

漩滚涌潮在变化地形上传播演变的数值模拟研究

喻仞石¹, 屈科^{1,2,3}, 郑伟¹, 王超¹, 王旭^{1,2}

(1. 长沙理工大学水利与海洋工程学院; 2. 洞庭湖水环境治理与生态修复湖南省重点实验室;
3. 水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室)

摘要:针对涌潮强大的冲击力可引起显著的泥沙输运与河床淤积,进而改变区域水动力特性的问题,基于 OpenFOAM 两相流模型构建了小尺度精细化数值水槽,探究了变化地形下漩滚涌潮的传播演变与水动力特性,分析涌潮高度、潮前水深和地形高度对漩滚涌潮的影响。结果表明,地形抬升导致漩滚涌潮流速和涡量发生剧烈变化,涌潮能量通过涡旋破碎和黏性耗散显著衰减,弱漩滚涌潮在浅水区退化为波状涌潮,而强漩滚涌潮因能量集中仍维持高频振荡;涌潮高度的增大可降低浅水区传播速度衰减幅度,增大表层水体紊动能;潮前水深的增大会使得浅水区紊动能减弱,并降低涌潮传播速度;地形高度的增加会减缓漩滚涌潮的传播速度;在浅水区传播过程中,强漩滚涌潮的紊动能衰减速率明显高于弱漩滚涌潮。基于上述数值模拟结果,提出了考虑地形抬升影响的涌潮传播速度修正公式,其计算结果与数值模拟结果吻合较好,验证了该公式的准确性。

关键词:漩滚涌潮;变化地形;水动力特性;数值模拟;海岸工程

Numerical simulation of propagation and evolution of vortical tidal bore on varying topography//Yu Renshi¹, Qu Ke^{1,2,3}, Zheng Wei¹, Wang Chao¹, Wang Xu^{1,2} (1. School of Hydraulic and Ocean Engineering, Changsha University of Science and Technology; 2. Key Laboratory of Dongting Lake Aquatic Eco-Environmental Control and Restoration of Hunan Province; 3. Key Laboratory of Water-Sediment Sciences and Water Disaster Prevention of Hunan Province)

Abstract: Aiming at the issue that the strong impact force of tidal bores can cause significant sediment transport and bed deposition, thereby altering regional hydrodynamic characteristics, a small-scale refined numerical flume was constructed based on the OpenFOAM two-phase flow model. The propagation evolution and hydrodynamic characteristics of vortical tidal bores on varying topography were investigated, and the effects of bore height, pre-bore water depth, and topographic height on vortical tidal bores were analyzed. The results show that topographic uplift leads to drastic changes in the velocity and vorticity of the vortical tidal bore, and the bore energy significantly attenuates through vortex breaking and viscous dissipation. Weak vortical tidal bores degenerate into undular bores in shallow water, whereas strong vortical tidal bores maintain high-frequency oscillations due to concentrated energy. An increase in bore height reduces the attenuation of propagation velocity in shallow water and increases the turbulent kinetic energy of the surface water body. An increase in pre-bore water depth weakens the turbulent kinetic energy in shallow water and reduces the bore propagation velocity. An increase in topographic height slows down the propagation velocity of the vortical tidal bore. During propagation in shallow water, the turbulent kinetic energy decay rate of strong vortical tidal bores is significantly higher than that of weak vortical tidal bores. Based on the above numerical simulation results, a modified formula for bore propagation velocity that accounts for topographic uplift is proposed, and its calculated results are in good agreement with the numerical results, validating the accuracy of the formula.

Key words: vortical tidal bore; varying topography; hydrodynamic characteristics; numerical simulation; coastal engineering

涌潮是一种河口地区特有的自然现象,其形成需要特定的地理条件,如逐渐收窄的河口、巨大的潮差以及合适的河床坡度等^[1]。据统计,全球约有450个河口存在涌潮现象^[2],其中以亚马孙河涌潮

和我国的钱塘江涌潮最为典型。钱塘江涌潮形成后,河道水动力特性发生显著变化,水流从落潮状态迅速转变为涨潮状态,其涌潮高度一般为2~3 m,传播速度可达6~12 m/s,此时涌潮内蕴含着巨大的

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFC3103601)

作者简介:喻仞石(1998—),男,硕士研究生,主要从事波浪水动力研究。E-mail:2741475975@qq.com

通信作者:屈科(1985—),男,副教授,博士,主要从事计算水动力学与海洋多尺度流动研究。E-mail:kqu@csust.edu.cn

能量。例如,涌潮曾将海宁十堡 41 号丁坝处重约 30 t 的混凝土砌石坝面掀起,抛离原地 7~8 m;冲上塘顶的潮水还将海宁盐官塘顶重 1.5 t 的“镇海铁牛”掀起并推移约 10 m^[3]。

近年来,国内外学者对涌潮的形成机理和演变规律开展了大量研究。Reungoat 等^[4]通过对英国迪河河口进行现场观测,揭示了涌潮水位、流速、紊动能、雷诺剪切应力等要素的变化规律。潘存鸿等^[5]基于长期实测水文和地形资料,分析了人为因素和自然因素对涌潮强度、潮差以及涨潮历时等参数的影响。Koch 等^[6]通过水槽试验提出了 3 种涌潮形态的弗劳德数区间,指出当相对弗劳德数较小时,水体自由表面起伏光滑且无破裂;当相对弗劳德数中等时,涌潮破碎后仍然以光滑的自由表面进行传播;当相对弗劳德数较大时,涌潮传播速度较快,且潮头出现一个明显的漩滚。Chanson^[7]利用波浪水槽试验生成波状涌潮,在分析其流场特征的基础上,进一步探讨了涌潮的混合与弥散作用。Li 等^[8]通过落闸生潮试验分析了涌潮在缓坡变化地形上的传播过程,并提出了共轭水深比的解析解。黄婷等^[9]建立了二维高阶 Boussinesq 方程数值模型,复现了“交叉潮”“一线潮”“回头潮”三大潮景,模拟结果与实测数据吻合良好。张舒羽等^[10]采用二维大尺度数值模型计算了 8 种地形条件下钱塘江涌潮特征的变化,并通过涌潮高度和潮前水深计算了各测站的相对弗劳德数,指出地形变化对潮汐和涌潮的影响显著。

如上所述,国内外学者在涌潮研究中采用了原型观测、理论分析、模型试验和数值模拟等多种方法,并在大尺度数值模型方面取得了丰硕成果,大尺度模型为整体把握涌潮水动力特性提供了有力支撑。然而,涌潮现象复杂多变,仅依靠大尺度模型难以全面、深入地揭示其局部精细特征。因此,小尺度模型在研究涌潮局部水动力特性及其与海岸结构物相互作用方面具有重要作用。威廉等^[11]建立了小尺度精细化数值模型,通过大涡模拟 (LES) 求解纳维-斯托克斯 (N-S) 方程,发现小尺度精细模型模拟的漩滚涌潮在传播过程中,不同横断面的水体相互干扰很小,并指出二维数值模型仅需少量计算资源即可满足精度要求。Li 等^[12]采用光滑粒子流体动力学 (SPH) 法模拟了涌潮通过桥墩时的局部水流特性。肖厅厅^[13]结合数值模拟和物理试验研究了漩滚涌潮的内部流速、压强分布以及漩滚涌潮作用下桥墩受力与局部冲淤特性。

