料分析了航道近底高含沙量横、纵向运移规律及泥沙捕集机制。然而由于航道流场受到径流、潮汐、风浪和密度梯度等多种动力因素的共同影响^[15],使得航道内水动力变化非常复杂。相较于潮流等往复流作用和风暴潮等突发性作用,河口异重流对航道内泥沙淤积的影响很难从实测数据或数值模拟中单独分离出来,于是一些学者通过开展水槽实验对异重流特性进行直接研究。郭浩森^[16]利用PIV开展了不同水深及盐度差条件下异重流水槽实验,并研究了盐淡水异重流湍流特性。Huang^[17]等通过水槽实验,研究了不同长度的单丁坝对异重流的影响。此外还有研究人员分析了双重淹没式障碍物对异重流的影响^[18-19],但研究重点是异重流头部运动及掺混特性等。目前对于丁坝群束窄的航道内盐淡水异重流的运动特性及异重流通过丁坝群束窄断面的输移量的研究还比较少。

双丁坝是最简单的丁坝群,可以作为研究丁坝群的单元^[20]。因此本文利用PIV开展了概化室内水槽实验,通过研究双丁坝对异重流运动特性的影响表征河口航道内丁坝群束窄作用对盐水楔异重流引起的河口环流的影响,相关成果可以为河口航道的整治与管理提供理论支持。

1 实验设置

1.1 实验装置与方法

实验在矩形有机玻璃水槽中完成,水槽长180 cm,宽(W_0)22 cm,高30 cm,底部与地面平行。水槽右侧为长30 cm的盐水室,左侧为长150 cm的淡水室,并由密封铝制隔板隔离分开,两侧的水深(h_0)均

为15 cm。丁坝由透明有机玻璃制成,长度为 L_g ,高度为18 cm,厚度为2 cm。随着隔板被瞬间拉起,左侧的盐水沿水槽底部侵入淡水形成异重流。对于开闸式异重流的运动过程,Huppter等^[1]通过理论分析和实验证实异重流生成后首先经历短暂的加速阶段,随后会进入坍塌阶段并以定常速度传播行进约10倍盐水闸室长度^[21],最后进入减速阶段。实验中丁坝1放置在距离闸门70 cm位置处(约2.3倍闸室长度),异重流将会以定常速度运动至丁坝断面并受到丁坝的阻挡作用。水体的盐度通过盐度计(WTW-Multi 3410)测量得出,为保证实验中盐水盐度的准确性,所有实验均在20℃室温下进行。实验装置如图1所示。

实验所用的PIV系统生产自美国TSI公司,光源为双脉冲激光,激光能量为200 mj,电荷耦合器件(CCD)相机分辨率为 2048×2048 像素,通过同步器控制激光与相机的同步触发,系统采集频率为7.25 Hz,用于追踪粒子的示踪剂直径为5 μm 。为了获得异重流在垂直和水平两个方向的流场信息,相机分别放置在水槽的正前方与正上方。垂直激光设置在距离水槽侧壁11 cm处,观测区域大小为15 cm \times 30 cm;水平激光设置在高于水槽底部3 cm处,观测区域大小为22 cm \times 30 cm,观测区域位置如图1所示,所有数据采集均于异重流碰到水槽左端边壁前完成。为便于后续实验结果分析,选择丁坝1与丁坝2位置为特征断面1-1、2-2,并以坝头连线为分界线将观测区分为航道区与扩散区。

1.2 实验方案与参数

异重流的驱动力是密度差($\Delta\rho$),即航道内淡水和海水的盐度差(ΔS)。异重流在固定水深的航道内传播时,盐度(密度)梯度是影响密度流运动速度的决定性因素^[16]。长江口深水航道内的盐度范围约在15 ppt至20 ppt之间^[14, 22],而靠近海洋、距离陆地最远的丁坝附近水体盐度约为20 ppt^[23],因此本文选取盐水盐度 $S_s = 20$ ppt作为实验的盐度,淡水盐度(S_f)近似为0可忽略不计。实验水深(h_0)固定为15 cm,前后双丁坝长度相同,参照长江口深水航道整治工程中丁坝群长度与间距比例,并结合实验水槽PIV观测范围,最终确定两个丁坝同侧放置,间距(D)为9 cm。选择两种不同丁坝长度并以无丁坝情况为对照组开展实验。当初始宽度为 W_0 的航道受到双丁坝束窄作用后,丁坝处特征断面的航道区宽度 W 为

