

Effects of Bottom Roughness on Gravity Current Motions

Keke Hu¹, Yu Yang², Yingtien Lin²

¹Zhejiang Institute of Hydraulic and Estuary, Hangzhou Zhejiang

²Ocean College, Zhejiang University, Hangzhou Zhejiang

Email: 80868613@qq.com, 11434019@zju.edu.cn, kevinlin@zju.edu.cn

Received: Dec. 10th, 2017; accepted: Dec. 22nd, 2017; published: Dec. 29th, 2017

Abstract

In this study, lock-exchange gravity current experiments and numerical models are used to investigate the effect of saline concentration and bottom roughness on gravity current dynamics. The Particle Image Velocimetry (PIV) system and a digital camcorder are employed to obtain the evolution of gravity currents on sediment beds. Spatial-temporal evolutions of the current speed, height and macro-structures of current head are analyzed. The results show that bottom sediments play an important role toward the current kinematics, particularly in decreasing the front velocity and vorticity, and changing the front shape. Using the Re-Normalization Group (RNG) k- ϵ turbulent model to simulate the gravity current motions can obtain good agreement with the experimental data. The simulated horizontal current velocity can be used to explain the acceleration, constant speed, and deceleration motions. At the interface between the two different fluids, a negative velocity can be observed due to the entrainment phenomena. Bed sediments change the horizontal velocity profiles of current, entrainment phenomena and inhibit the occurrence of the negative velocity in the horizontal direction. The velocity fluctuation becomes less pronounced on the sediment beds.

Keywords

Gravity Currents, Bottom Roughness

不同底床粗糙对异重流运动特性的影响

胡可可¹, 杨 戩², 林颖典²

¹浙江省水利河口研究院, 浙江 杭州

²浙江大学海洋学院, 浙江 杭州

Email: 80868613@qq.com, 11434019@zju.edu.cn, kevinlin@zju.edu.cn

收稿日期: 2017年12月10日; 录用日期: 2017年12月22日; 发布日期: 2017年12月29日

摘要

本研究利用开闸式盐水异重流试验及数值模拟探讨在不同盐度及底床粗糙度的影响下对异重流运动特性的影响。实验利用粒子图像测速法(PIV)和摄像机可以记录整个异重流的运动过程,异重流头部的位置和速度是主要的研究区域。研究结果显示,底床铺设泥沙在异重流运动中扮演重要的角色,增加了底床摩擦,使头部的运动速度及涡度值明显降低,而且异重流头部变钝。利用重整化群(RNG)的 $k-\epsilon$ 湍流模式模拟研究异重流头部结构,发现数值结果和实验结果吻合良好,并可利用从剖面水平流速解释异重流加速区、等速区和减速区。当底床是光滑时,在两种流体的交界面有著因为卷吸作用所造成的负向速度,也就是异重流剖面水平速度产生剧烈变化;底床泥沙的存在改变了异重流的水平速度分布,使剖面流速并未出现负向流速。

关键词

异重流, 底床粗糙度

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

异重流又称密度流,是两种或是两种以上流体因为密度的差异所产生的相对运动,主要为在水平方向的流动,该现象已经在很多地球物理学研究和工业实际中得到应用[1],包括大洋海底的浊流,污染物向大气、河流、湖泊的释放等都属于异重流的实例。由于野外观测异重流需要耗费大量的人力及物力,目前多以实验室模拟的异重流研究两种混合流体的特性和流动速度[2] [3] [4]。其中,可能最有趣的研究主要集中在异重流前端的半椭圆形部分,也就是异重流的头部。掌握了异重流头部的动力学特征和结构,这将会对头部之后流体的流动特性理解起到积极的作用。

Britter 和 Simpson [5]已经利用流动显示等方法对二维异重流的头部进行过大量的研究,这些研究表明异重流的头部处于稳定状态。但是在很多实际情况中,异重流通常是不稳定的。所以随着流体的流动,前端的流速、头部的高度和长度、密度差都会不断的改变。实验室通常利用开闸式实验探讨异重流的运动,也就是把一种密度较大的流体(被隔板分隔)释放进入密度较小的流体,可以产生一种典型的异重流[3] [6]。当隔板移开时,头部的运动速度从零迅速地增长到一个定值。这个速度在维持一个很短的时间之后将进入衰减阶段, Huppert 和 Simpson 给出了一个标准:当异重流的头部厚度与总水深的比值小于 0.075 时表明已经进入了衰减阶段[2]。之后,重力与惯性力相平衡,异重流进入了惯性阶段。最后第三个阶段,粘滞力远大于惯性力,头部的运动速度将会进一步的减小。

目前已经有很多利用图像分析技术研究异重流的实验[7] [8]。最近在测量技术上的发展已经集中在异重流的流速和密度测量。粒子图像测速法(Particle Image Velocimetry, PIV)已经被用来研究微观异重流内部的流场,例如 He 等[9]利用 PIV 探讨层结水体下异重流沿坡运动的流场及涡度场,彭明等[10]利用 PIV 观察异重流水平流场振荡现象与因为开闸而引起水面波动的关联性。此外,PIV 与其他测量方法的联合使用已经可以同时测量流速和密度,如 PIV 和平面激光诱导荧光技术(Planar Laser Induced Fluorescence, PLIF)的联合使用[9] [10]。