钱塘江河口含沙量较大且变化幅度显著。实测资料显示,涌潮来临前,钱塘江河口的含沙量约为 1~3 kg/m³;涌潮来临时,尖山至盐官河段的含沙量

峰值可达 65.8 kg/m³,形成高含沙量区^[14]。在桐庐至乍浦河段,由于泥沙输运,河床形成了近 10 m 高的庞大泥沙堆积体^[15],涌潮传播至此处时会受到地形抬升的影响而改变形态。目前,针对变化地形条件下漩滚涌潮的小尺度精细化研究仍较为有限,为此本文构建小尺度精细化数值模型,研究漩滚涌潮在变化地形条件下的传播与演变特性,并系统分析涌潮高度、潮前水深和地形高度对其水动力特性的影响。

1 数值模型

1.1 控制方程

本文采用 OpenFOAM 不可压缩两相流数值模型,通过求解雷诺平均 N-S 方程 (RANS) 模拟漩滚涌潮在复杂地形上的传播过程。其控制方程包括质量守恒方程和动量守恒方程:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_{\text{eff}} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + (\rho - \rho_{\text{ref}}) g_i \quad (2)$$

式中: t 为时间; x_i 为笛卡尔坐标系下的坐标分量 ($i=1, 2, 3$); u_i 为笛卡尔坐标系下 i 方向的流速分量; p 为静水压强; ρ 为流体密度; ρ_{ref} 为参考密度; μ_{eff} 为有效动力黏度,其值为层流动力黏度与湍流动力黏度之和; g_i 为重力加速度在 i 方向的分量。

1.2 湍流模型与自由液面捕捉法

为精确表征漩滚涌潮的非线性流动特征,本文选用 $k-\omega$ SST 湍流模型实现湍流黏度的闭合求解,并采用 VOF (volume of fluid) 方法^[16] 追踪气液两相流界面,以揭示涌潮内部流场结构与自由液面演变特征。

1.3 计算区域与边界条件

本文构建的二维数值水槽如图 1 所示,其几何尺寸为长 40 m、高 1.2 m。在距入口 19.4 m 处设置高 0.08~0.2 m 的变化地形,将地形坡脚前定义为深水区,坡脚后为浅水区。其中, z 为水深方向, x 为涌潮传播方向,沿水槽 x 轴方向以 0.2 m 间距等距布置 181 个水位测点 (WG1~WG181),用于采集涌潮水体的自由液面高程以及传播速度。前后面采用空边界条件 (empty) 实现三维至二维模型的等效转换,底面采用壁面边界,顶面采用压力出口边界,出口为自由出流边界,入口采用潘存鸿等^[5] 基于一维连续-动量方程推导的理论流速边界:

$$v_1 = v_0 + \sqrt{gh_1(h_1 + h_0)/2h_0} - \sqrt{gh_0(h_1 + h_0)/2h_1} \quad (3)$$

其中 $h_1 = h_0 + H$

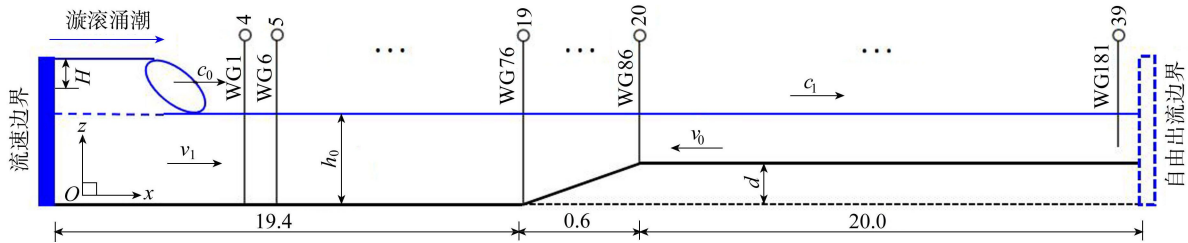


图1 数值水槽布置(单位:m)

式中: v_1 为水流入口边界的水平流速; v_0 为落潮流速; g 为重力加速度; h_0 为潮前水深; H 为涌潮高度; h_1 为潮后水深。

1.4 工况设置

根据涌潮强度的不同,涌潮形态可分为3种^[11]:当涌潮强度较小时,涌潮表现为前导波之后伴随一系列振幅减小的子波所构成的波列^[17],称为波状涌潮;随着涌潮强度的增大,自由表面发生轻微破碎,水体仍然以波动的形式向前推进,称为弱漩滚涌潮;当涌潮强度较大时,涌潮前锋形成陡立推进的水滚,潮头完全破碎,自由表面发生剧烈的掺气现象,称为强漩滚涌潮^[18]。基于上述判据,并采用本文建立的数学模型对103组涌潮工况进行计算,得出涌潮形态与相对弗劳德数 Fr_1 之间的关系(图2),并定义当 $Fr_1 < 1.28$ 时,涌潮为波状涌潮;当 $1.28 \leq Fr_1 < 1.44$ 时,涌潮为弱漩滚涌潮;当 $Fr_1 \geq 1.44$ 时,涌潮为强漩滚涌潮。相较于波状涌潮,漩滚涌潮的传播速度更快、流动更为复杂,本文将主要对其进行讨论。

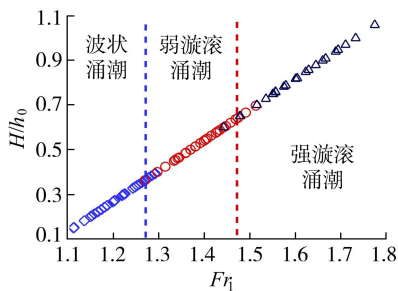


图2 涌潮形态与相对弗劳德数的关系

为研究漩滚涌潮在变化地形下的水动力特性,选取涌潮高度 H 、潮前水深 h_0 和地形高度 d 作为主要控制参数进行分析,参数取值范围依据钱塘江天然涌潮水流条件确定: $h_0 = 3.4 \sim 4.3$ m、 $H = 1.6 \sim 3.0$ m、 $d = 0.8 \sim 2.0$ m^[19-21]。根据相对弗劳德数大小,将涌潮划分为弱漩滚涌潮和强漩滚涌潮,模拟中涌潮水流参数按1:10的几何比尺进行缩尺,具体工况设置见表1。

