



# 长江上游边滩河段水力特性试验研究<sup>\*</sup>

陈雅飞<sup>1,2</sup>, 王平义<sup>1,2</sup>, 王梅力<sup>2,3</sup>, 赵聪聪<sup>1,2</sup>, 郑飞东<sup>1,2</sup>

(1. 重庆交通大学 河海学院, 重庆 400074;

2. 重庆交通大学 国家内河航道整治工程研究中心, 重庆 400074;

3. 重庆交通大学 建筑与城市规划学院, 重庆 400074)

**摘要:** 通过查阅长江上游宜宾至重庆段的航道图, 统计枯水位条件下顺直边滩的高度、滩宽与河道宽之比等形态参数, 设计两种临水面坡度不同( $\alpha=0.167$  和  $0.200$ )的滩体, 利用概化模型试验, 研究其在不同水力条件下主要断面的水深和流速变化规律。结果发现: 水深是影响主要断面同一测点水深变化和流速变化的主要因素, 即距离滩头越近壅水现象越明显, 当流量等水力条件相同时, 水深增加, 紊动作用减弱, 同一测点水深变化量越小, 沿程断面的垂向平均流速、近底平均流速和断面平均流速的变化均相应减小。研究成果将为交错边滩的水流特性及演变机理提供参考。

**关键词:** 长江上游; 边滩河段; 水深变化; 流速变化

中图分类号: TV 131; U 641.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)07-0154-08

## Experimental study on hydraulic characteristics of upper reaches of the Yangtze River

CHEN Ya-fei<sup>1,2</sup>, WANG Ping-yi<sup>1,2</sup>, WANG Mei-li<sup>2,3</sup>, ZHAO Cong-cong<sup>1,2</sup>, ZHENG Fei-dong<sup>1,2</sup>

(1. School of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. National Inland Waterway Regulation Engineering Research Center, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

3. College of Architecture and Urban Planning, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

**Abstract:** By consulting the channel map of Yibin-Chongqing section in the upper reaches of the Yangtze River, this paper counts the morphological parameters such as the height of straight side beach and the ratio of beach width to channel width under the condition of dry water level, and designs two kinds of water surface slopes ( $\alpha = 0.167$  and  $0.200$ ), the variation laws of water depth and velocity of main sections under different hydraulic conditions are studied by using generalized model test. The results show that the water depth is the main factor affecting the change of water depth difference and velocity at the same measuring point of the main section, that is, the closer the distance to the beachhead, the more obvious the backwater phenomenon, the increase of water depth, the weakening of turbulence, and the smaller the change of water depth difference at the same measuring point. When the flow and other hydraulic conditions are the same, the water depth increases, the turbulence decreases, and the changes of vertical average velocity, near bottom average velocity and section average velocity along the section decrease accordingly. The research results will provide a reference for the flow characteristics and evolution mechanism of the staggered beach.

**Keywords:** upper reaches of the Yangtze River; bank reach; water depth change; flow rate change

收稿日期: 2021-12-08

\*基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2018YFB1600400); 重庆市教委科学技术研究项目(KJQN-201900745); 重庆市自然科学基金资助项目(cstc2020jcyj-bshX0043)

作者简介: 陈雅飞(1995—), 男, 硕士研究生, 从事水沙动力学研究。

通讯作者: 王平义(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 从事水沙动力学、生态航道整治方面研究。E-mail:py-wang@163.com

长江上游多为卵石推移质边滩, 根据钱撼等<sup>[1]</sup>对于边滩堆积体的研究, 边滩具有束窄河道, 造成局部水深壅高、改变局部水流流态等作用; 刘林等<sup>[2]</sup>阐述河段形态和河道水文泥沙特征, 并分析了顺直河段交错边滩的演变特点及机理; 闻云呈等<sup>[3]</sup>分析了靖江边滩的演变特性和上游来水来沙、近岸涨落潮等多因素对靖江边滩演变的影响; 沈淇等<sup>[4]</sup>以靖江边滩为例, 分析了弯曲与分汊河型过渡段靖江边滩年内动态冲淤演变规律及其成因; 施骐等<sup>[5]</sup>利用室内概化模型试验研究顺直型河道交错边滩在不同水沙条件下演变的规律; 李健等<sup>[6]</sup>研究了非恒定流条件长江中游边滩的冲刷机理; Kasvi 等<sup>[7]</sup>分析了沙质河流弯曲河道边滩的形态变化和水力参数。目前国内已有研究河段的边滩多位于长江中下游及平原河流地区, 对于长江上游卵石推移质边滩所在河段的水力特性研究甚少。为此, 本文通过查阅长江上游四川宜宾至重庆段航道图, 统计长江上游主要顺直边滩的特征参数, 利用物理概化模型试验, 研究边滩河段横向和纵向断面水深变化、主要断面近底平均流速、断面平均流速等水力特性, 尝试将流场与鱼类生境选择联系起来。生境即生态环境, 最早由 Grinnell<sup>[8]</sup>提出, 是指影响生物生活空间的各种因子, 是自然界各种生物赖以生存的栖息地; Baily 等<sup>[9]</sup>提出生境是生物群落或其中一种, 在其内可以生活着许多野生动物或者一个种群。