大多数的研究都是在光滑底床进行的实验,很少有实验对底床摩阻的影响进行研究[11]。Nogueira等人[12]利用石英砂来创造一个粗糙底床来进行实验,他们利用图像分析技术来观察异重流的动力过程。目前的研究着重于量化头部的运动情况。本次研究通过设置不同的实验条件,来研究不同的盐度、底床摩阻以及植被对异重流头部运动的影响。

2. 实验设置

本次的隔板释放实验是在一个长 2.0 m, 宽 0.2 m 的矩形水槽中进行, 隔板及水槽均由有机玻璃制成。隔板设置在离水槽右侧 0.1 m 的地方, 在隔板右侧小区域内放入盐水, 左侧大区域内放入清水, 盐水的初始密度为 ρ_1 (如图 1 所示)。本次研究采用三个不同浓度, 清水的初始密度为 ρ_0 , 两边的水深相等, 均为 h_0 , 实验中水深为 15 cm。在加入底床泥沙的实验中, h_0 指的是床底到水面之间的距离。在所有的实验中, 都要保持初始的相对水深 $h_0/H=1$, 其中 H 为周围流体的总水深。

盐水的密度将会在每次实验前进行测量, 在每次实验前都会对实验的水温进行测量, 并使用电子盐度计对盐水的密度进行测量。当隔板被迅速抽出时, 密度较大的盐水将会向清水中流出, 密度较大的盐水将会沿着水槽底部流动, 密度较小的清水将会在盐水之上以相反的方向移动。在这个过程当中, 两种密度不同的液体相互之间发生掺混, 当该异重流的头部撞击到水槽的左边壁, 则实验结束。为了避免光的影响使实验结果更加清晰, 实验中在水槽的背面贴有遮光的黑纸, 从而产生一个黑暗且均一的背景。本次实验记录由采集速率每秒 400 帧(Frame per second, fps)的 PIV 系统和每秒 30 帧的普通摄影机完成。实验中使用 15 cm × 10 cm 的标定板在每次实验前进行标定, 来统一每次的实验结果, 全部的实验都在无光黑暗的环境中进行。通过 PIV 的采集系统得到实验过程中的图像信息, 然后再对所得的图像信息进行分析处理。而普通摄像机用于拍摄整个异重流的全过程。

在做完清水与盐水的实验后, 为了找出底床摩阻对异重流头部运动情况的影响, 本次研究分别采取在水槽底部铺上泥沙的方式实现。本次实验采用三种粒径人工砂进行实验, 泥沙的粒径分别为 $D_{50} = 2.6$ mm, $D_{50} = 5.2$ mm, $D_{50} = 51.2$ mm, 采用普通摄像机记录异重流的全过程并进行分析, 之后选用 $D_{50} = 2.6$ mm 的人工砂进行 PIV 的实验。普通摄像机泥沙实验的参数设定如表 1 所示。

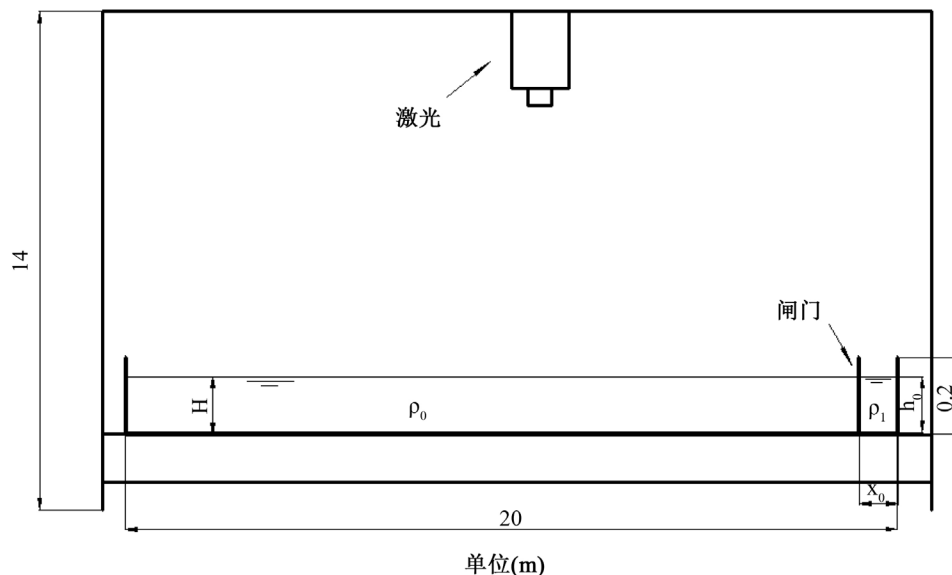


Figure 1. Schematics of the experimental flume
图 1. 实验水槽的示意图

Table 1. Experimental relevant parameters
表 1. 实验组相关参数设定

组别	浓度(‰)	底床糙度(=D50) (mm)	折减重力 g' (cm/s ²)
1	2.1	0	2.2
2	5.0	0	4.1
3	8.0	0	6.0
4	2.1	2.6	2.2
5	5.0	2.6	4.1
6	8.0	2.6	6.0
7	2.1	5.2	2.2
8	5.0	5.2	4.1
9	8.0	5.2	6.0
10	2.0	51.2	2.2
11	5.0	51.2	4.1
12	8.0	51.2	6.0