$$W = W_0 - L_g \quad (1)$$

航道的束窄系数 N_c 则可以定义为

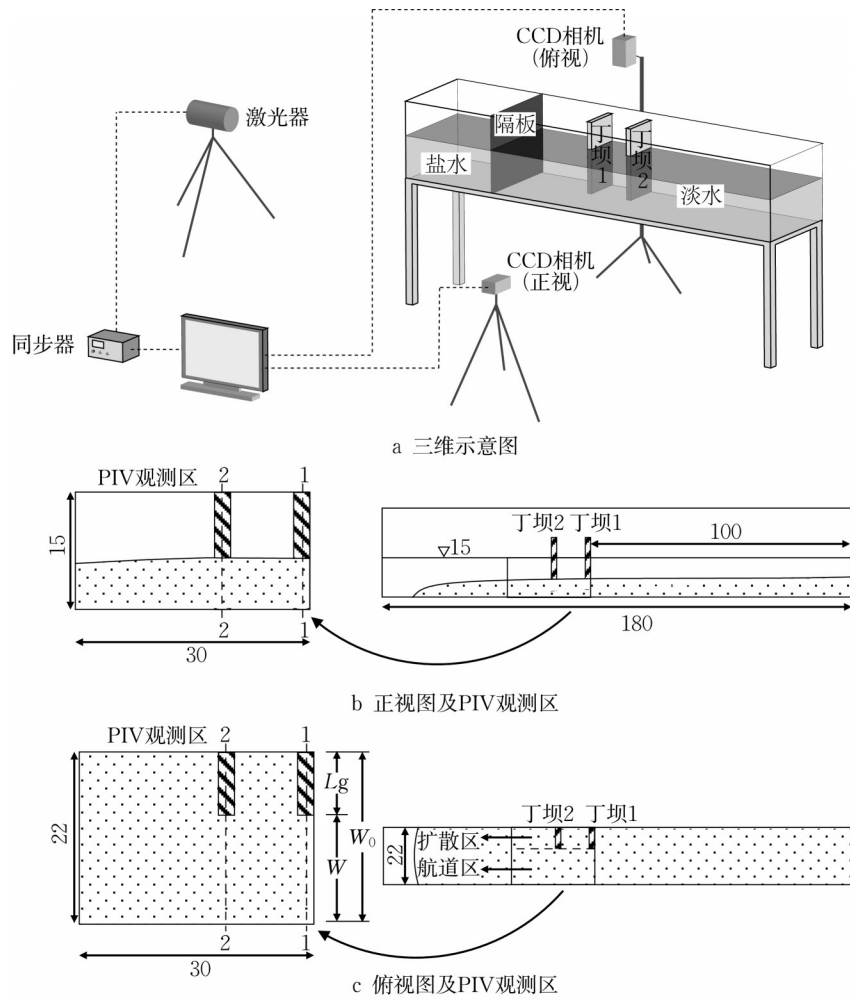


图1 实验装置示意(单位:cm)

Fig.1 Schematic view of experimental setup (unit: cm)

$$N_c = \frac{L_g}{W_0} \quad (2)$$

因此, $N_c = 0$ 意味着航道内不存在丁坝, $N_c = 1$ 则表示航道被丁坝完全截断。实验具体参数如表1所示, 其中, h_0 为水深; ΔS 为盐度差; S_s 为盐水盐度; S_f 为淡水盐度; L_g 为丁坝长度; N_c 为束窄系数; D 为丁坝间距。

表1 实验初始工况及参数

Tab.1 Main initial parameters of the experimental runs

工况	h_0/cm	ΔS	S_s	S_f	L_g/cm	N_c	D/cm
1	15	20	20	0	0	0	—
2	15	20	20	0	3	0.14	9
3	15	20	20	0	8	0.36	9

2 结果分析

处于坍塌阶段内的开闸式异重流经过丁坝束窄断面后, 受到丁坝的阻挡作用其定常速度运动状态被干

扰, 随着异重流的继续运动及向坝后区域的扩散, 在经过一个不稳定的调整阶段后, 丁坝断面附近区域内的异重流存在一个高度、流速和流态等在前后时刻比较接近的相对稳定阶段, Huang等^[17]的实验结果也证明了这一点, 之后丁坝断面区域附近的异重流流速、高度等逐渐降低。本文的结果分析主要针对在PIV观测区域内处于相对稳定阶段的异重流开展, 用来表征河口区域由密度梯度引起的河口环流的持续入流状态。

2.1 PIV观测区域内异重流处于相对稳定状态的流速场特性

2.1.1 异重流垂直方向流速场(正视)及高度

在河口航道中, 异重流沿着航道底部向陆运动, 与上层淡水的运动方向相反, 水平流速也表征着异重流沿航道运动的实际速度大小, 直接影响着航道内异重流的通量。图2描述了稳定阶段内不同束窄系数下异重流垂直方向上的水平流速云图。为进一步分析不同束窄系数对异重流高度及流速的影响, 提取稳定状态

下异重流的轮廓线,如图3a所示,并计算异重流在 $x = 0 \sim 30$ cm范围内各垂线上的最大流速 u_{\max} ,得到垂线最大流速沿 x 方向分布情况,如图3b所示。

结合图2与图3可以得出,当 $N_c = 0$ 时同一深度下异重流水平流速沿 x 方向变化不大,异重流高度波动程度也较小。随着双丁坝的加入,异重流在丁坝1、2之间的航道区内水平流速与高度分布特性与无丁坝时几乎相同,双丁坝的束窄效果主要作用于丁坝2断面后部区域($x = 10 \sim 30$ cm)。2-2特征断面右侧的航道区与扩散区内存在密度梯度与速度梯度,异重流在经过丁坝2后在向右侧纵向流动的同时还存在横向扩散,异重流高度塌陷,但流速增大。此外,通过对比图2b与图2c可以发现,束窄系数越大,意味着更多的异重流在第二个丁坝断面后发生横向扩散流向扩散区,因此在2-2特征断面右侧区域内异重流的高度越低,同时最大流速也越大。

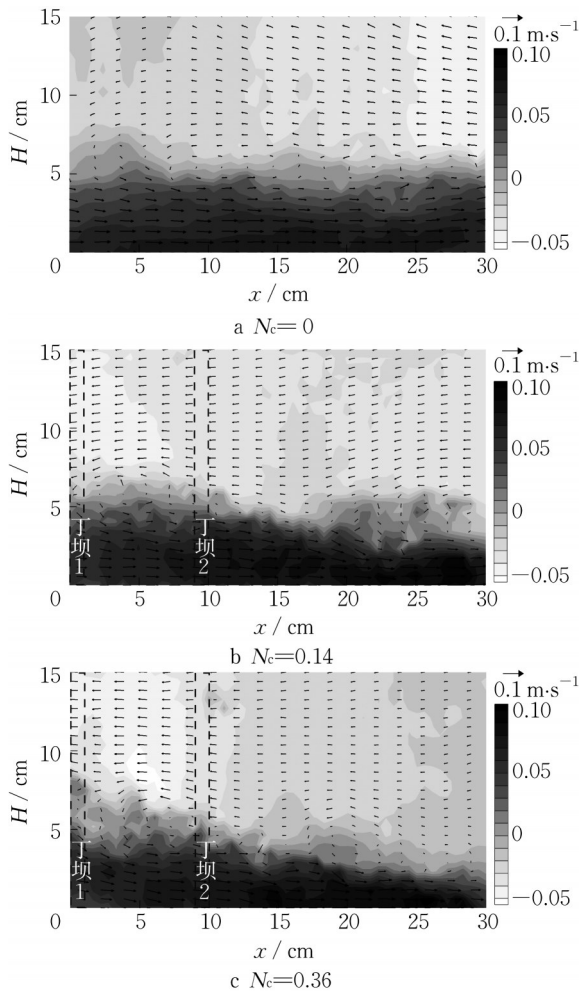


图2 不同束窄系数 N_c 下异重流水平流速云图(正视图)
Fig.2 Horizontal velocity fields of density current under different narrowing coefficients (front view)