## 1 概化模型设计

### 1.1 试验滩体

查阅长江上游四川宜宾至重庆段航道图(比例尺 1:15 000), 统计长江上游主要顺直边滩的特征参数, 选取 12 个顺直边滩进行概化研究, 滩面宽与河道宽之比取中位数 0.5, 试验水槽宽 3 m, 滩宽按不利情况取 150 cm; 边滩最大长度与滩面最大宽度之比取中位数 4.0, 则边滩长宽比为 4:1; 滩体设计时迎水面坡度较缓取 0.06; 背水面坡度较陡取 0.12; 临水面坡度分别取 0.167 和 0.200, 并将两个滩体设为滩体 A 和 B, 平滩段考虑长宽比的影响取 100 cm, 滩头段长 167 cm, 滩尾段长 333 cm。滩体的迎水面以及背水面分别采用斜平

面, 平滩段与滩头段、滩尾段采用圆弧线过渡, 曲面的宽度随滩体的规模而改变。统计得到边滩高度的众数为 20.0, 选取高度相似比尺为 1:100, 流速比尺为 10, 模型滩体高度为 20 cm, 从而由边滩的高度设计试验水深分别为 15 cm(未淹没)、20 cm(恰淹没)、25 cm(完全淹没); 试验流量  $Q_k$  大小根据丰枯水年的规律选取 90、120、150 L/s。图 1 为边滩三视图, 图 2 为边滩试验图。

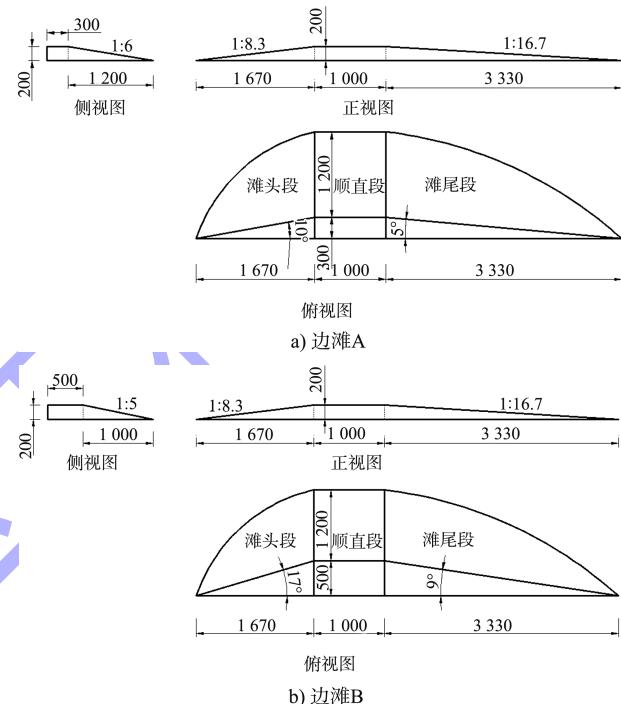


图 1 边滩三视图 (单位: mm)



图 2 边滩试验图

### 1.2 试验方案及测点布置

本试验所用室外矩形水槽系统由重庆交通大

学省部级水利水运工程重点实验室自行建造, 尺寸为  $28.0\text{ m} \times 3.0\text{ m} \times 0.8\text{ m}$  (长×宽×高), 采用挪威 Nortek 科学仪器公司研制的高精度声学多普勒点式流速仪 Nortek ADV (Vectrino) 测量流速。

刘家富等<sup>[10]</sup>参照丁坝的流速分区方法, 将堆积体影响下的明渠水流分成 4 个区段, 分别为主流区、上游滞流区、下游回流区、下游主流区和回流区的过渡区, 类比丁坝和堆积体的水流分区方法, 本试验以边滩顺直段的中心所在断面作为中心线, 将边滩附近的河段划分为滩头缓流区、主流区、滩尾回流区、主流区和滩尾回流区的过渡区。图 3 为边滩试验流态分区。