3. 实验结果与分析

异重流的头部形态受到很多因素的影响，本文中考虑盐度和底床摩阻对异重流头部形态的影响。

3.1. 盐度不同对异重流头部形态的影响

3.1.1. PIV 结果分析

盐度的不同会对异重流头部形态产生一定的影响，本次采用 2‰和 8‰两种浓度的盐水进行实验，从图 2 的速度矢量与涡度分布图可以看出，2‰盐水异重流头部的涡度值在 7 (1/s)左右，而 8‰盐水异重流头部的涡度值较大，最大涡度值则在 8 (1/s)左右，可见当盐水浓度增大时，异重流头部的运动速度会显著增加，基本形态保持相同。

3.1.2. 普通摄像机结果分析

通过得到的普通摄像机影像进行分析，通过下列方程对位置和时间进行归一化，可得无量纲位置 s^* 和时间 t^* 。

$$s^* = (s - s_0) / s_0 \quad (1)$$

$$t^* = t / t_0 \quad (2)$$

$$t_0 = s_0 / (g' h_0)^{1/2} \quad (3)$$

式中， s_0 为闸门长度，相当于初始闸门的宽度； s 为异重流头部运动的位置距离水槽边壁的距离； g' 为折减重力； h_0 为初始水深； t 为异重流运动的时间。最后在对数坐标系中画出 s^*-t^* 的关系图，如图 3 所示。从文献(例如[6])中得知，当 $s^* \approx 9$ 时， s^*-t^* 的关系图近似于一条直线。从图 3 中可以看出，在对数坐标系中，三种不同浓度盐水的异重流的 s^*-t^* 图发展趋势基本一致，有相同的斜率。分别在 $s^* < 9$ 和 $s^* > 9$ 两种情况下对其进行线性拟合，并求得两段的斜率，发现当 $s^* < 9$ 时斜率为 1.26，当 $s^* > 9$ 是斜率为 0.86。

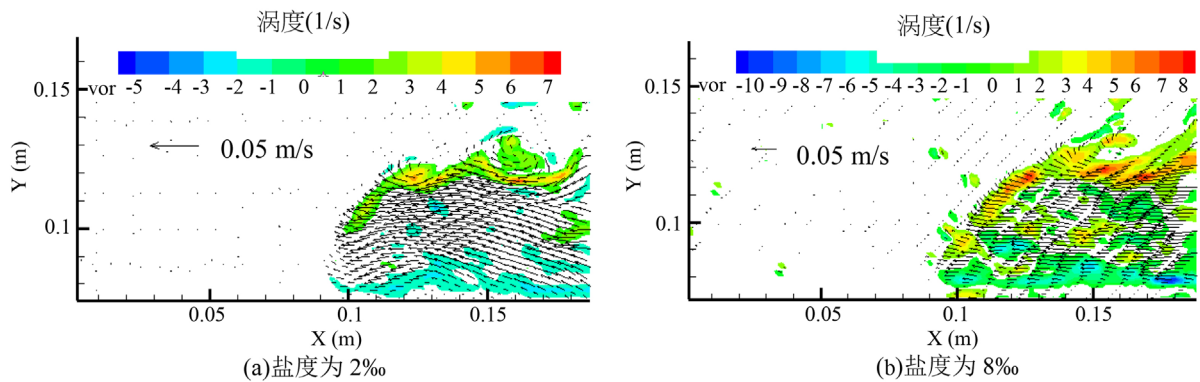


Figure 2. Velocity and vorticity field in different environments (the vorticity field is positive in clockwise direction and only shows vortices with absolute vorticity values larger than 0.5)

图 2. 不同盐度下的速度矢量与涡度分布图(涡度值以逆时针方向为正, 仅显示了涡度绝对值大于 0.5 的等值线)

