

浸没式植被对异重流运动特性的影响

林颖典, 熊 杰, 竺钟芳

(浙江大学 海洋学院, 浙江 舟山 316021)

摘要: 为研究异重流流经浸没式植被时的运动特性,以天然河道中的植被为原型,对植被环境中异重流的运动规律进行了试验研究,并采用异重流头部(最前缘)速度代表其运动速度. 研究表明,异重流流经短植被群(长度 30 cm、高度 3 cm)时大部分异重流在植被顶部向前运动,流过植被后依然保持典型轮廓,呈现一个先加速、后匀速、然后迅速减速、最后缓慢线性减速的运动过程;流经长植被群(长度 80 cm、高度 6 cm)时大部分异重流被阻挡于植被后方,仅有少部分异重流流出植被后缓慢向前运动,呈现先加速、后匀速、然后迅速减速、最后缓慢运动的过程. 异重流运动过程分为坍塌阶段和自相似阶段,植被的阻挡效应可以减小坍塌阶段向自相似阶段的转化点,并且转化点与植被阻挡效应呈负相关,但与异重流浓度关系不显著. 异重流与环境水体掺混界面涡度值为正,与水平床界面涡度值为负;当植被的阻挡效应较强时,异重流流出植被后掺混和卷吸作用较弱,且出流量与异重流浓度呈正相关.

关键词: 异重流; 试验; 浸没式植被; 粒子图像测速技术
中图分类号: TV145 **文献标志码:** A

Study on Effects of Submerged Vegetation on Gravity Currents Dynamics

LIN Yindian, XIONG Jie, ZHU Zhongfang
(Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan 316021, China)

Abstract: To study the movement characteristics of gravity currents propagated submerged vegetation, taking the vegetation in natural rivers as prototype, and front velocity of gravity currents represented velocity of gravity currents. The results showed that gravity currents propagated the short vegetation (length 30 cm, height 3 cm), it rided on the top of vegetation and moved forward, and then contain the typical contour outflow the vegetation; presented a movement process that accelerated first, followed by uniform forward, then decreased, and finally slowed down. When gravity currents propagated the long vegetation (length 80 cm, height

6 cm), part of it was blocked behind the vegetation and only a part of gravity currents out of vegetation and moved forward, represented the process of first accelerating, then uniform velocity, then rapidly decelerating, and finally slow velocity. The movement process of gravity currents was divided into slumping phase and self-similar phase, and the blocking effect of vegetation can reduce the position of slumping phase translated into self-similar phase, and transform position was negatively related to the barrier effect of vegetation, but it was not related to the density of gravity currents. The vorticity values at the interface between gravity currents and environmental water was positive, and it was negative at the interface with horizontal bed. When the vegetation had a strong blocking effect, the mixing and entrainment effect was weak after gravity current propagated out of vegetation, and the outflow positively correlated with the density of gravity currents.

Key words: gravity current; experiment; submerged vegetation; particle image velocimetry

异重流,又称密度流,是因为密度差异使得其中一种流体沿着交界面流动,在流动过程中不与其他流体发生全局性掺混的现象^[1]. 异重流在自然界和工程界非常普遍,如河口盐水楔在海草群运动、沼泽地温差异重流在菹草群运动、雪崩在森林中运动、倒灌异重流回流至支流区域流经沉水植物群等. 研究异重流与植被的相互作用对解决水利、海洋、环境等领域问题都具有非常重要的意义^[1].

在自然环境和实际工程中,植被分为浸没式(植被高度小于水深)和非浸没式(植被高度大于水深)、刚性(植被变形可以忽略)和柔性(植被变形不可忽略),因此植被对水流和异重流运动的影响程度由植被本身决定. Zhang 等^[2]研究在不同密度且随机排列的植被群(芦苇群)作用下的水流运动特性,得知

收稿日期: 2018-06-30

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0402406);国家自然科学基金(11672267);浙江省教育厅科研项目(Y201432286);舟山市科技计划项目浙江大学海洋学院专项(2018C81034)