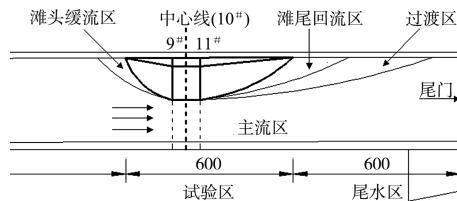
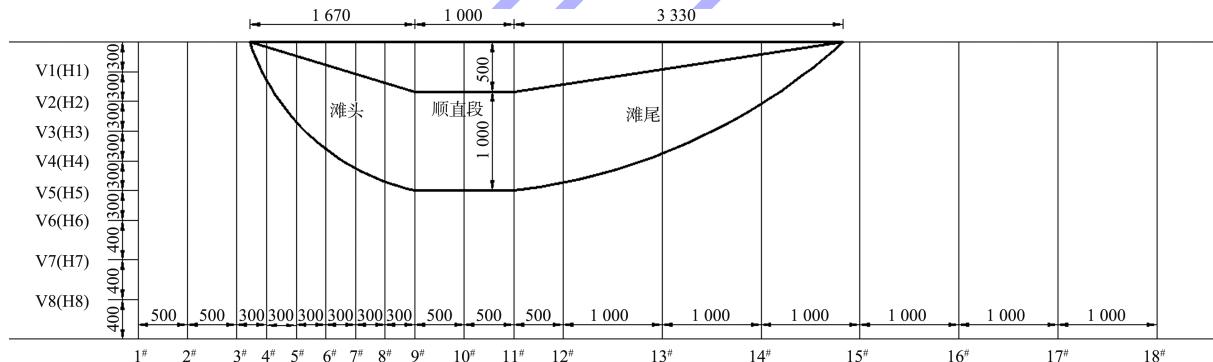
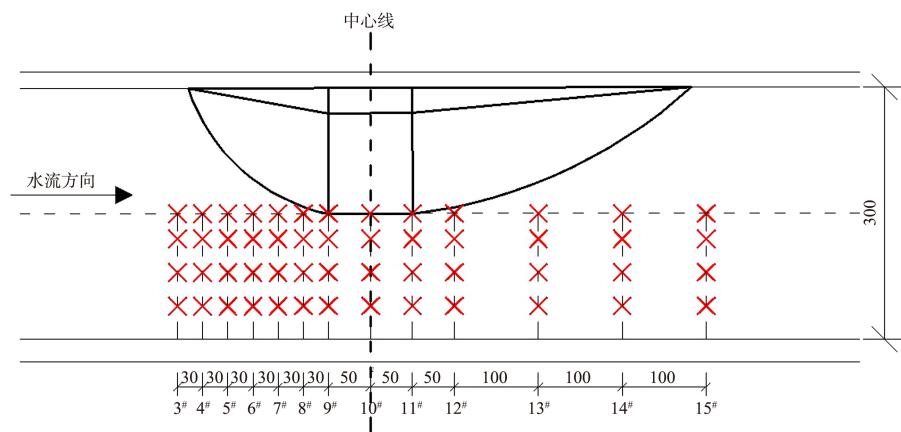


图 3 边滩试验流态分区 (单位: cm)



a) 边滩水深流速测点布置



b) 边滩附近流速测点布置

图 4a) 为边滩 A 水深流速测点布置, 共设有 18 个横断面, 滩体顺直段的中心位于中心线处, 即 10# 横断面的位置, 1#~3# 断面间距为 50 cm, 3#~9# 断面间距为 30 cm, 9#~12# 断面间距为 50 cm, 12#~18# 断面间距为 1 m; 纵向设置 8 个测点, V1~V6 断面间距为 30 cm, V6~V8 断面间距为 40 cm。

图 4b) 为边滩附近流速测点布置, 用 ADV 测量边滩主流区的水流流速和顺直段紊动特性沿水深的变化规律。试验速率为 1 cm/s, 采样频率为 100 Hz, 数据精度为 0.001 m/s, 金属探头的垂直误差设置为 1 mm, 纵向精度误差和横向精度误差设置为 5 mm。图中有 13 个横断面, 每个断面布置 4 个流速测点, 垂向流速测点的布置采用沿水深间隔 1 cm 布置, 流速测点数量随着水深的增加而增加, 测量内容主要有近底流速、垂向流速和平均流速等。试验滩体工况见表 1。

图 4 测点布置 (单位: cm)

表1 试验滩体工况

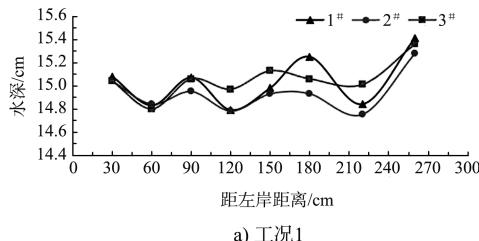
滩体形态	工况	流量/ (L·s <sup>-1</sup> )	水深/ cm	平均流速/ (m·s <sup>-1</sup> )
A	1	90	15	0.20
	2	120	15	0.27
	3	120	20	0.20
	4	120	25	0.16
	5	150	25	0.20
B	1	90	15	0.20
	2	120	15	0.27
	3	120	20	0.20
	4	120	25	0.16
	5	150	25	0.20