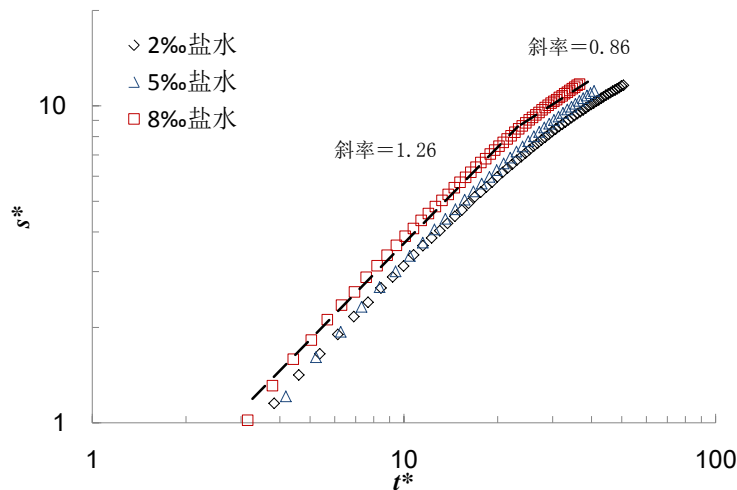


Figure 3. The s^*-t^* relationship in different saline concentrations

图 3. 不同盐度的 s^*-t^* 关系图

3.2. 底床摩擦对异重流头部形态的影响

3.2.1. PIV 结果分析

底床摩擦的存在同样也会对异重流头部形态产生一定的影响, 本次实验使用 2‰浓度的盐水与清水进行掺混, 分别在底床不铺设泥沙与在底床铺设一定厚度的泥沙, 经过分析得到了两种情况下的速度矢量图与涡度图, 如图 4 所示。当不铺设泥沙时, 异重流头部的涡度值在 7 (1/s)左右, 而当铺设泥沙时, 涡度值则在 2.5 (1/s)左右。铺设泥沙增加了底床摩擦, 头部的运动速度降低, 涡度值明显降低, 同时头部运动速度分布较不铺设泥沙的情况更加集中, 底床铺设泥沙对异重流头部形态的影响比较大。从两者的形态来看, 当铺设泥沙时, 异重流头部变钝, 涡旋表现不是很明显, 厚度增加。由于有泥沙的存在, 加大了底床的摩擦阻力, 异重流的整体速度被减缓, 整体的异重流高度降低, 最大流速出现的位置降低。泥沙的存在, 剖面速度的震荡过程被减弱, 底床的摩擦与波动产生的水平速度相互抵消, 使得震荡过程减弱, 只存在一个速度峰值。

3.2.2. 普通摄像机结果分析

运用和 3.1.2 相同的处理方法, 画出三种不同粒径泥沙的 s^*-t^* 关系图, 如图 5 所示。

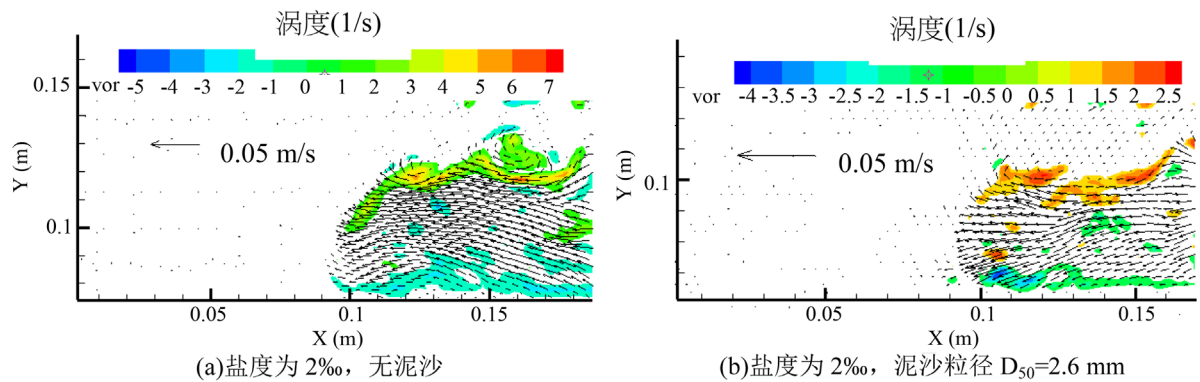


Figure 4. Velocity and vorticity field in smooth and rough beds (the vorticity field is positive in clockwise direction and only shows vortices with absolute vorticity values larger than 0.5)

图 4. 有无底床泥沙的速度矢量与涡度分布图(涡度值以逆时针方向为正, 仅显示了涡度绝对值大于 0.5 的等值线)