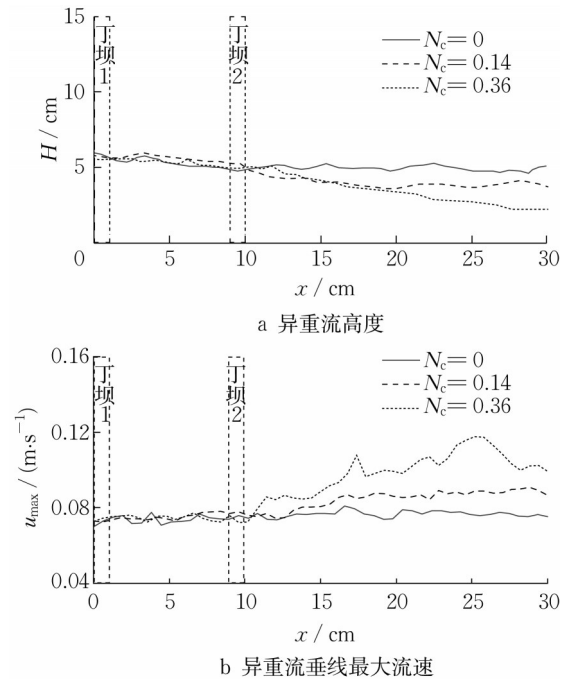


图3 不同束窄系数 N_c 下异重流高度及垂线最大流速沿 x 方向分布情况

Fig.3 Distribution of height and vertical maximum velocity along x direction of the density current under different narrowing coefficients

2.1.2 异重流水平方向流速场(俯视)

通常为了简化对异重流的分析,可以忽略水槽的宽度,进而转化为二维的研究,这时仅需关注异重流垂直方向的特性。然而当丁坝存在时,由于丁坝的阻挡作用导致异重流向扩散区运动,简单的垂向分析已不再适用,还应该对水平方向异重流特性进行分析。因此,为了进一步研究丁坝对异重流的影响,选择高于水槽底部3 cm的水平面,探究不同束窄系数下水平剖面的异重流特性,稳定状态俯视流速场如图4所示。

对于 $N_c = 0$ 情况,异重流水平方向上的流速分布特征在横向沿程上变化不大,并且在纵向上同样分布均匀。从图4b、4c中可以发现,异重流在双丁坝之间的扩散区内流速很小,而在丁坝2左侧的航道区内流速分布整体较为一致,在2-2特征断面右侧区域,异重流的横向扩散增大了其在航道区内的流速。

根据俯视流场,异重流沿 x 方向上的航道区平均流速 \bar{u} 可以计算为

$$\bar{u} = \frac{1}{W} \int_0^W V_i dw \quad (3)$$

式中: W 为航道区宽度, V_i 为异重流流速。不同工况下异重流航道区平均流速沿 x 方向分布情况如图

5所示。

虽然双丁坝的束窄作用使得两个丁坝区域内的异重流流速大大降低,但对1-1至2-2特征断面航道区范围的流速影响不大。从图5中可以看出,异重流在丁坝1、2之间的航道区流速与无丁坝情况流速较为接近,双丁坝的束窄作用主要影响了2-2特征断面右侧区域的异重流流速,导致流速增大,并且束窄系数越大,异重流在此区域的流速越大。

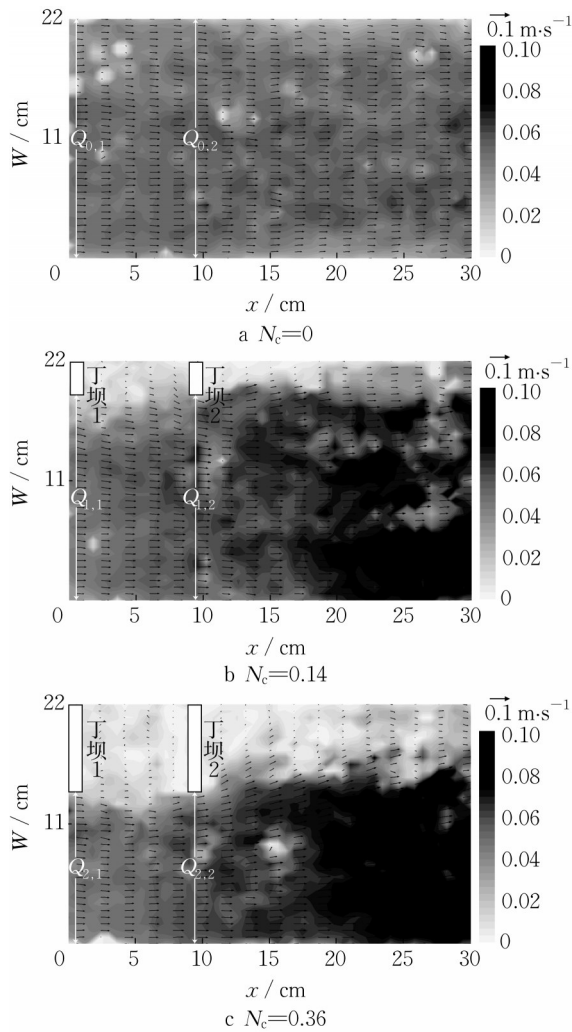


图4 不同束窄系数 N_c 下异重流流速云图(俯视图)

Fig.4 Horizontal velocity fields of density current under different narrowing coefficients (top view)