第一作者: 林颖典(1976—),男,副教授,硕士生导师,工学博士,主要研究方向为近岸水动力学. E-mail: kevinlin@zju.edu.cn

垂向流速分布形态与植被密度相关并且在植被群尾部湍动能达到峰值而出现冲刷区域. Shi 等^[3]通过测量在 3 种流量和 4 种植被(轮叶黑藻)密度下水流的垂向平均流速,得出垂向平均流速存在 3 个区域,曼宁粗糙度系数受植被密度影响显著且与平均流速成负相关. 前人在研究水流与植被相互作用时主要采用天然植被或植被模型,然而在研究异重流与植被相互作用中植被采用刚性圆柱体替代. Naftchali 等^[4]研究表明异重流流经植被(刚性圆柱体)较在平滑底床上运动的头部速度和浓度减小更加显著. Cenedese 等^[5]研究异重流流经浸没式植被(刚性圆柱体)时,会在植被尾迹形成涡量(植被密度为 9%)或者由于瑞利-泰勒不稳定性(Rayleigh Taylor instability)加强掺混(植被密度为 35%). Zhou 等^[6]通过室内试验和数值模拟研究异重流流经浸没式植被时的运动特性,得出头部速度在坍塌阶段随植被密度呈现先减小后增大的规律,流经线性排列或交错排列的植被时会出现 4 种运动形态(层间流、溢出流、倒转流、贯穿流).

综上所述,目前关于植被对异重流运动特性影响的研究中植被简化为圆柱体,与自然界沉水植被形态差异较大,存在一定的局限性. 并且研究异重流的运动特性主要集中在运动形态、头部速度、掺混速率等宏观方面,对于流入流出植被时异重流内部的速度场和涡度场等微观结构研究甚少. 而在实际工程中,同时研究异重流微观结构和宏观结构对探明异重流运动机理及对环境的影响具有极其重要的意义.

因此,利用试验手段,对开闸式异重流流经植被(人工秧苗草坪)的头部位置、头部速度、形态特征、速度场及涡度场等展开研究,并综合考虑异重流浓度、植被长度和高度的影响.

1 试验设置

1.1 试验装置及步骤

试验在浙江大学舟山校区泥沙与流体环境力学恒温实验室内的平坡矩形水槽中进行. 试验水槽长 200 cm、宽 20 cm、高 20 cm(长宽比为 10 认为可以忽略异重流三维效应,仅考虑其二维特性),水槽边壁和底板由亚克力板制成,闸门置于距离水槽右端 10 cm 处且采用步进电机控制启闭. 植被采用聚乙烯(polyethylene, PE)塑料草坪模拟自然界植被,放置于距离闸门 40 cm 处,为避免植被排列方式的影响,单株植被采用随机分布方式并且植被密度为 4.5%,植被设计为 4 种类型,即① 植被长度 $L_v=30$ cm,高度 $H_v=3$ cm,共 46 株;② $L_v=30$ cm, $H_v=6$ cm,共 50 株;③ $L_v=80$ cm, $H_v=3$ cm,共 125 株;④ $L_v=80$ cm, $H_v=6$ cm,共 127 株,如图 1 所示. 环境水体和异重流分别同时注入闸门左侧和右侧水槽内,当水槽两侧液面高度达到 $H=15$ cm 时,停止注水. 等待水槽内水体静止时开启闸门,重流体坍塌并沿着水槽底部向前运动,环境水体在重流体上方作相反方向运动^[1],当异重流到达水槽末端试验结束.

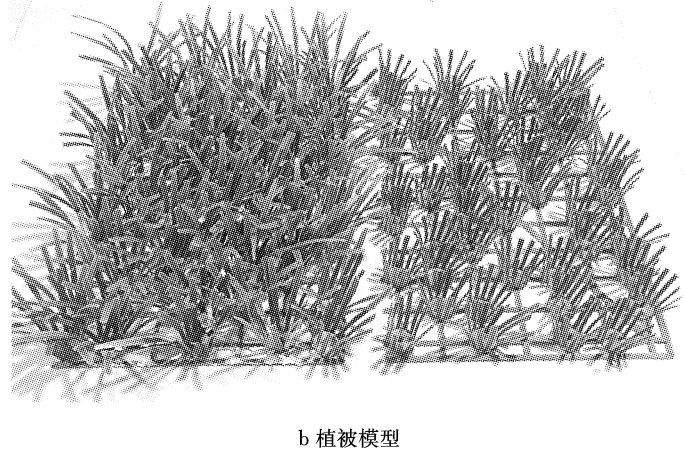
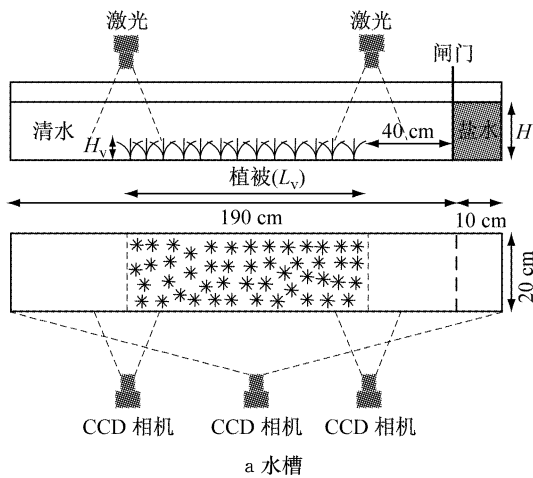