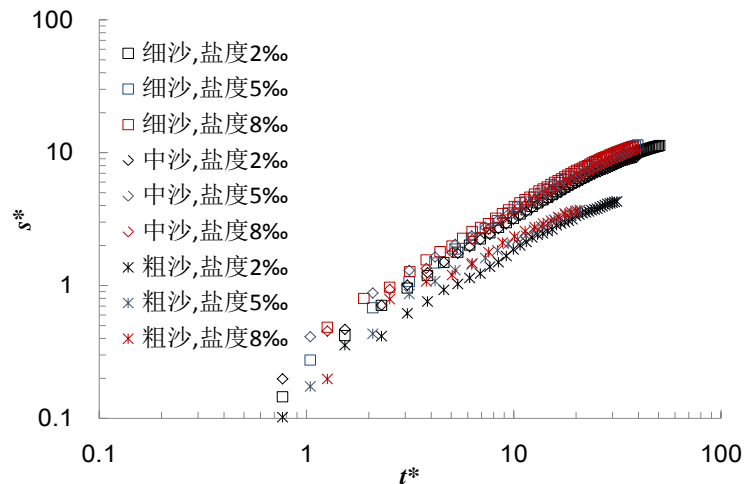


Figure 5. The s^*-t^* relationship in different sediment beds

图 5. 不同底床泥沙粒径的 s^*-t^* 关系图

从图 5 中可以看出, 每种粒径泥沙在不同盐水浓度情况下有相同趋势的曲线。同时, 对三种粒径泥沙 s^*-t^* 图进行线性拟合, 并求得三种不同底床泥沙粒径的斜率分别为: 细砂($D_{50} = 2.6 \text{ mm}$)为 1.02, 中砂($D_{50} = 5.2 \text{ mm}$)为 0.89, 粗砂($D_{50} = 2.6 \text{ mm}$)为 0.79。随着底床粒径的增大, 斜率是在不断减小的, 代表粒径越大时, 异重流头部的运动速度越慢, 因此底床颗粒对异重流所造成的摩擦力越大, 但是减小的量越来越小, 同时三种粒径的 s^*-t^* 图拟合直线斜率都比不含有泥沙的小。由此可知, 泥沙对异重流头部的速度有一定的影响, 随着泥沙粒径不断增大, 对于异重流所造成的摩擦力就会增大, 所以异重流头部的速度相比于光滑底床上的异重流头部速度为小, 但是当粒径增大到一定程度, 泥沙对其头部速度的影响将趋于不变。

4. 数值解法与计算结果分析

本文利用 Fluent 软件进行计算, 湍流模式采用重整化群(Re-Normalization Group, RNG) $k-\epsilon$ 模式, 网格为正交均匀网格, 网格总数为 55,200 (网格大约为 0.05 平方厘米), 速度及其他物理量定义在控制体的中心, 时间步长为 0.05 秒。对上述所说的实验相同条件进行数值求解, 得到数值的结果。首先, 将数值结果与实验结果进行比较, 作出实验过程中三种盐度条件下数值结果的图象, 如图 6 所示。从图中可以看

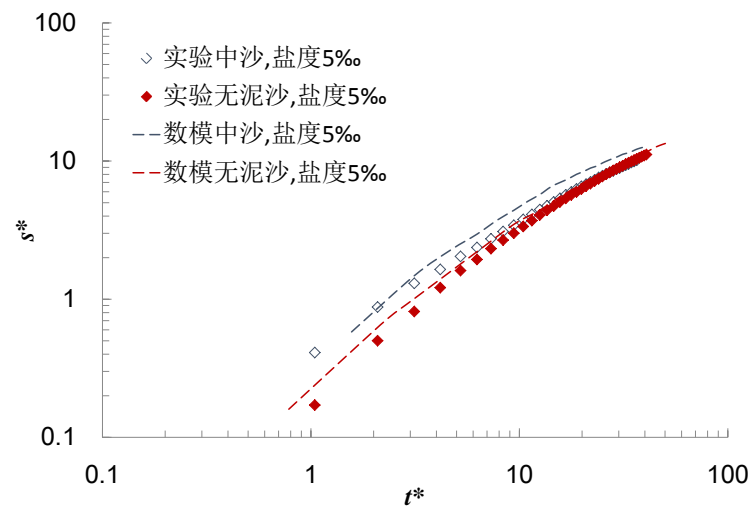


Figure 6. The s^*-t^* relationship between the experiments and numerical simulations for different saline concentration

图 6. 不同盐度条件下实验与数值结果的 s^*-t^* 图

出, 数值结果与实验结果比较相似, 由于闸门拉动及底部磨阻的影响, 两者之间存在很小的差距。由图 6 可将异重流的运动分为加速区(运动距离约在小于 9 倍闸门的位置)、等速区(运动距离约在 9 倍闸门的位置)与减速区(运动距离约在大于 9 倍闸门的位置), 以下将比较在不同区域的剖面水平流速。

图 7 给出异重流头部不同横坐标处水平速度分量 u 随深度变化的剖面图, 从图中可以看出, 在异重流内部存在两个高速区域, 一个是靠近底床位置, 呈现正向最大速度(正向定义为较重流体流动方向); 另一个在头部顶端, 呈现负向最大速度。正向最大速度是因为密度差所产生的驱动力所造成的, 而负向最大速度是因为两种流体交介面间的卷吸作用(entrainment)所产生的。在前一个高速区域中, u 在 y 为约 0.02 m 处达到正向最大值; 在后一个区域中, u 在 y 为约 0.08 m 处达到负向最大值。在九个闸长之前的区域 ($s^* = 10$), 我们可以观察到头部后端的速度峰值比前端的速度峰值大, 表明异重流在此区域内运动时后端提供足够的动能使异重流加速推进(如图 7(a), 例如 $x = 0.65$ 及 0.67 米处的最大速度比 $x = 0.62$ 米处大)。在 $s^* = 10$ 处, 异重流受到底床的阻力影响渐渐驱近于等速运动(如图 7(b))。当异重流运动到远离 9 倍闸门的位置, 此时头部后端的速度峰值不再大于前端的速度峰值(如图 7(c)), 也就是后端无法提供足够的动能来驱动异重流继续前进导致异重流头部速度减小。通过数值模拟的速度剖面分析, 异重流的运动可区分为: 加速区、等速区与减速区, 此运动型态与文献和实验结果符合。