2.2 PIV 观测区域内异重流处于相对稳定阶段的湍流特性

湍流强度(I)是分析异重流湍流特性的一个重要参数,代表着异重流在运动过程中湍流的强弱程度,可以计算为^[24]

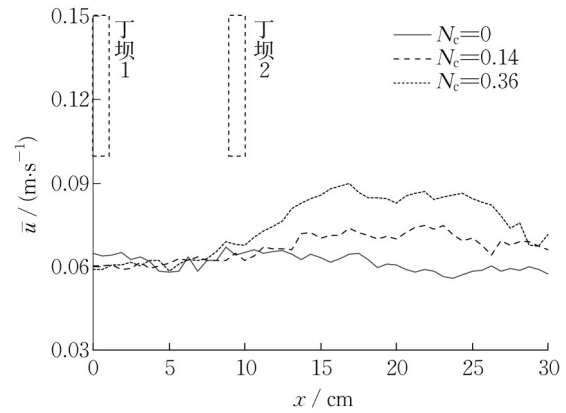


图5 不同束窄系数 N_c 下异重流航道区平均流速沿 x 方向分布情况

Fig.5 Distribution of the average velocity along x direction of the density current in the channel zone under different narrowing coefficients

$$I = \frac{\sqrt{u'^2 + v'^2}}{\bar{U}} \quad (4)$$

式中: u' 、 v' 分别为水平与垂直方向上的流速脉动值, \bar{U} 为平均流速。一般来说, $I < 1\%$ 时为低湍流强度, I 介于 $1\sim 10\%$ 时为中等湍流强度, $I > 10\%$ 时为高湍流强度。

2.2.1 垂直方向湍流强度特性

选取异重流稳定阶段通过PIV获得的连续1s时间内的流速数据,得到不同束窄系数下垂直方向异重流湍流强度分布特性,如图6所示。在未受到丁坝作用时,上层淡水与下层异重流相向运动,两层水体之间的分界线近乎水平,从图6a中可以发现,湍流强度较大的区域主要集中在盐淡水交界面区域,意味着在上层淡水与下层盐水之间存在着较强的流体微团的交换。而在淡水上部区域及盐水下部区域内湍流强度较小,属于低湍流强度。随着水槽被双丁坝束窄,两个丁坝之间区域水体的湍流强度略有增大但变化不大,且湍流强度较大区域依旧集中在盐淡水交界面之间。而对于2-2特征断面右侧水域,湍流强度较大区域的位置发生了变化,强混合区域由原本无丁坝工程下的保持水平态势转变为有丁坝作用下的向下倾斜状态,与图2异重流垂直方向流速云图对比发现,湍流强度较大区域的与异重流流速较大区域范围大致相同,即异重流在经过丁坝2后存在明显横向扩散,流速增大进而湍流强度加强,表明在此区域异重流与上层淡水掺混剧烈。此外,丁坝长度的增大导致异重流在坝后的高度进一步降低及流速进一步增大,因而束窄系数越大,湍流强度最

大值越大,且集中范围越靠近水槽底部。

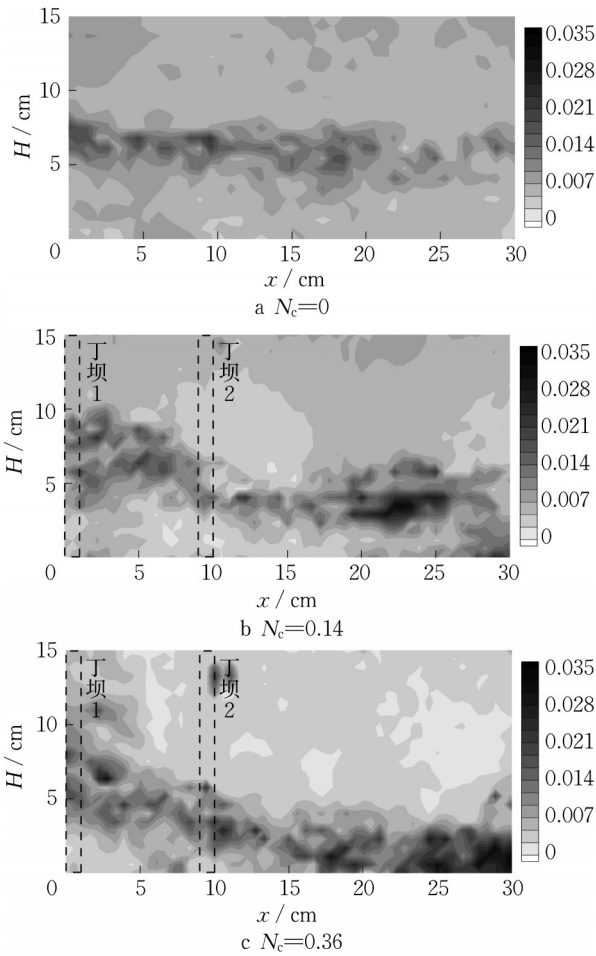


图6 不同束窄系数 N_c 下垂直方向异重流湍流强度分布(正视图)

Fig.6 Turbulence intensity distribution of the density current under different narrowing coefficients (front view)

2.2.2 异重流水平方向湍流强度特性

图7展示了不同工况下水平方向上异重流的湍流强度分布特征。当水槽内无丁坝时,与水平方向上的异重流分布特性相似,俯视下异重流湍流强度在水平面上各向分布都较为均匀,湍流强度大致在1%左右,属于中低湍流强度。而当水槽被双丁坝束窄,异重流运动进入稳定状态后湍流强度分布如图7b、7c所示,在两个丁坝特征断面之间的区域,较大的湍流强度主要集中在两个丁坝坝头连线附近,这是因为丁坝的束窄作用导致异重流在坝间区域内的流速较小,航道区内的异重流经过该水域时在坝头连线附近存在较大的横向速度梯度,此区域的湍流强度约在2%左右,属于中等湍流强度。在第二个丁坝右侧范围,异重流湍流强度较大的区域与异重