图 1 开闸式异重流试验水槽设置及植被模型布置

Fig.1 Setup of the experimental flume for lock-exchange gravity currents and arrangement of simulated vegetation

异重流的运动过程由数码相机拍摄,一台 Nikon 相机架设于水槽前方 100 cm 处侧向(侧视)

拍摄异重流的运动全过程,相机分辨率 $1\ 920 \times 1\ 080$ pixel,帧率 25 FPS (frame per second). 拍摄

过程均采用标定板进行水平和垂直标定. 异重流流入流出植被过程中的速度场、涡度场等数据通过粒子图像测速系统拍摄, 拍摄范围处于距离闸门 20~60 cm 和 50~90 cm(短植被)或 100 cm~140 cm(长植被)处. 该系统包含一个垂直植被放置的分辨率 $2\,320 \times 1\,726$ pixel、帧率 200 FPS 的 CCD 相机(charge coupled device camera)和平行于水槽中心线波长为 532 nm、扩散角为 45° 的激光器.

1.2 特征参数与试验工况

流体之间密度差异是产生异重流的根本原因^[1], 采用有效重力加速度 g' 描述二者差异, 其定义为

$$g' = \frac{\Delta\rho \cdot g}{\rho_0} \quad (1)$$

式中: $\Delta\rho = \rho_1 - \rho_0$, ρ_1 为异重流密度, ρ_0 为环境水体密度; g 为重力加速度, $g = 9.81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

描述异重流运动状态的雷诺数 Re 、惯性力与重力相对大小的弗劳德数 Fr ^[5] 为

$$Re = \frac{u_T \cdot H}{\nu} \quad (2)$$

$$Fr = \frac{u_T}{\sqrt{g'H}} \quad (3)$$

式中: u_T 为全程平均速度; H 为水深; ν 为水的运动黏滞系数, 取值 $10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.

表 1 给出异重流运动的试验参数. 试验中异重流均采用食用盐配置, 浓度采用量纲一化参量盐度 S 表征, 试验中各组雷诺数均大于 1 000, 认为异重流是湍流流动并且黏性作用影响不显著^[7].

表 1 试验工况及相关参数

Tab. 1 Experimental runs and parameters

工况	L_v/cm	H_v/cm	$S/\%$	$g'/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	$u_T/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-2})$	Re	Fr
1	0	0	0.48	3.74	3.08	4 615	0.41
2	0	0	0.98	7.38	4.39	6 581	0.42
3	0	0	1.55	11.51	5.10	7 681	0.39
4	30	3	0.48	3.74	1.97	2 954	0.26
5	30	3	0.98	7.38	2.83	4 246	0.27
6	30	3	1.55	11.51	3.66	5 045	0.26
7	30	6	0.48	3.74	1.67	2 507	0.22
8	30	6	0.98	7.38	2.52	3 778	0.24
9	30	6	1.55	11.51	3.19	4 785	0.24
10	80	3	0.48	3.74	0.99	1 491	0.13
11	80	3	0.98	7.38	1.18	1 763	0.11
12	80	3	1.55	11.51	1.48	2 212	0.11
13	80	6	0.48	3.74	0.88	1 323	0.11
14	80	6	0.98	7.38	1.17	1 755	0.11
15	80	6	1.55	11.51	1.47	2 204	0.11