2 结果与分析

2.1 模型验证

为验证所建模型模拟漩滚涌潮在变化地形上传

表1 工况设置

工况	H/m	h_0/m	d/m	Fr_1	涌潮形态
1	0.16	0.40	0.20	1.296	弱漩滚涌潮
2	0.18	0.40	0.20	1.333	弱漩滚涌潮
3	0.20	0.40	0.20	1.369	弱漩滚涌潮
4	0.22	0.40	0.20	1.406	弱漩滚涌潮
5	0.24	0.40	0.20	1.442	强漩滚涌潮
6	0.26	0.40	0.20	1.479	强漩滚涌潮
7	0.28	0.40	0.20	1.515	强漩滚涌潮
8	0.30	0.40	0.20	1.551	强漩滚涌潮
9	0.20	0.34	0.20	1.434	弱漩滚涌潮
10	0.20	0.37	0.20	1.399	弱漩滚涌潮
11	0.20	0.43	0.20	1.344	弱漩滚涌潮
12	0.28	0.34	0.20	1.604	强漩滚涌潮
13	0.28	0.37	0.20	1.556	强漩滚涌潮
14	0.28	0.43	0.20	1.479	强漩滚涌潮
15	0.20	0.40	0.08	1.369	弱漩滚涌潮
16	0.20	0.40	0.12	1.369	弱漩滚涌潮
17	0.20	0.40	0.16	1.369	弱漩滚涌潮
18	0.28	0.40	0.08	1.515	强漩滚涌潮
19	0.28	0.40	0.12	1.515	强漩滚涌潮
20	0.28	0.40	0.16	1.515	强漩滚涌潮

播的水动力过程的可靠性,将数值计算结果与杨火其等^[22]的物理模型试验数据进行了对比,数值水槽的设置与物理模型试验保持一致,选取 $h_0 = 0.07$ m、 $H = 0.066$ m的工况进行验证。验证结果如图3所示(图中 η 为涌潮水位, F_x 为涌潮作用力),涌潮水位与涌潮作用力的计算结果与试验数据吻合较好,表明本文建立的两相流数值模型能够较好地模拟漩滚涌潮的传播过程及其与结构物的相互作用。

2.2 水动力特性

为深入研究漩滚涌潮传播演变过程中发生的复杂水动力现象,分别选取工况3和工况7来研究弱漩滚涌潮和强漩滚涌潮,两种漩滚涌潮在不同时刻的水体速度云图如图4所示。由图4(a)(b)可知,由于漩滚涌潮的相对弗劳德数较大,水体内蕴含了巨大的能量,涌潮波能量无法像波状涌潮通过对后续波列的反向能量辐射和底部摩阻来耗散,能量的非线性耗散增强,因此两种漩滚涌潮的自由表面均发生了不同程度的破碎,潮头产生了强烈的水滚和水气混掺现象,通过大尺度的涡旋和黏性耗散将水体中的能量转换为热量。当漩滚涌潮传播至斜坡上时(图4(c)(d)(e)(f)),涌潮波一部分能量被斜坡

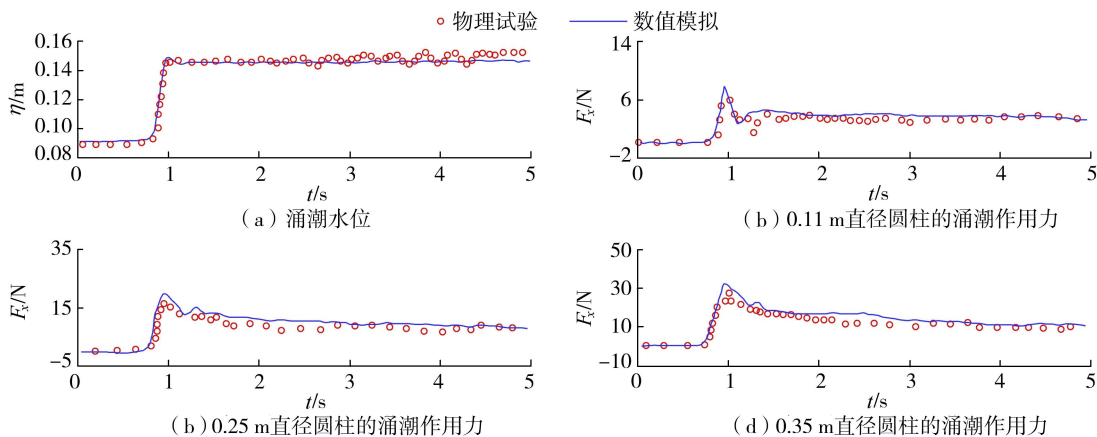


图3 验证结果

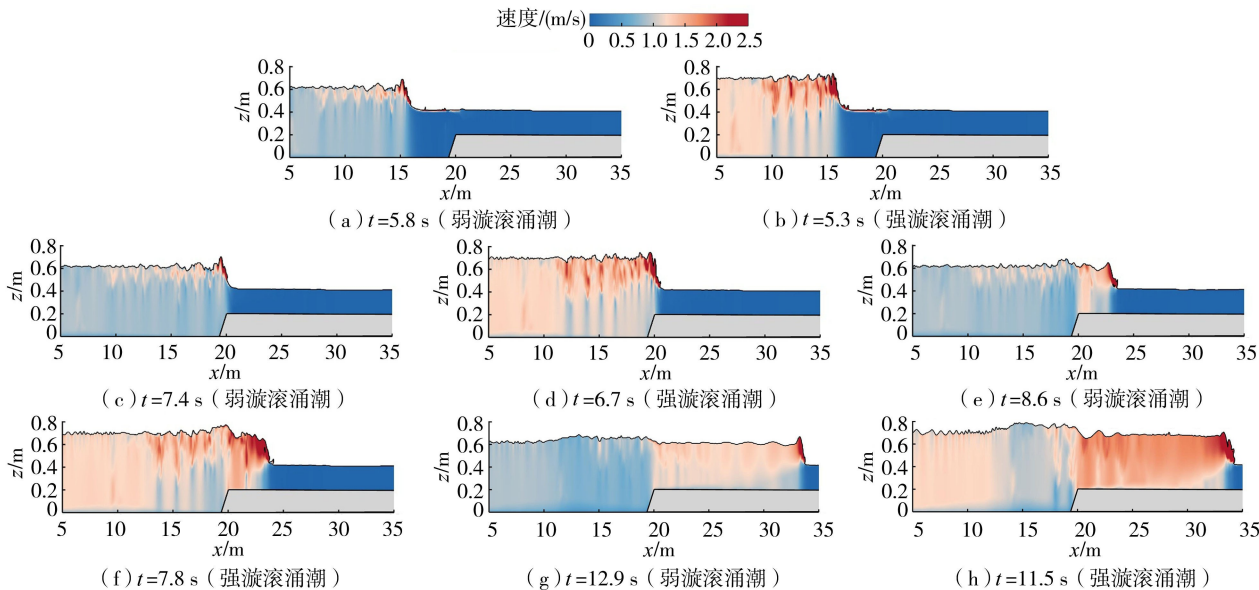


图4 不同时刻的水体速度云图

地形反射,另一部分透射至浅水区。反射波与后续波列不断叠加,产生一个向下游不断扩张的增水区。而透射波在通过变化地形后,由于水深变浅且斜坡地形的约束和导向作用突然消失,流速在进入浅水区后迅速增大(图4(g)(h))。弱漩滚涌潮进入浅水区后,水面再次形成光滑起伏的波列(图4(g)),这是由于斜坡地形反射分离了一部分潮波能量,且色散效应导致高频波与低频波分离,使得次生波再次形成波列,涌潮形态从弱漩滚涌潮转变为波状涌潮。而强漩滚涌潮进入浅水区后,潮头后方水面线趋于平稳,水体表面的高频振荡减弱。