流经过丁坝后向坝后扩散区传播的边界相重合,这表明异重流在向扩散区塌陷传播的过程中,与界面附近水体的流体微团有着较强的能量交换。而湍流强度最大的区域则位于丁坝下游航道区内接近扩散区附近,最大值约为3%至4.5%之间,同样属于中等湍流强度。通过与无丁坝对比,可以发现双丁坝的存在增大了异重流的湍流强度,并且束窄系数增大导致异重流在经过丁坝后向扩散区运动的纵深路径增长,加强了异重流与扩散区水体之间的掺混作用,因此湍流强度也相应变强。

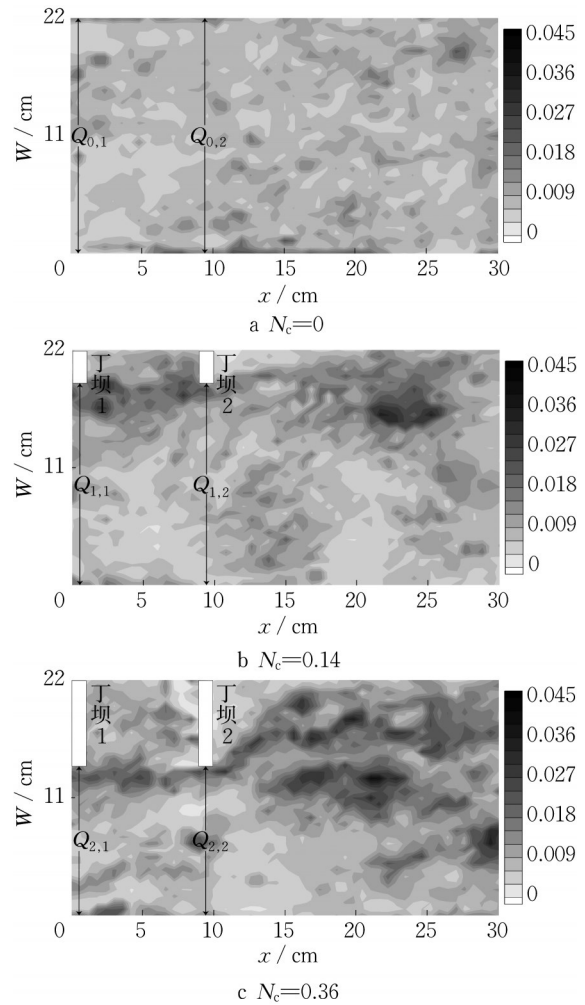


图7 不同束窄系数 N_c 下水平方向异重流湍流强度分布(俯视图)

Fig.7 Turbulence intensity distribution of the density current under different narrowing coefficients (top view)

2.3 异重流特征断面处单宽流量与总流量

河口地区的异重流与航道内泥沙淤积关系密切,为进一步探究双丁坝束窄作用对异重流输移量的影响,需要定量分析异重流通过丁坝断面进入航道的异重流总量。异重流在某一断面的总流量可以

计算为

$$Q = \int_A V_i dA \quad (5)$$

其中, A 为断面上异重流的面积。

由前文对不同束窄系数水平方向上异重流的流速分布特征分析可知, 异重流在 1-1 和 2-2 特征断面范围内, 流速沿水槽宽度方向变化不大, 为便于计算异重流在特征断面的流量参数, 可以近似地认为异重流流速在这两个特征断面上沿横向相同, 因此根据异重流的速度剖面特征(图 8), 在 1-1 和 2-2 特征断面处异重流的单宽流量和总流量可以表示为

$$q_{m,n} = \int_0^h V_i dh \quad (6)$$

$$Q_{m,n} = q_{m,n} W \quad (7)$$

式中: $m = 0, 1, 2$, 代表不同束窄系数工况, $n = 1, 2$, 表示特征断面位置; W 为丁坝位置特征断面的宽度。

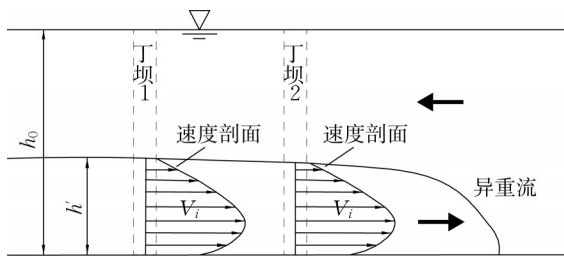


图 8 异重流垂向速度剖面

Fig.8 Vertical velocity profile of the density current

图 9 展示了三种束窄系数时异重流在 1-1 和 2-2 两个特征断面的单宽流量随时间的变化情况, 从图中可以看到在异重流产生的前期, 1-1 断面的异重流单宽流量要大于 2-2 断面, 随着两个丁坝之间区域不断从航道区内涌入高盐度水体, 此区域逐渐饱和, 与航道区之间的盐度梯度逐渐降低, 两个丁坝特征断面处的单宽流量随时间变化曲线逐渐水平并重合, 表明异重流在观测区域的运动进入了较为稳定的阶段。

对比三种工况下异重流在 PIV 观测范围内的运动进入稳定阶段的时间节点可以发现, 相比于水槽内无丁坝, 有丁坝情况下异重流自生成至进入稳定阶段所经历的时间更长, 特别是 $N_c = 0.36$ 工况, 进入稳定阶段滞后其他两种工况约 3~4 s, 这是因为异重流在受到双丁坝束窄作用后, 受第一个丁坝的阻挡作用, 初始阶段内两个坝之间区域水体盐度很小, 随着异重流的不断扩散进入, 区域内的盐度逐步增大, 较大的束窄系数意味着丁坝间有更大的扩散区,