2 试验结果分析

2.1 形态分析

图 2 展示异重流与环境水体掺混界面随时间的变化关系(其中 x 为异重流的头部位置, h 为异重流的高度). 对于图 2a($L_v = 0 \text{ cm}$, $H_v = 0 \text{ cm}$), 异重流在运动过程中始终保持典型轮廓(椭圆形头部和高度近于恒定的尾部), 头部高度略小于水深的 1/2. 异重流与环境水体的掺混界面曲折多变, 认为是界面处的斜压不稳定和开尔文-亥姆霍兹不稳定共同造成^[8]. 对于图 2b($L_v = 30 \text{ cm}$, $H_v = 3 \text{ cm}$), 异重流在闸门拉升后向下坍塌并向前运动, 异重流头部到达植被后继续在植被间运动, 头部和后方身体由于植被的阻挡效应出现抬升现象(头部高度大于水深的 1/2), 随着异重流继续向前运动, 身体抬升现象消失, 在流过植被后, 异重流依然保持典型轮廓并沿着水槽底部继续向前运动. 对于图 2c($L_v = 30 \text{ cm}$, $H_v = 6 \text{ cm}$), 由于植被高度近于异重流高度, 其对异重流的阻挡效应显著, 大部分异重流被阻挡在植被后方, 小部分异重流流过植被向前运动, 但此时异重流高度仅为水深的 1/5, 并且交界面趋于平滑, 认为植被可以抑制异重流的掺混(mixing)和卷吸(entrainment). 对于图 2d($L_v = 80 \text{ cm}$, $H_v = 3 \text{ cm}$), 异重流在长植被群顶部可以运动较长距离, 运动过程中与环境水体持续掺混, 加之植被本身的阻挡效应, 两者共同作用导致异重流流出植被时已经不再保持典型轮廓, 而保持高度较低的“长条形”形状. 对于图 2e($L_v = 80 \text{ cm}$, $H_v = 6 \text{ cm}$), 异重流在流经植被时的掺混界面趋于平滑, 但是与 Tanino 等^[9] 观察异重流在植被区域会呈现线性界面的结论不同, 究其原因, 异重流流经圆柱体植被时, 异重流掺混受到抑制并且流动方向始终向前而呈现线性界面, 而流经试验中的植被群时掺混亦是受到抑制, 但是单株植被呈现外展形状并且垂直分布更加无序化, 导致异重流在局部区域流动的多方向性, 最终出现界面趋于平滑而不呈现线性界面的形态.

2.2 头部位置

图 3 展示异重流量纲一化头部位置(异重流头部最前缘点)与时间的变化关系($x^* = x/H$, $t^* = t/\sqrt{H/g'}$). 由于高锰酸钾与盐水具有很好的相容性和跟随性, 故头部位置直接采用商用 MATLAB 软件获取. 对于图 3a, 当异重流浓度 $S = 0.48\%$ 时, 异