## 2 水深变化规律

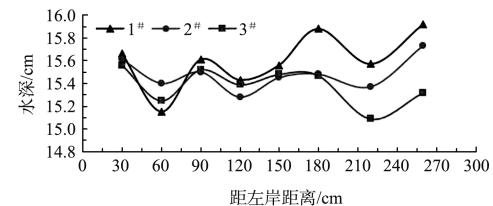
边滩具有束水壅水的作用,使得水流到达滩头缓流区时发生绕流混掺现象,其中顺直段的水流状态更加混乱并产生大小不一的运动漩涡,并不断向下游的滩尾区运动,与主流区水流交汇混掺后逐渐消失,航道中横向水深变化可以反映滩体对水流运动造成的阻力大小,纵向水深变化可以探究滩体对于航道的水深影响范围,从而给船舶安全航行提供参考依据。

### 2.1 横向水深变化

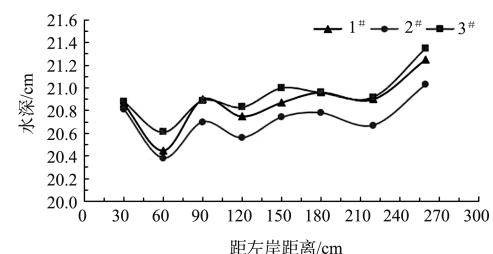
图5为边滩B在不同工况下主要横断面水深变化,考虑到滩体临水面坡度的存在将使波高仪无法水平放置而引起较大的误差,所以选择滩体前方1<sup>#</sup>~3<sup>#</sup>断面进行研究。水深折线变化总体趋势为波动中上升,距离右岸边壁最近的测点水深最高,原因是滩体具有束水壅水的作用,循环水流将要到达滩头区域时,水流开始受到滩体影响发生绕流混掺现象<sup>[11]</sup>,根据水力学中的连续性方程<sup>[12]</sup>可知,过水能力一定时,过水断面面积减小、流速增加,边壁水流受到滩体的影响相比滩体边缘水流而言滞后,从而出现壅水现象。



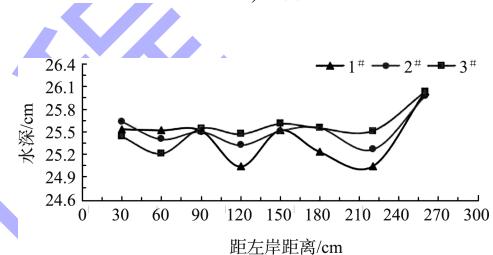
a) 工况1



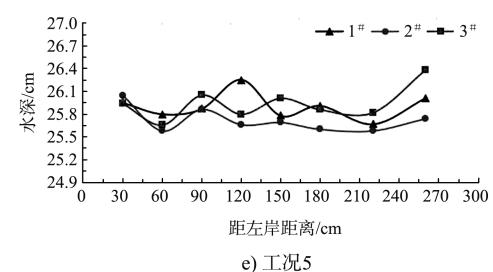
b) 工况2



c) 工况3



d) 工况4



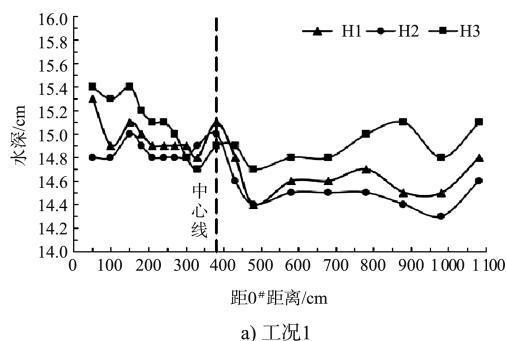
e) 工况5

图5 边滩B不同工况下主要横断面水深变化

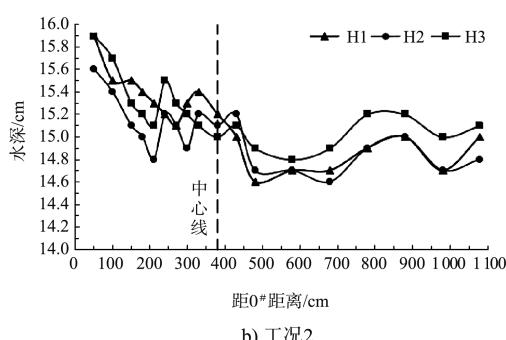
比较5个工况发现:1)河道平均流速相同时( $v=0.2\text{ m/s}$ ),以河道纵向中心线为基准线,3<sup>#</sup>断面水深往往高于2<sup>#</sup>断面的水深,原因在于3<sup>#</sup>断面距离滩体位置更近,对水流的影响更大,而且运动的水流具有惯性力,遇到前方滩体阻挡时水流会先发生壅水现象,水深到达滩头前会逐渐升高,距离滩头越近水深越高;2)当流量一定时( $Q_k=120\text{ L/s}$ ),以河道纵向中心线为基准线,3个断面的水深变化差值随着水深的增加而减少,主要原因与水流的紊动强度等因素有关。