需要更长时间的扩散来补充水体的盐度直至与航道区水体盐度接近。

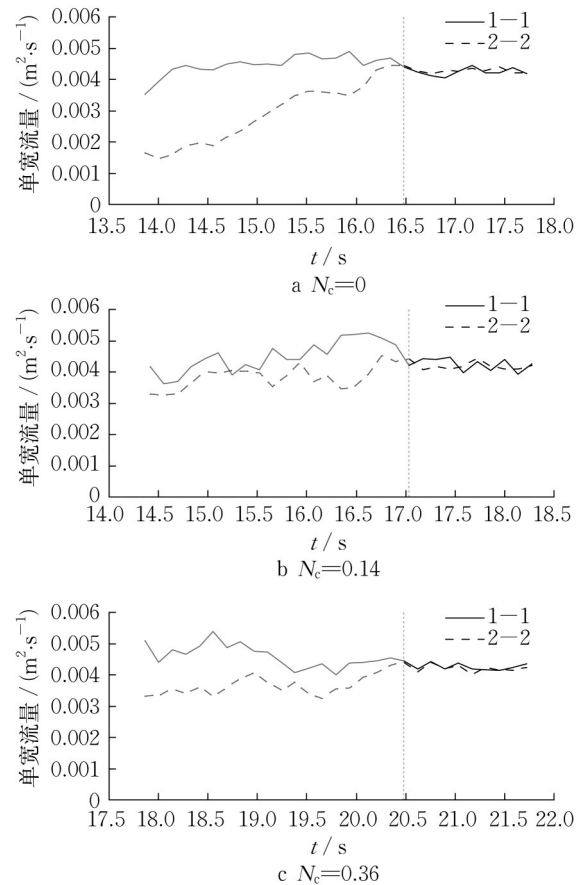


图 9 不同束窄系数 N_c 下异重流特征断面处单宽流量变化情况

Fig.9 Variation of unit flowrate at the narrowed section of density current under different narrowing coefficients

对于采用修筑丁坝进行整治的河口航道, 异重流在丁坝断面的单宽流量及断面宽度决定着自海洋流经丁坝断面侵入航道内异重流的总量。为更加深入对比稳定阶段下不同束窄系数工况的异重流在前后两个丁坝断面流量的变化特征, 定义以下相对单宽流量参数:

(1) $q_{m,1}/q_{0,1}$, 即以稳定阶段无丁坝工况下异重流在 1-1 特征断面处的单宽流量为基准, 计算不同束窄系数下异重流经过特征断面 1-1 的单宽流量与其的比值, 用于分析航道断面在受到不同程度收缩情况下异重流在第一个丁坝断面的单宽流量变化情况;

(2) $q_{m,2}/q_{0,2}$, 即以稳定阶段无丁坝工况下异重流在 2-2 特征断面处的单宽流量为基准, 计算不同束窄系数下异重流经过特征断面 2-2 的单宽流量与其的比值, 用于分析航道断面在受到不同程度收缩情况下异重流

在第2个丁坝断面的单宽流量变化情况。

上述两种相对单宽流量参数与特征断面相对宽度(W/W_0)关系如图10所示。从图中可以看到,各相对单宽流量参数的值在航道不同束窄情况下都近为1,说明在异重流处于稳定阶段时,异重流在1-1特征断面与2-2特征断面的单宽流量与航道内有无丁坝几乎无关,对丁坝长度的变化同样也不敏感。

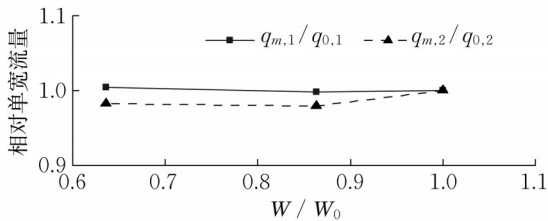


图10 异重流在两个束窄断面相对单宽流量与相对宽度关系
Fig.10 Relationship between the relative unit flow-rate and relative width of density current in the two narrowed sections

根据式(7)可以计算出稳定阶段异重流在1-1特征断面与2-2特征断面的总流量,参照前文中的相对单宽流量参数概念,定义异重流在两个束窄断面的相对总流量参数:① $Q_{m,1}/Q_{0,1}$;② $Q_{m,2}/Q_{0,2}$ 。图11展示了各相对总流量参数与特征断面相对宽度(W/W_0)关系,在前文中对相对单宽流量的分析得出异重流在两个特征断面处的单宽流量几乎相同,因此异重流在1-1特征断面和2-2特征断面处的总流量则主要受特征断面的宽度影响,具体关系式如下:

$$\frac{Q_{m,1}}{Q_{0,1}} = 0.9908 \frac{W}{W_0} + 0.0079 \quad (8)$$

$$\frac{Q_{m,2}}{Q_{0,2}} = 1.0238 \frac{W}{W_0} - 0.0296 \quad (9)$$

为对比分析航道束窄系数相同时,异重流在稳定状态下经过2-2特征断面的单宽流量及总流量相对1-1特征断面的变化特性,定义异重流在两丁坝束窄断面的前后相对单宽流量与前后相对总流量分别为 $q_{m,2}/q_{m,1}$ 、 $Q_{m,2}/Q_{m,1}$ 。根据图10可知,对于同一工况,异重流前后相对单宽流量的值都近似为1,并且在不同束窄系数时相对单宽流量的值近似为1;而从图11中可以得到,针对同一束窄程度,稳定阶段航道内异重流在前后两个丁坝位置特征断面的总流量也大致相同,与单宽流量变化趋势相一致。这表明在稳定状态下,航道内的异重流经过丁坝特征断面的总流量与该断面的宽度成正比,丁坝越长意味着更少的异重流经过束窄断面进入航道。此外,由于在1-1与2-2两处特征断面的异重流总流量近似相