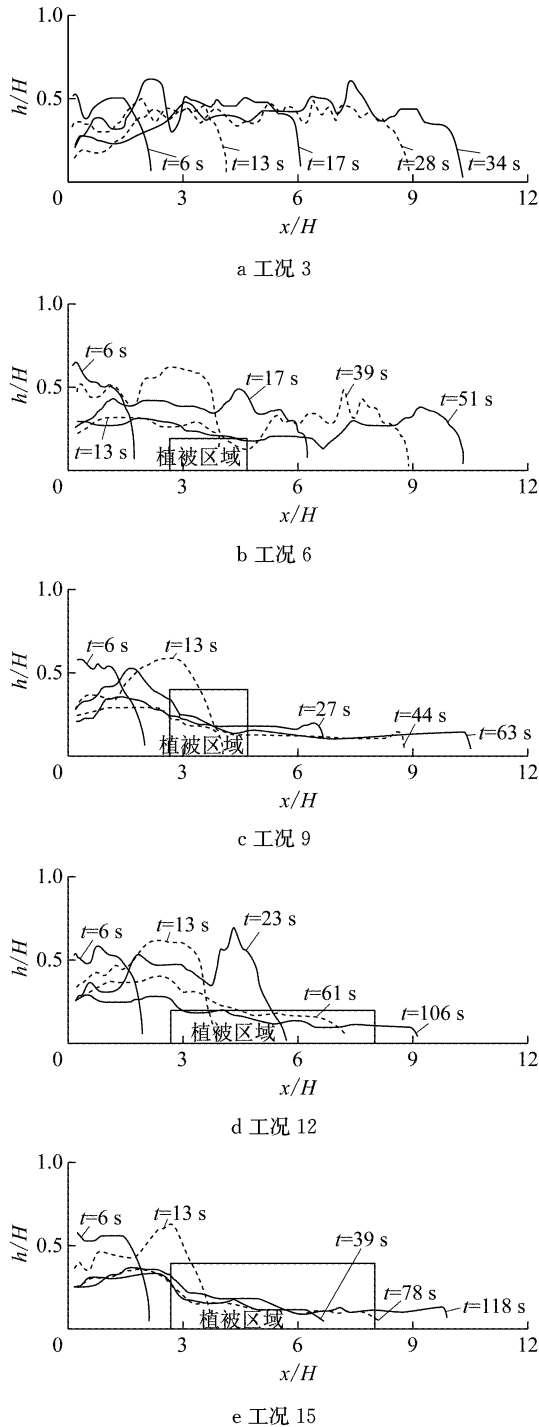


图 2 异重流界面随时间变化关系

Fig.2 Progression of the interface of gravity currents with time

重流头部位置随时间逐渐增大,而递增速率逐渐减小.比较工况 1(无植被工况)与其他工况(有植被工况),得出植被对异重流存在阻挡效应,导致异重流头部速度递减越显著,头部位置随时间递增越缓慢;比较工况 4($L_v=30\text{ cm}$, $H_v=3\text{ cm}$)和工况 7($L_v=30\text{ cm}$, $H_v=6\text{ cm}$),得出植被长度较短时(植被长度约为水槽的 $1/7$),植被高度越大(仅考虑本文研究的

植被高度),对异重流的阻挡效应越显著.究其原因,植被高度 $H_v=3\text{ cm}$ 时,大部分异重流在植被顶部运动,受植被阻挡不显著,对异重流的影响类比为加大底床粗糙度,存在一定的阻挡效果;植被高度 $H_v=6\text{ cm}$ 时,结合图 2 分析,异重流流经植被时均会在植被内部运动,此时植被会显著增大异重流动能的耗散,减小其头部速度,加之部分异重流被阻挡在植被后方,两者共同作用对异重流的阻挡效果更显著.当 $t^*=40$ 时,对于异重流运动速度,工况 10 ($L_v=80\text{ cm}$, $H_v=3\text{ cm}$)仅为工况 4 ($L_v=30\text{ cm}$, $H_v=3\text{ cm}$)的 71.58%,得出植被高度一定时,植被长度越大,阻挡效应越显著;究其原因,植被长度越大,对异重流的阻挡距离越长,阻挡效应越显著.对于工况 10 ($L_v=80\text{ cm}$, $H_v=3\text{ cm}$)和工况 13 ($L_v=80\text{ cm}$, $H_v=6\text{ cm}$),异重流运动时间相同时头部位置差异不显著,认为植被较长时(植被长度约为水槽的 $2/5$),异重流头部位置变化受植被高度影响不显著;究其原因,植被长度较大时,成为阻挡异重流运动的主导因素,而改变植被高度(次要因素)对异重流头部位置变化影响不显著.对于图 3b 和图 3c,异重流浓度分别 0.98% 和 1.55%,异重流头部位置随时间变化特性与图 3a 相同,可以认为异重流浓度仅改变其初始重力势能,从而影响异重流的运动速度,而对其他水力特征影响不显著.

进一步分析异重流头部位置随时间的变化关系,可以得出即使植被存在,异重流运动阶段也可以分为 2 个阶段,即坍塌阶段(slumping phase)(头部位置与时间呈线性关系)、自相似阶段(self-similar phase)(头部位置与时间呈非线性关系);由于水槽长度限制并未观察到黏性阶段.图 4 展示各工况异重流从坍塌阶段向自相似阶段的转化点.转化点采用最小二乘法线性拟合得到,具体是采用线性拟合头部位置曲线,当拟合优度连续下降时认为拟合优度连续下降的起始位置为转化点.由图可知,异重流浓度变化对转化点大小影响不显著.对于无植被工况(工况 1、2、3),转化点 $x^*=7.14\pm 0.20$ (约 10 个闸门长度,正负代表异重流浓度改变影响转化点的范围),与前人^[1]研究结果一致.对于有植被工况,转化点均减小,究其原因,异重流在流经植被时能量耗散越大,速度减小越显著,迫使其更早进入自相似阶段.当植被 $L_v=30\text{ cm}$ 、 $H_v=3\text{ cm}$ 时,转化点 $x^*=3.92\pm 0.05$.究其原因,异重流在流经植被时,大部分异重流被抬升而在植被顶部运动,部分动能转化为重力势能,并且顶部异重流与环境水体持续掺混,