## 2.2 纵向水深变化

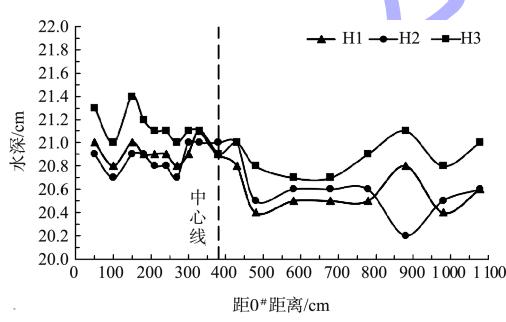
图 6 为边滩 B 在不同工况下主要纵断面水深变化, 横轴为距离 0#断面的距离; 纵轴为水深; 3 条不同的水深变化折线(H1、H2、H3)分别表示纵断面上 h6~h8 的水深测点位置。主要纵断面水深总体变化趋势为波动中下降, 但下降幅度很小, 主要原因同样与水流紊乱强度等因素有关。



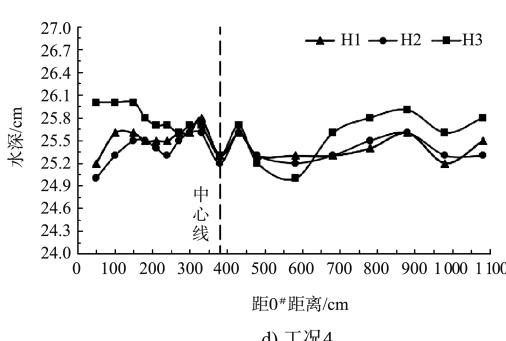
a) 工况1



b) 工况2



c) 工况3



d) 工况4

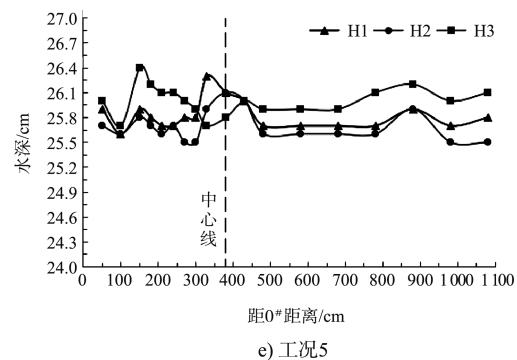


图 6 边滩 B 不同工况下主要纵断面水深变化

比较以上 5 组工况可知: 1) 河道平均流速相同时( $v=0.2 \text{ m/s}$ ), 以河道横向中心线为基准线,  $h_7$  测点水深往往高于  $h_8$  测点的水深, 原因在于顺直段水流最为混乱, 由于滩头区与顺直段交界处水流绕流并与主流区水流混掺以及地转偏向力的作用, 产生大小不一逆时针运动的漩涡, 使得漩涡的外缘水深更高, 而其内部由于流速大、气压小, 水深相比漩涡外缘来说更低,  $h_7$  测点的位置距离漩涡外缘边缘较近, 所以相对水深往往高于  $h_8$  测点的水深; 2) 流量为 120 L/s 时, 以  $H_2$  水深变化折线为例, 水深增加, 沿程断面的最大水深与最小水深之差逐渐减小, 主要原因同上所述。

## 3 流速变化规律

鱼类生境因子主要有流速、水深等, 其中流速为塑造鱼类生境的关键水力因子, 且不同流速对于边滩河段的多样化地貌单元塑造以及鱼类洄游上溯行为等均有重要影响。为此研究边滩河段在不同工况下的流速变化及分布规律, 对于今后研究边滩河段的冲淤变化规律以及地形变化后鱼类洄游行为等具有重要意义。

### 3.1 垂向流速分布

图 7 为边滩 A 在不同工况下三维流速沿垂向分布, 结果发现: 滩体主要断面流速测点的三维流速主要以横向流速为主, 纵向流速与垂向流速很小, 且垂向流速变化规律和横向流速基本相同, 因此选取边滩 A3 组工况的 9#~11#断面的第 5 个流速测点, 重点研究横向流速沿水深方向的变化规律。横轴为距离河床底部的距离, 0 表示河床底

部, 距水槽底部 1~2 cm, 将其作为基准水深; 垂向流速测量间距为 1 cm, 水深越深测点越多, 纵轴为沿着水流方向的横向平均流速。横向平均流速总体变化规律为先增大再逐渐趋于平稳, 当流量一定时, 水深越浅, 测点的横向平均流速越大, 不同工况下的横向平均流速差值越大。工况 2、3 横向平均流速变化曲线趋势线的相关系数均大于 0.9, 拟合效果好。