图5给出了弱漩滚涌潮和强漩滚涌潮在不同测点处的自由液面时程曲线,强漩滚涌潮的传播速度稍快于弱漩滚涌潮。在 $x=16\text{ m}$ 处,受斜坡反射影响,约在 10 s 时产生增水,弱漩滚涌潮产生的反射波与后续波列叠加,形成一系列振幅减小的光滑波列,而强漩滚涌潮在增水后呈现不规则波动。在 $x=20\text{ m}$ 处,受地形抬升的影响,自由水面略微升高,其

中弱漩滚涌潮水面升高约为 2% ,强漩滚涌潮水面升高约为 7.7% ,这可能是由于漩滚涌潮在斜坡处形成局部高压,高压促使更多水体向低压区域流动,使得强漩滚涌潮在斜坡处的增水效应更为强烈。在 $x=24,28\text{ m}$ 处,弱漩滚涌潮水面呈现短暂波动后趋于平稳,这可能是由于斜坡将潮波的部分能量反射后,水体动能减弱,使涌潮形态从弱漩滚涌潮短暂转变为波状涌潮。

涡旋是导致涌潮中物理量产生脉动的主要因素之一。漩滚涌潮在传播过程中,潮头发生强烈的水滚,产生大量涡旋,致使大量能量通过涡旋运动的形式耗散。为进一步分析漩滚涌潮在变化地形上传播演变的水动力特性,图6给出了两种漩滚涌潮(工况3和工况7)的水体涡量云图。由图6(a)(b)可知,漩滚涌潮在深水区传播时,潮头前趾前方出现较大的正涡,这是由于漩滚涌潮在水滚前趾线处会产生快速波动的横向流动^[23]。由于潮头以较高的速度向上游推进,不断与前方的低速水体发生剧烈的

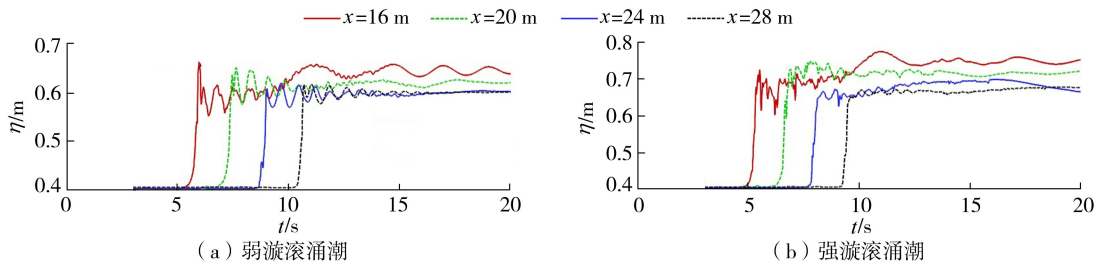


图5 不同测点处自由液面时程曲线

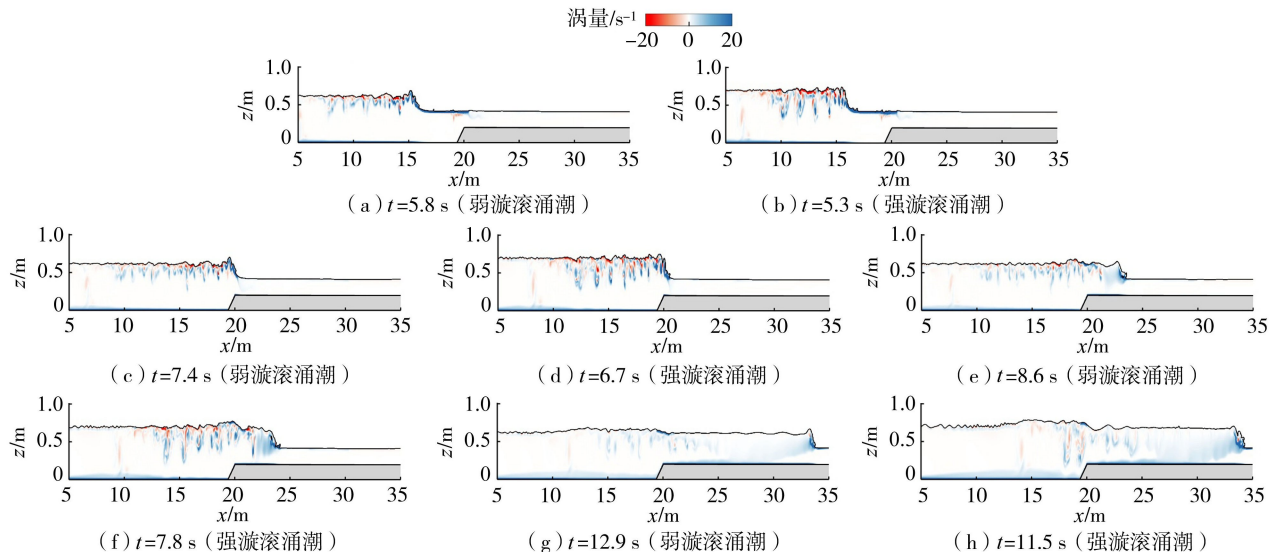


图6 不同时刻的水体涡量云图

相互作用,潮头处不断产生正涡,且这些正涡随着漩滚涌潮的高速传播逐渐移动至后方水体,而后方水体在流速减慢以及剪切应力的作用下,在表层水体产生大量负涡。正涡与负涡之间的持续相互作用导致水流方向不断变化,局部流速分布呈现高度非均匀性(图4),这也解释了在 $x=16\text{ m}$ 处自由液面时程曲线较为紊乱的原因(图5)。当涌潮传播至斜坡上时,受地形压缩与阻滞作用,涌潮的传播速度减小,大量正涡与负涡发生聚集,水面紊动与振荡加剧,在正、负涡的相互作用下,大量能量通过黏性耗散被消耗(图6(e)(d))。漩滚涌潮通过斜坡后,反射波与次生波叠加产生了复杂的水动力效应(图6(e)(f)),大量能量在斜坡处耗散。而透射波在浅水区传播的过程中由于流速分布较为均匀,基本不再产生负涡,水体中全部为正涡,使得水面的高频振荡减弱(图6(g)(h))。