两者共同作用导致异重流过早进入自相似阶段。

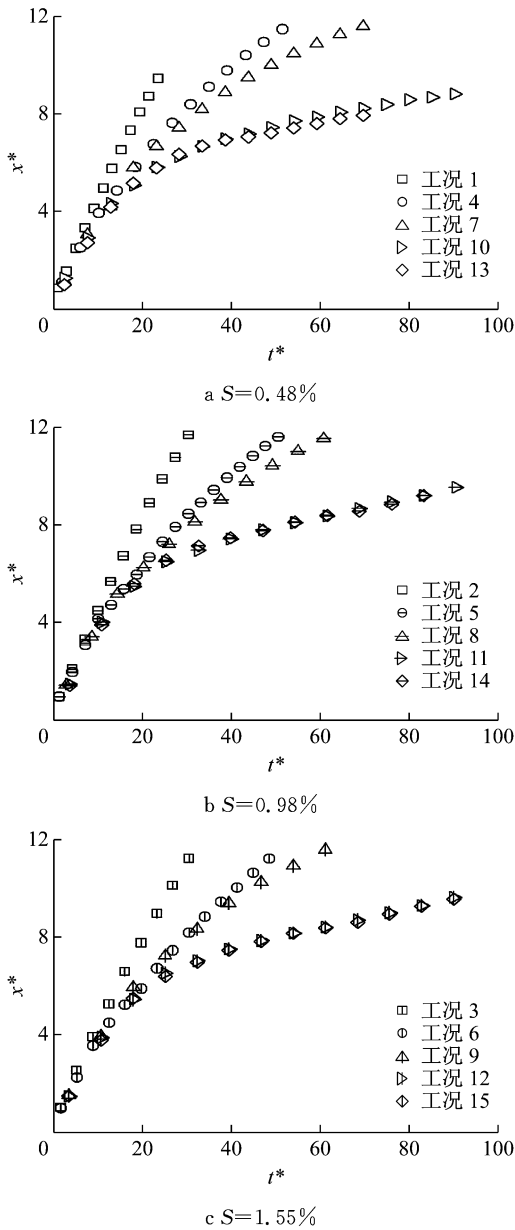


图 3 异重流头部位置随时间变化关系

Fig.3 Progression of front position of gravity currents with time

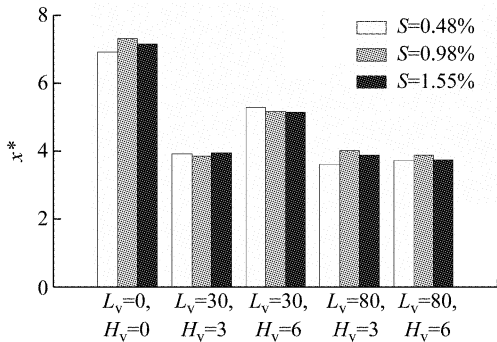


图 4 各工况异重流转化点的分布

Fig.4 Distribution of transform positions of gravity currents in various runs

2.3 头部速度

图 5 展示异重流量纲一化头部速度随量纲一化时间的变化关系 ($u^* = u/\sqrt{g'H}$). 由图 4a 可知, 对于工况 1, 异重流呈现先加速、后匀速、再减速的过程, 与 Soler 等^[10] 文中讲述开闸式异重流呈现先加速、后匀速、再减速的过程一致. 对于工况 4 和工况 7, 异重流在流入植被之前, 会呈现短暂的加速和匀速的过程, 而后异重流流入植被, 由于植被的阻挡效应, 头部速度迅速减小, 当异重流流出植被后继续向前运动, 头部速度缓慢线性减小. 对于工况 10 和工况 13, 异重流在流入植被之前仍呈现短暂的加速和