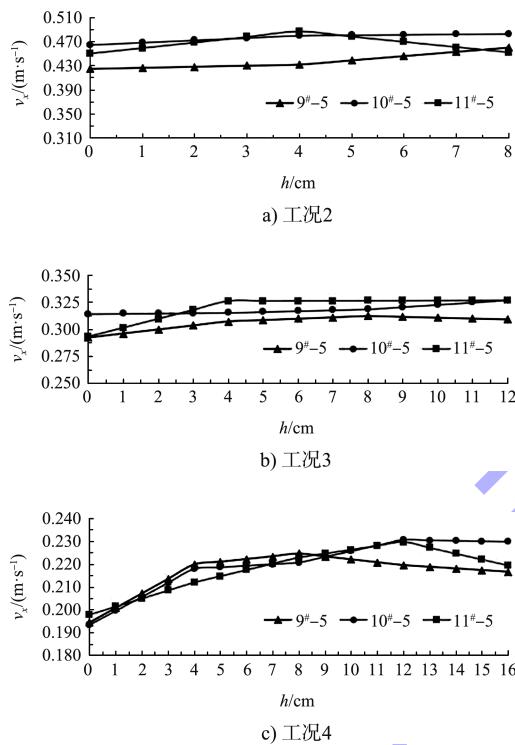


图 7 边滩 A 不同工况下三维流速沿垂向分布

### 3.2 近底流速分布

图 8 为不同工况下近底流速分布图, 选取 5 组试验工况研究边滩 B 的近底流速分布规律, 横轴为距 3#断面距离; 纵轴表示近底流速, 不同工况下近底流速变化总体规律为先增加后减小, 通常顺直段尤其是中心线处的近底流速最大, 原因主要是运动的水流经过滩头与顺直段边界时水深局部升高, 过水断面面积减小, 发生绕流混掺现象<sup>[13]</sup>, 并形成若干个大小不一的运动漩涡, 其向下游运动经过滩尾与顺直段边界时过水面积增加, 造成局部跌水, 水流流速降低, 漩涡逐渐变大, 逐渐向滩尾段运动扩散而逐渐消失, 运动漩涡在顺直段的临水面斜坡上产生, 在滩尾回流区和过

渡区消失。所以顺直段时漩涡的动能最大, 相应的流速也最大。

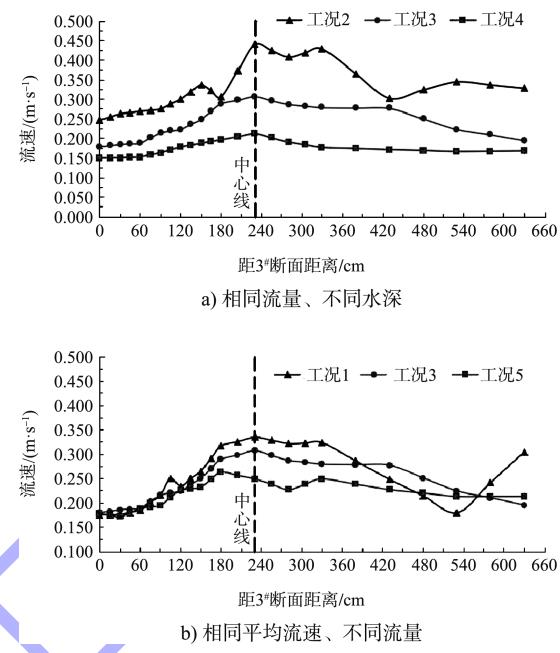


图 8 不同工况下近底流速分布

1) 流量一定时 ( $Q = 120 \text{ L/s}$ ), 水深越浅, 近底流速越大。工况 2 (120-25-0)、工况 3 (120-20-0) 和工况 4 (120-15-0) 的最大近底流速分别为 0.213、0.307 和 0.441 m/s, 平均近底流速分别为 0.175、0.241 和 0.329 m/s, 以上 3 组工况的最大近底流速的位置均为中心线处。主要原因是当流速一定时, 流量越大水深也越大, 随着水深升高, 水流紊动相对减弱, 使得近底流速相应减小。

2) 河段平均流速为 0.2 m/s 时, 流量越大, 近底流速越小。工况 1 (150-25-0) 的最大近底流速为 0.263 m/s, 平均近底流速为 0.219 m/s; 工况 3 (120-20-0) 和工况 5 (90-15-0) 的平均近底流速分别为 0.241、0.254 m/s, 最大近底流速 (位于中心线处) 分别为 0.307、0.335 m/s。经计算得, 同一试验工况下最大近底流速是平均近底流速的 1.2~1.4 倍。

### 3.3 平均流速分布

图 9 为不同工况下平均流速分布, 其中工况 1 最大平均流速为 0.289 m/s, 位置在中心线处, 其他 4 组工况下最大平均流速的位置均在中心线下

游; 工况 2 的流速变化范围为  $0.16\sim0.24$  m/s, 最大平均流速为  $0.238$  m/s; 工况 3 的流速变化范围为  $0.21\sim0.34$  m/s, 最大平均流速为  $0.339$  m/s; 工况 4 的流速变化范围为  $0.18\sim0.52$  m/s, 最大平均流速为  $0.52$  m/s; 工况 5 的流速变化范围为  $0.20\sim0.37$  m/s, 最大平均流速为  $0.363$  m/s; 经计算, 相同工况下的最大平均流速为断面平均流速的  $1.1\sim1.5$  倍。曲线总体变化趋势为先升高后降低, 当流量一定时, 水深越大, 河道平均流速越小; 河道平均流速一定时, 流量越大, 平均流速越小。