上述研究表明,漩滚涌潮在传播过程中会在其后方引起水体流速的显著波动,为探究不同条件下涌潮引起的水体紊动能变化规律,定义相对水深为 z/h_1 。潮头经过后3 s内水体内部流速波动较大,3 s后水体流速逐渐趋于均匀,紊动也随之减弱。为表征不同工况下涌潮引起的紊动能,选择潮头经过后3 s的时间段作为时均化脉动流速的计算时段^[24]。

图7为深水区($x=15\text{ m}$)和浅水区($x=24$ 、 30 m)的3个位置处紊动能沿相对水深的分布特征。由图7可见,在深水区,两种工况下紊动能的较高值均出现在底部和水体表面,该结果与肖厅厅^[13]的研究结果一致,其中强漩滚涌潮在表层水体中的紊动能变化更为显著。当潮头进入浅水区后,紊动能沿相对水深的分布变得更加均匀,呈S形分布,且表层水体的紊动能显著降低。在 $x=15\sim 24\text{ m}$ 区域,弱漩滚涌潮和强漩滚涌潮的紊动能分别减少约66.7%和67.8%;而在 $x=24\sim 30\text{ m}$ 区间,其降幅分别为13.3%和63.2%。这表明涌潮进入浅水区后,大部分能量受黏性耗散和地形反射的影响而耗散。随着涌潮在浅水区的进一步传播,其紊动能呈沿程递减趋势,其中强漩滚涌潮的衰减更为显著。

2.3 涌潮高度的影响

不考虑其他参数的影响,潮前水深取 0.4 m ,地形高度取 0.2 m ,通过改变涌潮高度研究其对漩滚涌潮传播演变及水动力特性的影响。为定量分析漩滚涌潮通过地形前后的传播速度变化,定义相对传播速度 $\bar{c}/c_0$,其中 $\bar{c}$ 为某区域的平均传播速度, c_0 为潘存鸿等^[25]基于一维连续性方程推导出的涌潮理论传播速度:

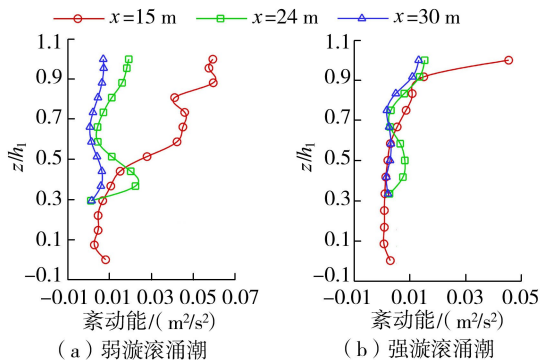


图7 紊动能沿相对水深的分布

$$c_0 = v_1 + \sqrt{\frac{gh_0(h_1 + h_0)}{2h_1}} \quad (4)$$

图8为不同涌潮高度下相对传播速度的变化,各工况在深水区的相对传播速度均趋近于1,理论传播速度与实际传播速度之间的 skill 数^[26]约为0.997,表明涌潮在深水区的传播受地形影响较小。对比深水区与浅水区的相对传播速度可以发现,漩滚涌潮在地形抬升后,其传播速度显著衰减,且衰减幅度随着涌潮高度的增加而减小。当涌潮高度取最小设计值 $H = 0.16\text{ m}$ 时,浅水区的相对传播速度降至最低,约为0.89,这可能是由于地形对涌潮能量的削减作用存在一定限度。

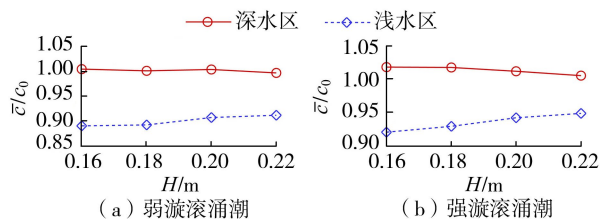


图8 不同涌潮高度下的相对传播速度

图9为不同涌潮高度下紊动能沿相对水深的分布特征,在深水区($x = 15\text{ m}$),两种漩滚涌潮的紊动能最大值均集中于水体上部。弱漩滚涌潮的紊动能沿水深分布较为规律,且垂向平均紊动能随涌潮高度的增大而增大;而强漩滚涌潮因剧烈掺混作用,紊动能沿水深分布较为紊乱。图9(b)(e)进一步表明,当漩滚涌潮进入浅水区($x = 24\text{ m}$)后,紊动能与涌潮高度之间的相关性明显减弱。相较于深水区,紊动能显著降低,其沿水深方向呈S形分布,且强漩滚涌潮的紊动能普遍高于弱漩滚涌潮。当涌潮继续推进至 $x = 30\text{ m}$ 时,紊动能进一步显著下降,弱漩滚涌潮和强漩滚涌潮的平均紊动能分别减少约36.36%和42.27%。

2.4 潮前水深的影响

不考虑其他参数的影响,强漩滚涌潮和弱漩滚涌潮的涌潮高度分别取0.24、0.28 m,地形高度取0.2 m,通过改变潮前水深研究其对漩滚涌潮传播演

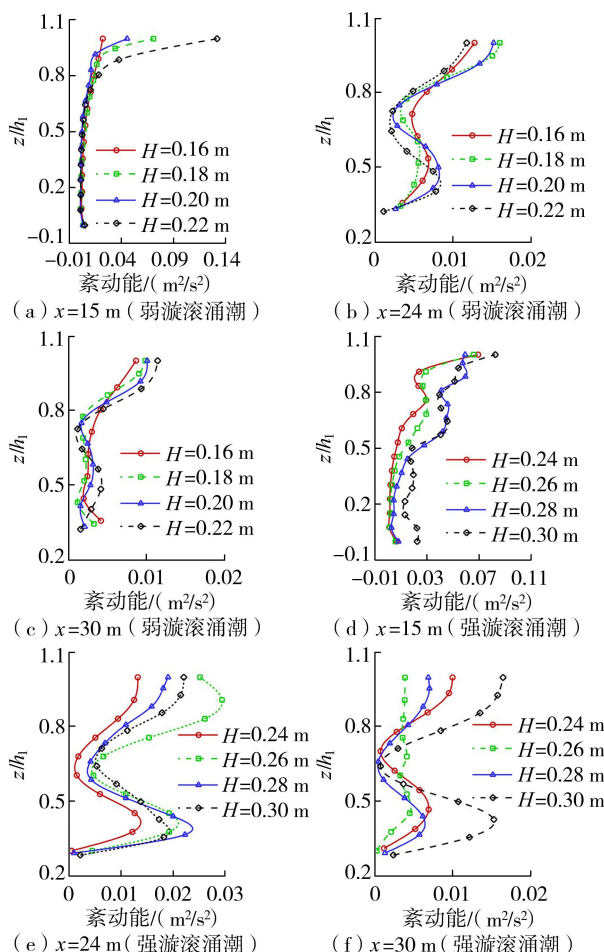


图9 不同涌潮高度下紊动能沿相对水深的分布

变及水力特性的影响。由图10可知,8个工况在深水区的平均传播速度与理论传播速度基本一致,两者之间的 skill 数约为0.9961,表明在不同潮前水深条件下,漩滚涌潮在深水区传播时受地形影响较小。对比深水区与浅水区的相对传播速度可知,变化地形可以有效削弱涌潮的传播速度,且削弱幅度随潮前水深的增大而增大。当潮前水深取最大设计值0.43 m时,浅水区的相对传播速度最小,约为0.93,这可能是由于较大的水深能够更好地缓冲波浪破碎时产生的紊动能。