然后, 通过改变底床的糙率来模拟含有泥沙情况下异重流的发展过程, 将数值结果与实验结果进行比较, 作出在 5‰ 盐水浓度条件下数值结果的 s^*-t^* 图象, 如图 8 所示。从图中可以看出, 数值结果与实验结果比较相似, 由于闸门拉动及底部磨阻的影响, 两者之间存在很小的差距。图 9 给出异重流头部不同横坐标处水平速度分量 u 随深度变化的剖面图, 从图中可以看出, 在含有泥沙的情况下, 剖面速度都有了明显的减小, 但是也会存在加速区、等速区和减速区, 这与实验结果是相符的。和之前情况不同的是, 含有泥沙时, 剖面速度都会在靠近底床的地方发生突变, 越往水表面靠近, 速度越小, 说明泥沙压缩了异重流头部的高度, 而且减缓了异重流的运动速度, 而且缺少了不含泥沙情况下剖面流速的震荡过程, 与之前所得到的实验结果相同。

5. 结论

盐水的浓度对异重流头部的形态影响很小, 但是随着盐水浓度的增大, 异重流头部的运动速度会有

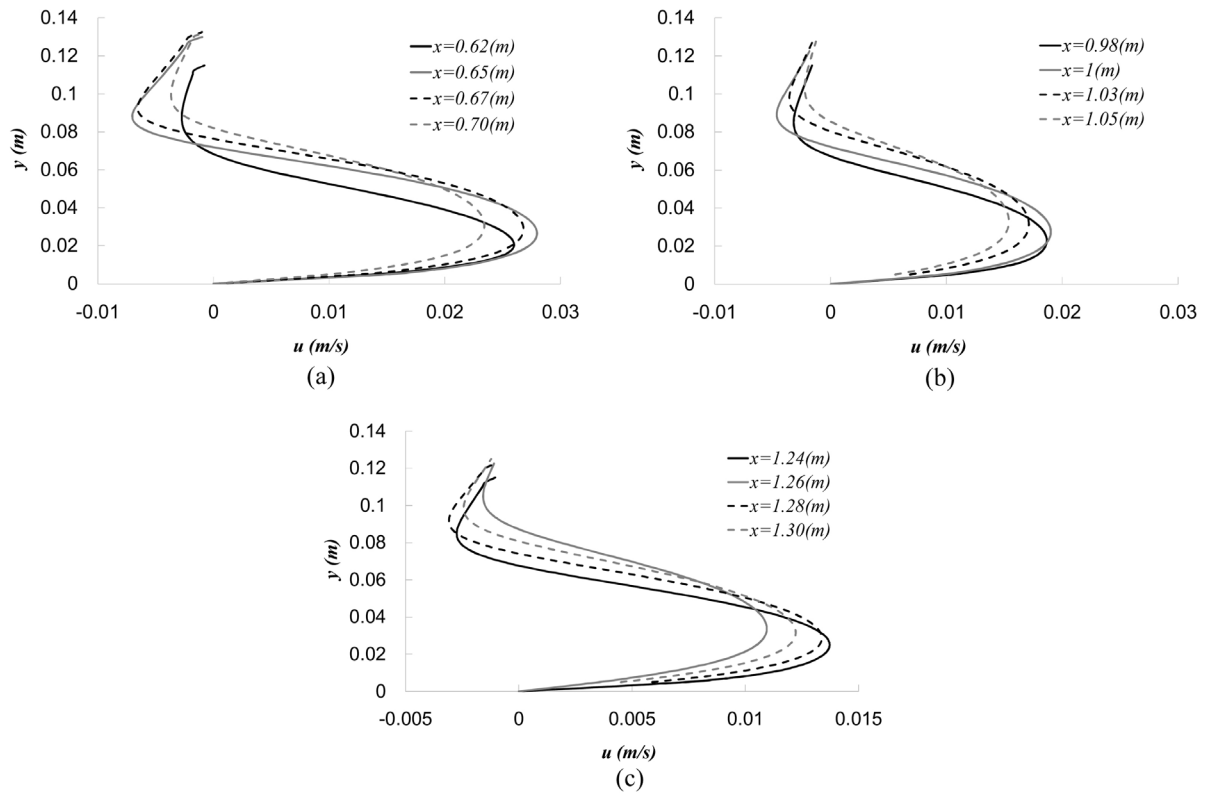


Figure 7. Velocity profiles in gravity current over a smooth bed: (a) within the distance of nine lock lengths $s^* = 7$ (acceleration region); (b) at the distance of the nine lock lengths $s^* = 10$ (constant velocity region); and (c) beyond the distance of the nine lock lengths $s^* = 10$ (deceleration region)