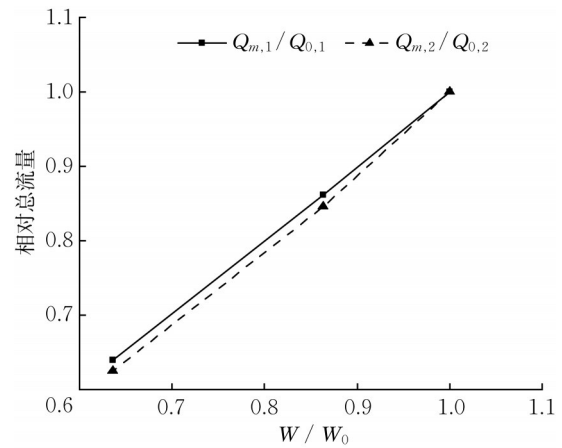


图11 异重流在两个束窄断面相对总流量与相对宽度关系
Fig.11 Relationship between the relative total flow-rate and relative width of density current in the two narrowed sections

同,因此由两个丁坝特征断面组成的控制体内异重流在相同时间内的流入量与流出量相同,控制体内异重流总量保持不变。

3 讨论

河口航道通常纵向上存在较大的密度差,密度较小的径流淡水沿着上层下泄至海洋,受密度梯度的影响,密度较大的海水在下层沿着航道向上游入侵,并在上溯过程中不断与上层淡水进行掺混,最终形成河口盐淡水异重流(重力环流)^[25]。而对于长江口这种由密度梯度引起的重力环流是河口环流的重要组成部分^[26],能够持续不断地将径流下泄、驱动海水上溯^[27],进而造成河口航道淤积。Shen等^[28]基于数值模型及北槽实测地形资料,指出了重力环流影响下河口上、下游余流输沙汇聚是造成长江口深水航道淤积的重要影响因素。黄晨^[29]通过建立数值模型,采用了深水航道整治工程前和工程后两个方案进行了对比,分析了深水航道整治工程对长江口北槽内盐水楔的影响,结果表明在大、中潮情况下工程后北槽内盐度明显大于工程前且在涨憩时盐度变化最大,然而在小潮涨憩时航道被束窄后盐度反而变小。对于水深较大,径流及潮流作用强度适中的河口,决定河口环流的驱动因素是纵向的密度梯度^[30],而长江口北槽小潮作用时则属于这种情况^[31],即北槽航道在同等密度差驱动情况下,航道被束窄后盐度相比未被束窄有所下降,这可能是由于丁坝的存在阻挡了一部分异重流侵入航道,使得在相同径流

条件下航道内水体盐度下降,这一点也从本实验中得到进一步证实。

对于通过丁坝群等建筑物整治后的航道,航道口门处的宽度直接影响着侵入航道内异重流总量。但本文只考虑了单侧布置丁坝的方案,相同口门宽度的对称布置方案与单侧布置方案对异重流在断面处流量的影响是否相同还有待验证。而当河口区域径流增大时,会使得航道内上层密度较小向海的淡水流速增大,减弱下层向陆的异重流流速^[32],对异重流的运动有一定的抑制作用,进而减少异重流侵入航道的总量。

4 结论

河口地区由水平密度梯度引起的异重流是影响河口航道泥沙输移和引发泥沙淤积的主要因素之一,丁坝群也是河口航道整治工程中常用的水工建筑物。本文采用PIV实验研究了不同束窄系数下,航道内双丁坝对稳定状态时异重流的运动特性的影响,主要结论如下:

(1)异重流在两个丁坝之间掩护区内的流速较小,异重流携带的泥沙会在此区域沉积。在两丁坝掩护区域相对的航道水域,异重流的高度、流速都较为稳定,且分布较为均匀。当异重流流经丁坝2后,异重流过流断面扩大,呈现迅速的横向扩散,进而导致异重流高度的下降。双丁坝的束窄作用加大了异重流的流速,并且丁坝越长,异重流的最大流速越大。

(2)航道内湍流强度较大的区域在垂直方向上主要集中在异重流与上层水体的交界面之间,在水平方向上则是集中在坝头连线附近及第二个丁坝右侧航道区内接近扩散区附近,并且双丁坝的存在增大了异重流的湍流强度。

(3)稳定阶段的异重流在两个特征断面处的总流量相等,控制体内的异重流保持着动态平衡。异重流从生成至进入稳定状态的时长与航道的束窄系数有关,丁坝越长,异重流进入稳定状态的时间越滞后。

(4)异重流处于稳定阶段时,在两个特征断面处的单宽流量与航道内有无丁坝及丁坝长度几乎无关,不同束窄系数下两处的单宽流量都近似相同。航道内的异重流经过丁坝特征断面的总流量与断面宽度成正比,调整丁坝长度可以控制异重流侵入航道的总量。

作者贡献声明:

黄硕:构思框架,数据处理,论文撰写;

黄文锐:论文整体研究方法设计;
刘曙光:指导论文撰写,全文审阅;
姜厦:指导论文思路,论文修改;
沈洪:论文修改。

参考文献:

- [1] HUPPERT H E, SIMPSON J E. The slumping of gravity currents[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1980,99(8): 785.
- [2] 吕紫君,冯佳佳,邵新宇,等.磨刀门河口环流与咸淡水混合层化机制[J].*水科学进展*,2017,28(6):908.
LÜ Zijun, FENG Jijia, GAO Xinyu, *et al.* Estuarine circulation and mechanism of mixing and stratification in the Modaomen estuary[J]. *Advances in Water Science*, 2017, 28(6): 908.
- [3] 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.
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.
- [4] POSTMA H. Sediment transport and sedimentation in the estuarine environment [J]. *American Association of Advanced Sciences*, 1967,83: 158.
- [5] 沈焕庭,贺松林,潘定安,等.长江河口最大浑浊带研究[J].*地理学报*,1992,47(5):472.
SHEN Huanting, HE Songlin, PAN Ding'an, *et al.* A study of turbidity maximum in the Changjiang estuary [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1992,47(5): 472.
- [6] SHERWOOD C R, JAY D A, HARVEY R B, *et al.* Historical changes in the Columbia River estuary [J]. *Progress in Oceanography*, 1990,25(1/4): 299.
- [7] 付桂.国内外河口航道治理经验及对长江口航道整治的启示[J].*水运工程*,2016,522(11):121.
FU Gui. Experience of estuary channel regulation at home and abroad and enlightenment for regulation of the Yangtze estuary channel [J]. *Port & Waterway Engineering*, 2016, 522(11): 121.
- [8] WAN Y, WANG L. Study on the seasonal estuarine turbidity maximum variations of the Yangtze estuary, China [J]. *Journal of Waterway Port Coastal & Ocean Engineering*, 2018, 144(3): 5018001.
- [9] MARTIN D, BERTASI F, COLANGELO M A, *et al.* Ecological impact of coastal defence structures on sediment and mobile fauna: evaluating and forecasting consequences of unavoidable modifications of native habitats [J]. *Coastal Engineering*, 2005,52(10/11): 1027.
- [10] WU W M, LI H H. A simplified physically-based model for coastal dike and barrier breaching by overtopping flow and waves[J]. *Coastal Engineering*, 2017,130: 1.
- [11] HUANG W, JONES W K, YANG Q. Field experiment study of transient stratified flow in an estuary [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2003,129(10): 1220.