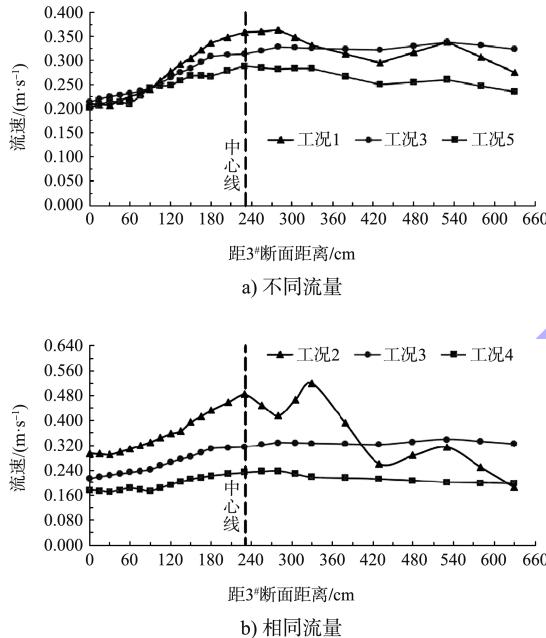


图 9 不同工况下平均流速分布

### 3.4 滩体附近流场分布

图 10 为相同流量条件下不同水深对应的流场分布, 以横轴中心线为坐标原点, 上游为正, 下游为负, 为减少边壁效应对流速的影响, 纵轴的测量范围为  $10\sim290$  cm, 区域颜色越深代表此处的平均流速越大(除滩体区域外), 靠近滩体顺直段处流速大且水流紊乱, 类比丁坝附近产生的局部流场<sup>[14]</sup>, 滩体临水面会产生逆时针运动的漩涡, 其不断向下游运动并变为若干个小漩涡, 航行时需要特别注意此区域; 胡杰龙<sup>[15]</sup>研究发现新型透水丁坝能够提高草鱼上溯成功率和增大丁坝附近草鱼平均聚集度, 鱼类洄游上溯失败后也会选择滩体的回流区作为临时栖息地, 对比 3 幅图发现:

水深增加, 平均流速的最大流速区有效面积占比逐渐减小, 由工况 2 的  $24.96\%$  降至工况 4 的  $8.52\%$ , 最大流速影响的范围随着水深增加而减小, 故流量相同时, 水深为影响流速大小的关键因素。

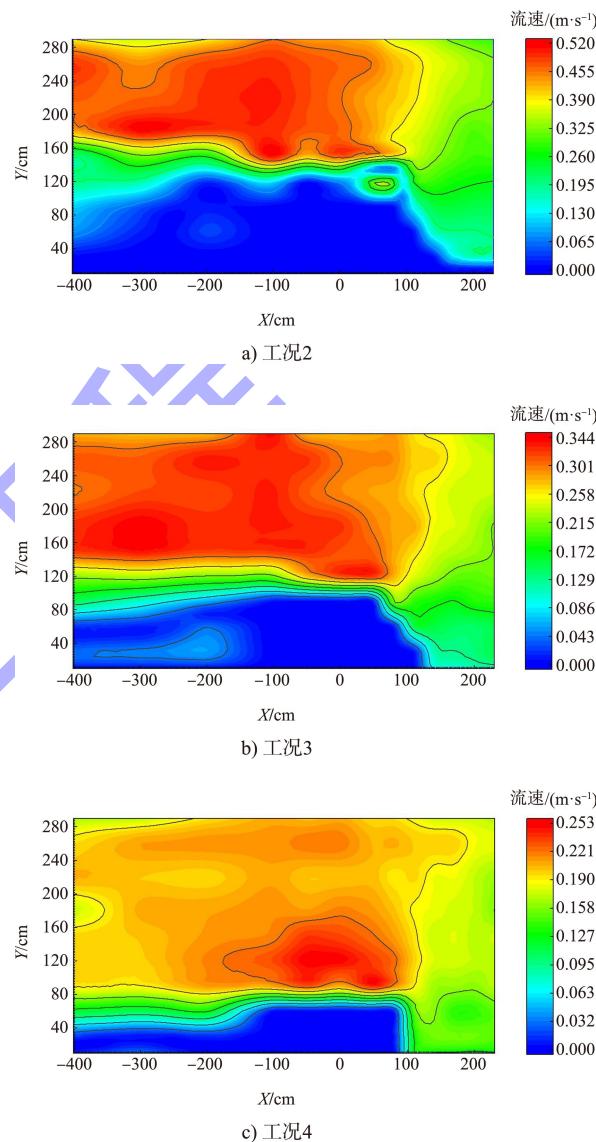


图 10 相同流量下流场分布

### 4 结论

1) 滩体的壅水作用使得距离滩头越近, 横向水深越高, 纵向水深的总体变化趋势为波动中下降, 但下降幅度很小。  
 2) 流量相同时, 横向平均流速随着水深的增加, 先增大再逐渐趋于平稳; 同一测点的近底平均流速和断面平均流速随着水深的增加而减小, 同一工况下最大近底流速是平均近底流速的  $1.2\sim1.4$  倍,