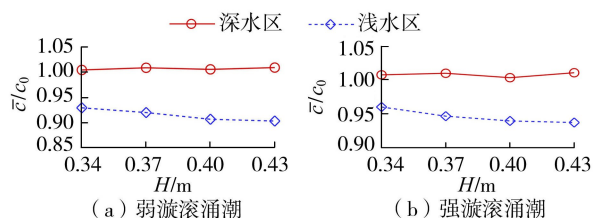


图10 不同潮前水深下的相对传播速度

图11为不同潮前水深下紊动能沿相对水深的分布特征。在深水区($x = 15\text{ m}$),当 $h_0 = 0.34 \sim 0.40\text{ m}$ 时,弱漩滚涌潮的紊动能分布形态较为相似;当 $h_0 = 0.43\text{ m}$ 时,上部水体区域的紊动能明显增大,而强漩滚涌潮的紊动能沿水深分布较为离散,

随 h_0 的变化无明显规律。当涌潮传播至浅水区 ($x=24\text{ m}$) 时,紊动能整体显著减小,且随着潮前水深的增大,紊动能沿水深分布趋于均匀,这可能是由于较大的潮前水深可以有效缓和和减弱涌潮所带来的紊动。当涌潮从 $x=24\text{ m}$ 传播至 $x=30\text{ m}$ 处时,漩滚涌潮的紊动能进一步减小,弱漩滚涌潮和强漩滚涌潮紊动能的平均降幅分别约为 38.06% 和 48.62%。

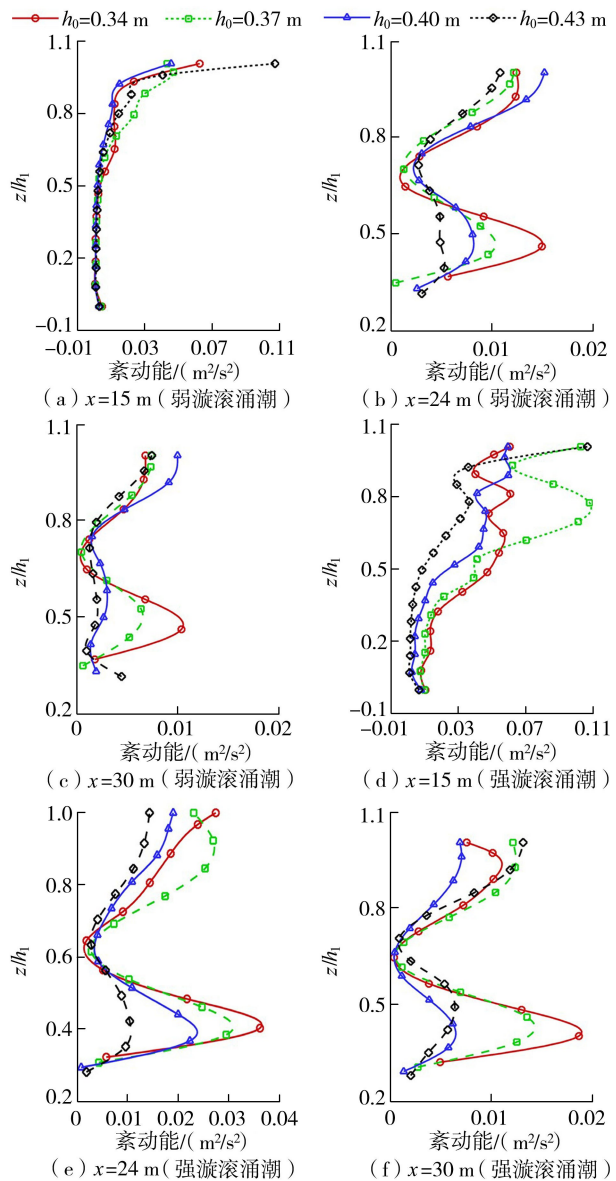


图 11 不同潮前水深下紊动能沿相对水深的分布

2.5 地形高度的影响

不考虑其他参数的影响,强漩滚涌潮和弱漩滚涌潮的涌潮高度分别取 0.24、0.28 m,潮前水深取 0.4 m,通过改变地形高度研究其对漩滚涌潮传播演变及水动力特性的影响。由图 12 可知,各工况下深水区的平均传播速度与理论传播速度吻合较好,其 skill 数约为 0.988。观察浅水区的相对传播速度发现,随地形高度的增大,两种漩滚涌潮的相对传播速度均呈线性减小趋势。当 $d=0.08\text{ m}$ 时,强漩滚涌

潮在浅水区的相对传播速度约为 0.996,表明强漩滚涌潮在通过较低地形时受到的影响较小。当地形高度达到最大值时,强漩滚涌潮和弱漩滚涌潮的传播速度降低幅度最为显著,降低幅度分别约为 10.89% 和 6.76%。

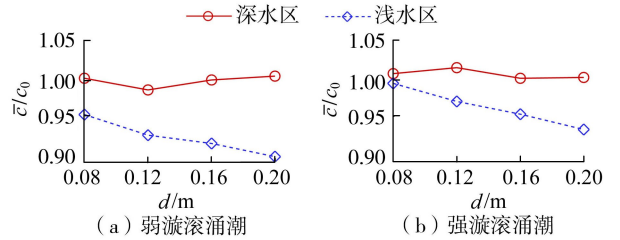


图 12 不同地形高度下的相对传播速度

图 13 为不同地形高度下两种漩滚涌潮紊动能沿水深方向的分布,在深水区 $x=15\text{ m}$ 处,4 种地形高度下的紊动能沿水深方向的变化幅度均较小。当