图 7. 光滑床面的异重流速度剖面图: (a) 在 9 倍闸门之内 $s^* = 7$ (加速区); (b) 在 9 倍闸门时 $s^* = 10$ (等速区); (c) 在 9 倍闸门之外 $s^* = 13.1$ (减速区)

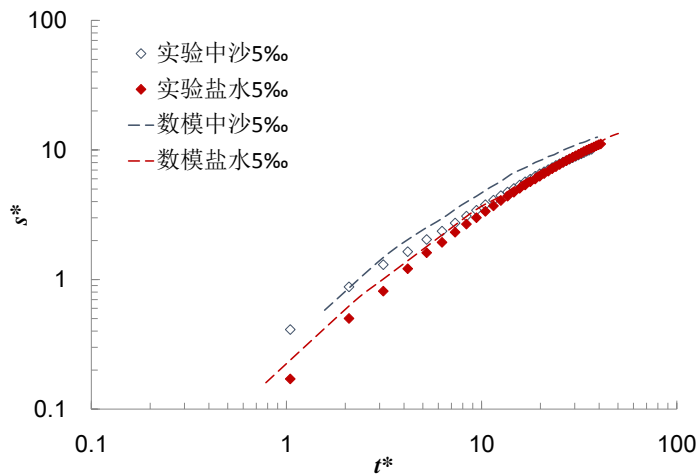


Figure 8. The $s^* - t^*$ relationship between the experiments and numerical simulations in 5‰ saline concentration over a sediment-covered bed.

图 8. 5‰盐度条件下含有泥沙底床实验与数值结果的 $s^* - t^*$ 图

一定程度的增大。底床铺设泥沙增加了底床摩擦，头部的运动速度降低，涡度值明显降低，同时头部运动速度分布较不铺设泥沙的情况更加集中。从形态上来看，当铺设泥沙时，异重流头部变钝，涡旋表现

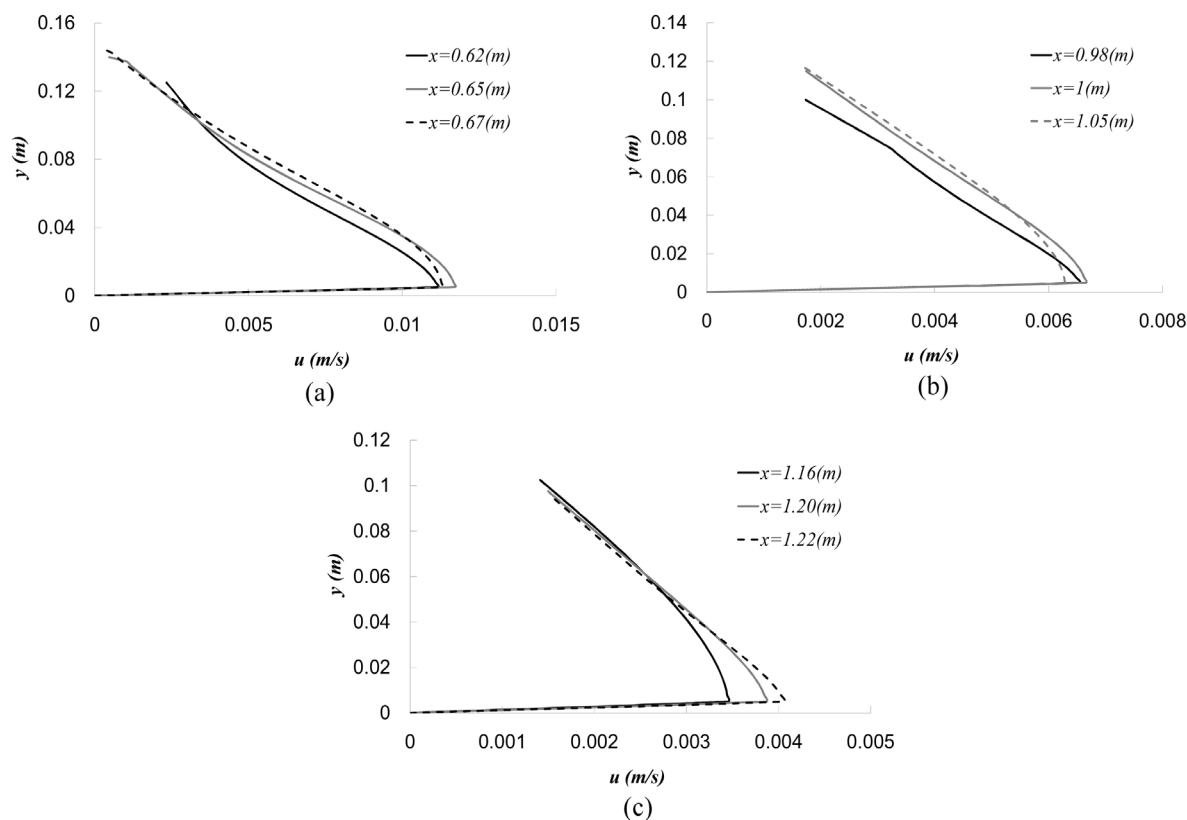


Figure 9. Velocity profiles in gravity current over a rough bed: (a) within the distance of nine lock lengths $s^* = 7$ (acceleration region); (b) at the distance of the nine lock lengths $s^* = 10$ (constant velocity region); and (c) beyond the distance of the nine lock lengths $s^* = 10$ (deceleration region)