最大平均流速是断面平均流速的1.1~1.5倍。

3) 流量相同时, 平均流速的最大流速区有效面积占比随着水深的增加而减小。

4) 研究成果对进一步探索边滩河段冲淤变化规律以及鱼类洄游生境选择等方面具有重要意义。

## 参考文献:

- [1] 钱撼, 郭志学, 苏杨中, 等. 堆积体作用下的河道冲淤规律[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2013, 45(S2): 41-46.
- [2] 刘林, 黄成涛, 李明, 等. 长江中游典型顺直河段交错边滩复归性演变机理[J]. 应用基础与工程科学学报, 2014, 22(3): 445-456.
- [3] 闻云呈, 徐华, 夏云峰, 等. 新水沙条件下靖江边滩演变特性及影响因素研究[J]. 人民长江, 2018, 49(S1): 6-10.
- [4] 沈淇, 王巍, 顾峰峰. 长江下游江阴—福姜沙弯曲与分汊过渡河段边滩演变研究[J]. 泥沙研究, 2020, 45(2): 23-30.
- [5] 施骐, 张小峰, 许全喜. 不同水沙条件下顺直型河道交错边滩演变规律[J]. 长江科学院院报, 2020, 37(4): 7-13, 24.
- [6] 李健, 王平义, 贺小含, 等. 非恒定流条件下边滩冲刷机理试验研究[J]. 水运工程, 2019(2): 81-88.
- [7] ELINA K, PETTERI A, MATTI V, et al. Spatial and temporal distribution of fluvio-morphological processes on a meander

(上接第72页)

- [7] American Society of Civil Engineers. Seismic design of piers and wharves: ASCE/COPRI 61-14[S]. Reston: American Society of Civil Engineers, 2014.
- [8] 高树飞, 贡金鑫, 冯云芬. 高桩码头Pushover分析影响因素研究[J]. 水利水运工程学报, 2015(5): 1-14.
- [9] MUHO E V, PAPAGIANNOPoulos G A, BESKOS D E. Deformation dependent equivalent modal damping ratios for the performance-based seismic design of plane R/C structures[J]. Soil dynamics and earthquake engineering, 2020, 129: 105345.
- [10] GAO S F, GONG J X, FENG Y F. Equivalent damping for displacement-based seismic design of pile-supported wharves with soil-pile interaction [J]. Ocean engineering, 2016, 125: 12-25.

point bar during a flood event. [J]. Hydrology research: an international journal, 2013, 44(6): 1022-1039.

- [8] GRINNELL J. Barriers to distribution as regards birds and mammals [J]. American naturalist, 1914, 48 (568): 248-254.
- [9] BAILY B, INKPEN R. Assessing historical saltmarsh change; an investigation into the reliability of historical saltmarsh mapping using contemporaneous aerial photography and cartographic data [J]. Journal of coastal conservation, 2013, 17(3): 503-514.
- [10] 刘家富, 彭清娥, 郭志学, 等. 堆积体对河道流速分布的影响研究[J]. 水利水电技术, 2011, 42(11): 38-41.
- [11] 钱撼, 郭志学, 苏杨中. 堆积体作用下的河道最大冲刷深度[J]. 泥沙研究, 2013(3): 65-70.
- [12] 四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室. 水力学(上、下册) [M]. 5版. 北京: 高等教育出版社, 2016.
- [13] 李果, 郭志学, 李彬, 等, 陈日东. 堆积体作用下水流水力特性变化试验研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2016, 48(S1): 14-19.
- [14] 宁健, 李国栋, 马森. 丁坝绕流流场及局部冲刷三维数值模拟研究[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2017, 32(1): 46-53.
- [15] 胡杰龙. 新型透水丁坝水力特性及其对鱼类行为影响研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2021.

(本文编辑 王传瑜)

- [11] GAO S F, GONG J X, FENG Y F. Equivalent damping ratio equations in support of displacement-based seismic design for pile-supported wharves [J]. Journal of earthquake engineering, 2017, 21(3): 493-530.
- [12] PRIESTLEY M J N, CALVI G M, KOWALSKY M J. Displacement-based seismic design of structures [M]. Pavia: IUSS Press, 2007.
- [13] Applied Technology Council. Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures: FEMA 440[R]. Washington: Federal Emergency Management Agency, 2005.
- [14] SHARMA A, ELIGEHAUSEN R, REDDY G R. Pivot hysteresis model parameters for reinforced concrete columns, joints and structures [J]. ACI structural journal, 2013, 110(2): 217-227.

(本文编辑 王璁)