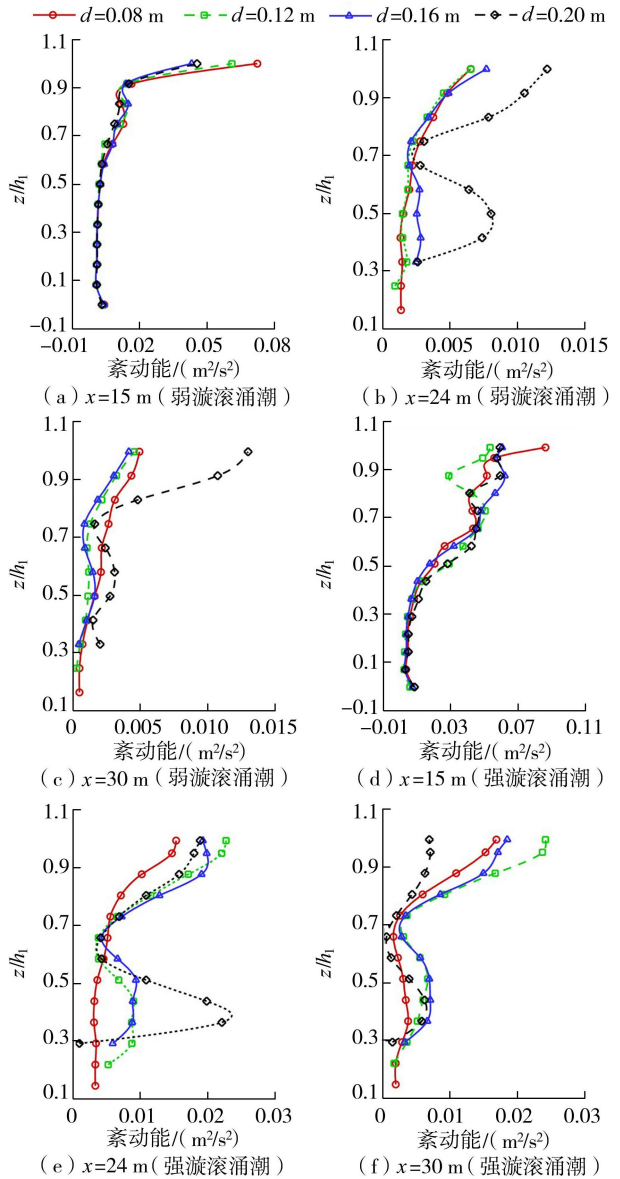


图 13 不同地形高度下紊动能沿相对水深的分布

漩滚涌潮通过地形后($x=24\text{ m}$ 处),随地形高度的降低,水深增加,为水体提供了更大的能量交换空间,使得紊动能沿水深分布更为均匀。当涌潮传播至 $x=30\text{ m}$ 处时,弱漩滚涌潮的紊动能在 $d=0.2\text{ m}$ 时达到最大值,而强漩滚涌潮则呈现出相反的趋势,其紊动能在较小地形高度条件下反而较大。这可能是因为地形高度的降低使得强漩滚涌潮在通过地形时有更多的水体发生透射,同时由于强漩滚涌潮具有更大的能量,水深的增加并未能有效消减其能量,因此在 $d=0.08\text{ m}$ 时,紊动能呈现沿程增大的趋势。

3 理论分析

涌潮是一种强间断非线性流动,尤其是漩滚涌潮,具有传播速度极快、破坏力极大等特性。潘存鸿等^[25]基于一维连续性方程推导了涌潮在平地的理论传播速度,该公式已得到广泛应用。本文通过数值模拟对该公式进行了进一步验证,发现此公式能够很好地预测漩滚涌潮在深水区的传播速度,决定系数 $R^2=0.993$ (图14(a))。然而,实际河床并非平坦,受涌潮冲击的影响,河床常存在沙坎等地形^[27],使得涌潮在传播过程中受到地形抬升的影响,因此研究受地形抬升后的涌潮传播速度 c_1 同样重要。本文研究发现漩滚涌潮在平地的传播速度 c_0 和受到地形抬升后的传播速度 c_1 均与涌潮高度 H 、潮前水深 h_0 、地形高度 d 之间具有良好的线性关系,因此基于前人研究和这3个变量构建如下拟合公式:

$$c_1=c_0A\left(\frac{h_1-h_0}{h_0}\right)^B\left(\frac{d}{0.2}\right)^C \tag{5}$$

式中: A 、 B 、 C 为待定系数。基于数值计算结果,利用多元线性回归分析对系数进行率定,从而得到受地形抬升影响后的漩滚涌潮传播速度计算公式:

$$c_1=0.685\sqrt{\frac{gh_1(h_1+h_0)(h_1-h_0)^{0.21}}{h_0^{1.21}}}\left(\frac{d}{0.2}\right)^{0.064} \tag{6}$$

图14(b)为漩滚涌潮在通过地形后的传播速度 c_1 的模拟值与公式计算值的对比结果,决定系数

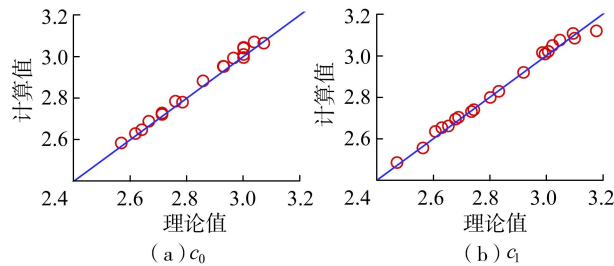


图14 传播速度理论值与计算值的对比

$R^2=0.959$,表明公式计算值与模拟值吻合较好,验证了该公式的准确性。

4 结 论

a. 漩滚涌潮在深水区传播时,潮头前趾处产生正涡,后方水体因剪切作用形成负涡,引发流速分布的高度非均匀性。地形抬升导致涌潮能量显著耗散,弱漩滚涌潮在浅水区逐渐退化为波状涌潮,而强漩滚涌潮因能量集中仍维持高频振荡。

b. 随涌潮高度 H 增大,涌潮传播速度的衰减幅度减小(浅水区相对传播速度从0.89增至0.95),并使得紊动能分布趋于均匀,但浅水区紊动能沿程仍呈显著衰减,降幅达36%~63%。潮前水深 h_0 增大可缓冲涌潮能量,显著削弱浅水区传播速度(相对速度最低降至0.93),并促进紊动能沿水深均匀分布。地形高度降低对漩滚涌潮传播速度的抑制作用减弱,同时为水体能量交换提供了更多空间,但在较低地形($d=0.08\text{ m}$)条件下,强漩滚涌潮因透射增强,紊动能沿程增大。

c. 基于数值模拟结果,针对涌潮高度、潮前水深及地形高度3种因素,利用多元线性回归分析拟合出地形抬升后漩滚涌潮传播速度 c_1 的计算公式,其预测结果与模拟值吻合较好($R^2=0.959$),为复杂地形条件下涌潮动力学研究提供了定量工具。

参考文献:

[1] 林炳尧. 钱塘江涌潮的特性[M]. 北京:海洋出版社, 2008.

[2] Chanson H. Current knowledge in tidal bores and their environmental, ecological and cultural impacts [J]. Environmental Fluid Mechanics, 2011, 11(1): 77-98.