图 9. 粗糙床面的异重流速度剖面图: (a) 在 9 倍闸门之内 $s^* = 7$ (加速区); (b) 在 9 倍闸门时 $s^* = 10$ (等速区); (c) 在 9 倍闸门之外 $s^* = 13.1$ (减速区)

不是很明显, 厚度增加。随着泥沙粒径不断增大, 影响程度不断变大, 但是当粒径增大到一定程度, 泥沙对其头部速度的影响将趋于不变。底床铺设泥沙对异重流头部形态和速度的影响较大。利用 PIV (粒子图像测速法) 可分析异重流头部速度及涡度分布情形, 可用在未来决定掺混系数。利用简化群 $k-\epsilon$ 模式湍流模式进行数值运算, 其结果与实验结果基本吻合, 同时可以从剖面水平流速的角度解释, 异重流加速区、等速区和减速区, 在两种流体的交界面也存在因为回流所造成的负向速度, 即存在速度的剧烈变化; 底床泥沙的存在改变了异重流的水平速度分布, 使剖面流速并未出现水平负向速度。

致 谢

本研究感谢国家重点研发计划(2016YFC0402406, 2017YFC0405503)资助。

参考文献 (References)

- [1] Alahyari, A.A. and Longmire, E.K. (1996) Development and Structure of a Gravity Current Head. *Experiments in Fluids*, **20**, 410-416. <https://doi.org/10.1007/BF00189379>
- [2] Simpson, J.E. and Britter, R.E. (1979) The Dynamics of the Head of a Gravity Current Advancing over a Horizontal Surface. *Journal of Fluid Mechanics*, **94**, 477-495. <https://doi.org/10.1017/S0022112079001142>
- [3] Huppert, H.E. and Simpson, J.E. (1980) The Slumping of Gravity Currents. *Journal of Fluid Mechanics*, **99**, 785-799. <https://doi.org/10.1017/S0022112080000894>
- [4] Hallworth, M.A., Phillips, J.C., Huppert, H.E., et al. (1993) Entrainment in Turbulent Gravity Currents. *Nature*, **362**,

- 829-831. <https://doi.org/10.1038/362829a0>
- [5] Britter, R.E. and Simpson, J.E. (1978) Experiments on the Dynamics of a Gravity Current Head. *Journal of Fluid Mechanics*, **88**, 223-240. <https://doi.org/10.1017/S0022112078002074>
- [6] Rottman, J.W. and Simpson, J.E. (1983) Gravity Currents Produced by Instantaneous Releases of a Heavy Fluid in a Rectangular Channel. *Journal of Fluid Mechanics*, **135**, 95-110. <https://doi.org/10.1017/S0022112083002979>
- [7] Hacker, J., Linden, P.F. and Dalziel, S.B. (1996) Mixing in Lock-Release Gravity Currents. *Dynamics of Atmospheres & Oceans*, **24**, 183-195. [https://doi.org/10.1016/0377-0265\(95\)00443-2](https://doi.org/10.1016/0377-0265(95)00443-2)
- [8] Adduce, C., Sciortino, G. and Proietti, S. (2012) Gravity Currents Produced by Lock Exchanges: Experiments and Simulations with a Two-Layer Shallow-Water Model with Entrainment. *Journal of Hydraulic Engineering-ASCE*, **138**, 111-121. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000484](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000484)
- [9] He, Z.G., Zhao, L., Lin, T., Hu, P., Lv, Y., Ho, H.C. and Lin, Y.T. (2016) Hydrodynamics of Gravity Currents down a Ramp in Linearly Stratified Environments. *Journal of Hydraulic Engineering-ASCE*, **143**, Article ID: 04016085. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001242](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001242)
- [10] 彭明, 袁辉靖, 李存标. 开闸式异重流锋速转变的一个判据[J]. 中国科学: 物理学、力学、天文学, 2015, 45(3): 034702.
- [11] Ezequiel, M.J. and García, M.H. (2009) Combined PIV/PLIF Measurements of a Steady Density Current Front. *Experiments in Fluids*, **46**, 265-276. <https://doi.org/10.1007/s00348-008-0556-7>
- [12] Nogueira, H., Adduce, C. and Franca, E. (2013) Analysis of Lock-Exchange Gravity Currents over Smooth and Rough Beds. *Journal of Hydraulic Research*, **51**, 417-431. <https://doi.org/10.1080/00221686.2013.798363>

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2328-0557, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>
期刊邮箱: ijfd@hanspub.org