- [12] ZHU L, HE Q, SHEN J. Response of stratification processes to tidal current alteration due to channel narrowing[J]. *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 2020,125(2):15223
- [13] MA G, SHI F, LIU S, *et al.* Hydrodynamic modeling of Changjiang estuary: model skill assessment and large-scale structure impacts [J]. *Applied Ocean Research*, 2011, 33(1): 69.
- [14] SHEN Q, HUANG W R, WAN Y Y, *et al.* Observation of the sediment trapping during flood season in the deep-water navigational channel of the Changjiang estuary, China [J]. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 2020,237: 106632.
- [15] HUANG W. Enhancement of a turbulence sub-model for more accurate predictions of vertical stratifications in 3D coastal and estuarine modeling[J]. *The International Journal of Ocean and Climate Systems*, 2010,1(1): 37.
- [16] 郭浩森. 基于 PIV 方法的河口航道盐淡水异重流特性实验研究[D]. 上海: 同济大学, 2017.
GUO Haomiao. Experimental research of features of density-induced flow in estuarine navigation channel based on PIV method[D]. Shanghai: Tongji University, 2017.
- [17] HUANG S, HUANG W, ZHONG G. PIV-based experiments on density-induced flow in an estuarine navigation channel constricted by a groin [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2022,275: 107994.
- [18] 林颖典, 韩东睿, 袁野平, 等. 双重障碍物对开闸式异重流运动特性的影响[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2020, 48(2): 317.
LIN Yingdian, HAN Dongrui, YUAN Yeping, *et al.* Effects of two consecutive obstacles on gravity currents dynamics [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2020, 48(2): 317.
- [19] YAGHOUBI S, AFSHIN H, FIROOZABADI B, *et al.* Experimental investigation of the effect of inlet concentration on the behavior of turbidity currents in the presence of two consecutive obstacles[J]. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 2017,143(2): 4016018.
- [20] GU Z, CAO X, GU Q, *et al.* Exploring proper spacing threshold of non-submerged spur dikes with ipsilateral layout [J]. *Water*, 2020,12(1): 172.
- [21] HALLWORTH M A, HUPPERT H E, PHILLIPS J C, *et al.* Entrainment into two-dimensional and axisymmetric turbulent gravity currents [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1996,308: 289.
- [22] WAN Y Y, ZHAO D Z. Observation of saltwater intrusion and ETM dynamics in a stably stratified estuary: the Yangtze estuary, China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2017,189(2): 1.
- [23] WAN Y, GU F, WU H, *et al.* Hydrodynamic evolutions at the Yangtze estuary from 1998 to 2009 [J]. *Applied Ocean Research*, 2014,47: 291.
- [24] MARTINO R, PATERSON A, PIVA M. Double-average mean flow and local turbulence intensity profiles from PIV measurements for an open channel flow with rigid vegetation [J]. *Environmental Fluid Mechanics*, 2012,12(1): 45.
- [25] 沈焕庭, 朱慧芳, 茅志昌. 长江河口环流及其对悬沙输移的影响[J]. *海洋与湖沼*, 1986,17(1): 26.
SHEN Huanting, ZHU Huifang, MAO Zhichang. Circulation of the Changjiang River estuary and its effect on the transport of suspended sediment [J]. *Oceanologia Et Limnologia Sinica*, 1986,17(1): 26.
- [26] WU H, ZHU J. Advection scheme with 3rd high-order spatial interpolation at the middle temporal level and its application to saltwater intrusion in the Changjiang estuary [J]. *Ocean Modelling*, 2010,33(1): 33.
- [27] SIMPSON J H, BROWN J, MATTHEWS J, *et al.* Tidal straining, density currents, and stirring in the control of estuarine stratification[J]. *Estuaries*, 1990,13(2): 125.
- [28] SHEN Q, HUANG W R, QI D M. Integrated modeling of typhoon damrey's effects on sediment resuspension and transport in the north passage of Changjiang estuary, China[J]. *Journal of Waterway Port Coastal and Ocean Engineering*, 2018,144(6): 4018015.
- [29] 黄晨. 长江口深水航道工程对盐水入侵的影响[J]. *水电能源科学*, 2019,37(3): 29.
HUANG Chen. Impacts of Deep Water Channel project in Yangtze River estuary on saltwater intrusion [J]. *Water Resources and Power*, 2019,37(3): 29.
- [30] PRITCHARD D W. *Estuarine hydrography* [M]. Elsevier, 1952.
- [31] 浦祥. 长江河口重力环流、潮汐应变、混合与层化[D]. 上海: 上海交通大学, 2017
PU Xiang. Gravitational circulation, tidal straining, mixing and stratification in the Changjiang River estuary [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2017.
- [32] 胡松, 朱建荣, 傅得健, 等. 河口环流和盐水入侵 II—径流量和海平面上升的影响[J]. *青岛海洋大学学报(自然科学版)*, 2003,33(3): 337.
HU Song, ZHU Jianrong, FU Dejian, *et al.* Estuarine circulation and saltwater intrusion II: impacts of river discharge and rise of sea level [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2003,33(3): 337.