[3] 陶存焕,戴泽衡. 明清时期钱塘江海塘[J]. 水利规划, 1997(3): 73-78. (Tao Cunhuan, Dai Zeheng. Qiantang River seawall in the Ming and Qing Dynasties[J]. Water Resources Planning and Design, 1997(3): 73-78. (in Chinese))

[4] Reungoat D, Chanson H, Keevil C E. Field measurements of unsteady turbulence in a tidal bore: the Garonne River in October 2013 [J]. Journal of Hydraulic Research, 2015, 53(3): 291-301.

[5] 潘存鸿,郑君,胡成飞,等. 钱塘江涌潮影响因素研究[J]. 泥沙研究, 2023, 48(1): 13-20. (Pan Cunhong, Zheng Jun, Hu Chengfei, et al. Study on the impact factors of tidal bore on the Qiantang River [J]. Journal of Sediment Research, 2023, 48(1): 13-20. (in Chinese))

[6] Koch C, Chanson H. Turbulence measurements in positive surges and bores [J]. Journal of Hydraulic Research,

- 2009,47(1):29-40.
- [7] Chanson H. Physical modelling of the flow field in an undular tidal bore[J]. Journal of Hydraulic Research, 2005,43(3):234-244.
- [8] Li Ying, Pan Dongzi, Chanson H, et al. Tidal bore progressing on a small slope[J]. Experimental Thermal and Fluid Science,2017,88:513-518.
- [9] 黄婷,张怀,石耀霖. 基于 Boussinesq 型方程的钱塘江涌潮数值模拟[J]. 地球物理学报,2022,65(1):79-95. (Huang Ting, Zhang Huai, Shi Yaolin. Numerical simulation of the tidal bore in the Qiantang River based on Boussinesq-type equations [J]. Chinese Journal of Geophysics,2022,65(1):79-95. (in Chinese))
- [10] 张舒羽,潘存鸿,程文龙. 钱塘江涌潮对地形变化的响应研究[J]. 海洋工程,2020,38(1):130-139. (Zhang Shuyu, Pan Cunhong, Cheng Wenlong. Response of tidal bore in Qiantang River to topographical changes[J]. The Ocean Engineering, 2020, 38(1):130-139. (in Chinese))
- [11] 戚蓝,肖厅厅,张芝永,等. 涌潮水流 CFD 数值模拟[J]. 水利水运工程学报,2019(3):32-40. (Qi Lan, Xiao Tingting, Zhang Zhiyong, et al. Numerical simulation of tidal bore based on CFD method[J]. Hydro-Science and Engineering,2019(3):32-40. (in Chinese))
- [12] Li Jing, Liu Huaxing, Tan S K. Lagrangian modeling of tidal bores passing through bridge piers[J]. Journal of Hydrodynamics,2010,22(1):496-502.
- [13] 肖厅厅. 涌潮作用下桥墩局部水动力及冲刷特性研究[D]. 天津:天津大学,2019.
- [14] 潘存鸿,曾剑,唐子文,等. 钱塘江河口泥沙特性及河床冲淤研究[J]. 水利水运工程学报,2013(1):1-7. (Pan Cunhong, Zeng Jian, Tang Ziwen, et al. A study of sediment characteristics and riverbed erosion/deposition in Qiantang estuary [J]. Hydro-Science and Engineering, 2013(1):1-7. (in Chinese))
- [15] 钱宁,谢汉祥,周志德,等. 钱塘江河口沙坎的近代过程[J]. 地理学报,1964,30(2):124-142. (Qian Ning, Xie Hanxiang, Zhou Zhide, et al. The fluvial processes of the big sand bar inside the Chien Tang Chiang estuary[J]. Acta Geographica Sinica, 1964, 30(2):124-142. (in Chinese))
- [16] Zhang Zhiyong, Shi Bing, Guo Yakun, et al. Numerical investigation on critical length of impermeable plate below underwater pipeline under steady current [J]. Science China Technological Sciences,2013,56(5):1232-1240.
- [17] 林炳尧,黄世昌,毛献忠. 波状水跃和波状涌潮的分析[J]. 水动力学研究与进展(A辑),1998,13(1):106-115. (Lin Bingyao, Huang Shichang, Mao Xianzhong. Analyses of undular hydraulic jump and undular bore[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 1998, 13(1):106-115. (in Chinese))
- [18] Leng Xinqian. A study of turbulence: the unsteady propagation of bores and surges [D]. St Lucia: The University of Queensland,2018.
- [19] 张芝永,肖厅厅,戚蓝,等. 涌潮水流作用下桩柱表面压强及受力分析[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版),2020,53(6):573-581. (Zhang Zhiyong, Xiao Tingting, Qi Lan, et al. Analysis of the surface pressure and force of piles under tidal bore[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2020,53(6):573-581. (in Chinese))
- [20] 陈刚,何昆,杨元平,等. 强涌潮对桥墩墩身作用力试验研究[J]. 浙江水利科技,2020,48(4):20-23. (Chen Gang, He Kun, Yang Yuanping, et al. Experimental research on force of strong tidal bore on a bridge pier body [J]. Zhejiang Hydraulics, 2020, 48(4):20-23. (in Chinese))
- [21] 曾剑. 基于数据挖掘的钱塘江河口水沙运动规律研究[D]. 杭州:浙江大学,2010.
- [22] 杨火其,王瑞锋,李志永,等. 强涌潮水流条件下直立圆柱体的涌潮作用力试验研究[J]. 水电能源科学,2024,42(9):63-65. (Yang Huoqi, Wang Ruifeng, Li Zhiyong, et al. Experimental study on tidal bore force of vertical cylinder under strong tidal bore[J]. Water Resources and Power,2024,42(9):63-65. (in Chinese))
- [23] Leng Xinqian, Chanson H. Breaking bore: physical observations of roller characteristics [J]. Mechanics Research Communications,2015,65:24-29.
- [24] Chanson H. Unsteady turbulence in tidal bores: effects of bed roughness[J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering,2010,136(5):247-256.
- [25] 潘存鸿,鲁海燕,曾剑. 钱塘江涌潮特性及其数值模拟[J]. 水利水运工程学报,2008(2):1-9. (Pan Cunhong, Lu Haiyan, Zeng Jian. Characteristic and numerical simulation of tidal bore in Qiantang River [J]. Hydro-Science and Engineering,2008(2):1-9. (in Chinese))
- [26] Willmott C J. On the validation of models [J]. Physical Geography,1981,2(2):184-194.
- [27] 潘冬子,李颖,潘存鸿. 涌潮水沙动力过程现场观测研究进展[J]. 海洋工程,2023,41(2):169-181. (Pan Dongzi, Li Ying, Pan Cunhong. A review on field observations of tidal bore-induced flow and sediment dynamic processes[J]. The Ocean Engineering,2023,41(2):169-181. (in Chinese))

(收稿日期:2025-03-25 编辑:雷燕)