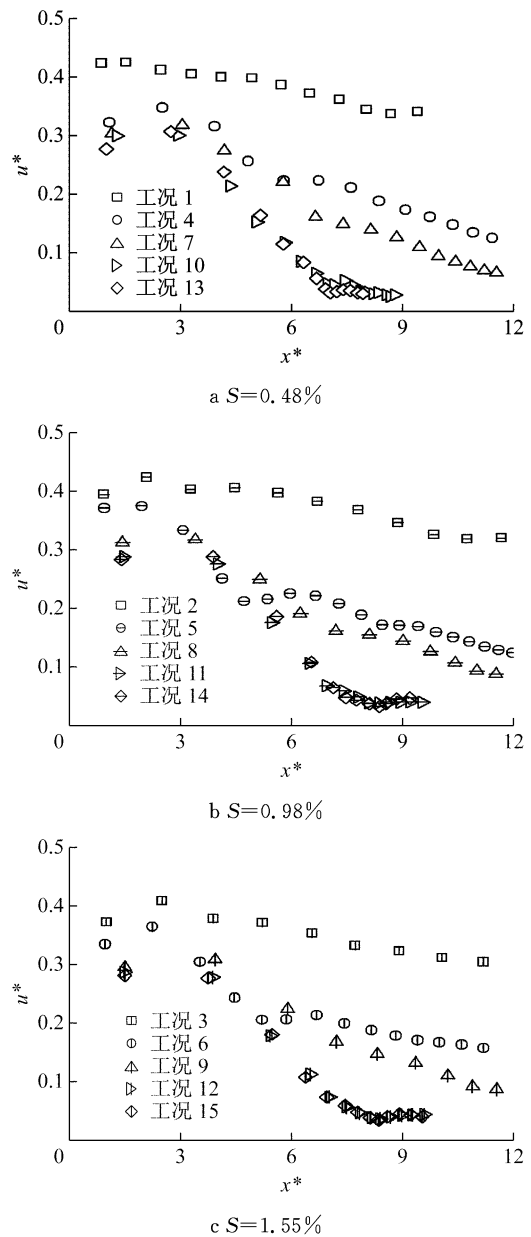


图 5 异重流头部速度随时间变化关系

Fig.5 Progression of front velocity of gravity currents with time

匀速过程,而后在植被区域长距离运动,头部速度迅速递减,异重流流出植被后以较小的速度向前运动。取 $x^* = 8$ 时异重流头部速度分析,工况 4、7、10 和 13 分别为工况 1 的 58.46%、40.26%、10.06%、8.68%。可以得知,植被长度和高度是影响异重流阻挡效应的 2 个因素,其中植被长度或高度越大,阻挡效应越显著,但是当植被长度或高度足够大成为影响阻挡效应的主导因素时,植被高度或长度变化对其阻挡效应影响不甚显著。由图 4b 和图 4c 可以得知,异重流浓度变化对其运动特性影响不甚显著,故对其运动特性分析不再赘述。

2.4 速度场和涡度场

图 6 展示不同浓度异重流流入植被前 2 s(a 系列)和流出植被后 4 s(b 系列)时的速度场和涡度场。对于 a 系列,描述 0.2 s(20 张平均)内的平均速度场和涡度场,可以得出异重流与环境水体掺混界面涡度值为正(产生开尔文-亥姆霍兹不稳定性)和斜压不

稳定性缘故),与水平底床界面涡度值为负(底床无滑移边界条件缘故),其中涡度正负代表方向,顺时针为正,逆时针为负^[11];并且异重流浓度越大,初始动能越大,运动速度越大,与环境水体掺混越剧烈,正涡度值越大,因底床为无滑移边界条件,负涡度值亦越大。对于 b 系列,由于植被的阻挡效应,异重流流出植被后仅剩小部分继续向前运动,且出流量与异重流浓度呈正相关,此时异重流不再保持典型轮廓而呈“长条形”(异重流高度保持在定值附近),头部高度仅为 2 cm,仅为异重流初始高度的 20%;异重流涡度分布仍然是上部涡度为正,下部涡度为负,只是最大值为约 3 s^{-1} ,是初始涡度最大值 6 s^{-1} 的 50%,可以认为此时异重流掺混和卷吸作用较弱,在底床阻力的作用下会趋于静止。综上分析,当植被阻挡效应较强时,异重流流经植被后大部分能量被耗散,头部高度和速度迅速减小,掺混和卷吸作用较弱,而后在底床阻力作用下停止运动。

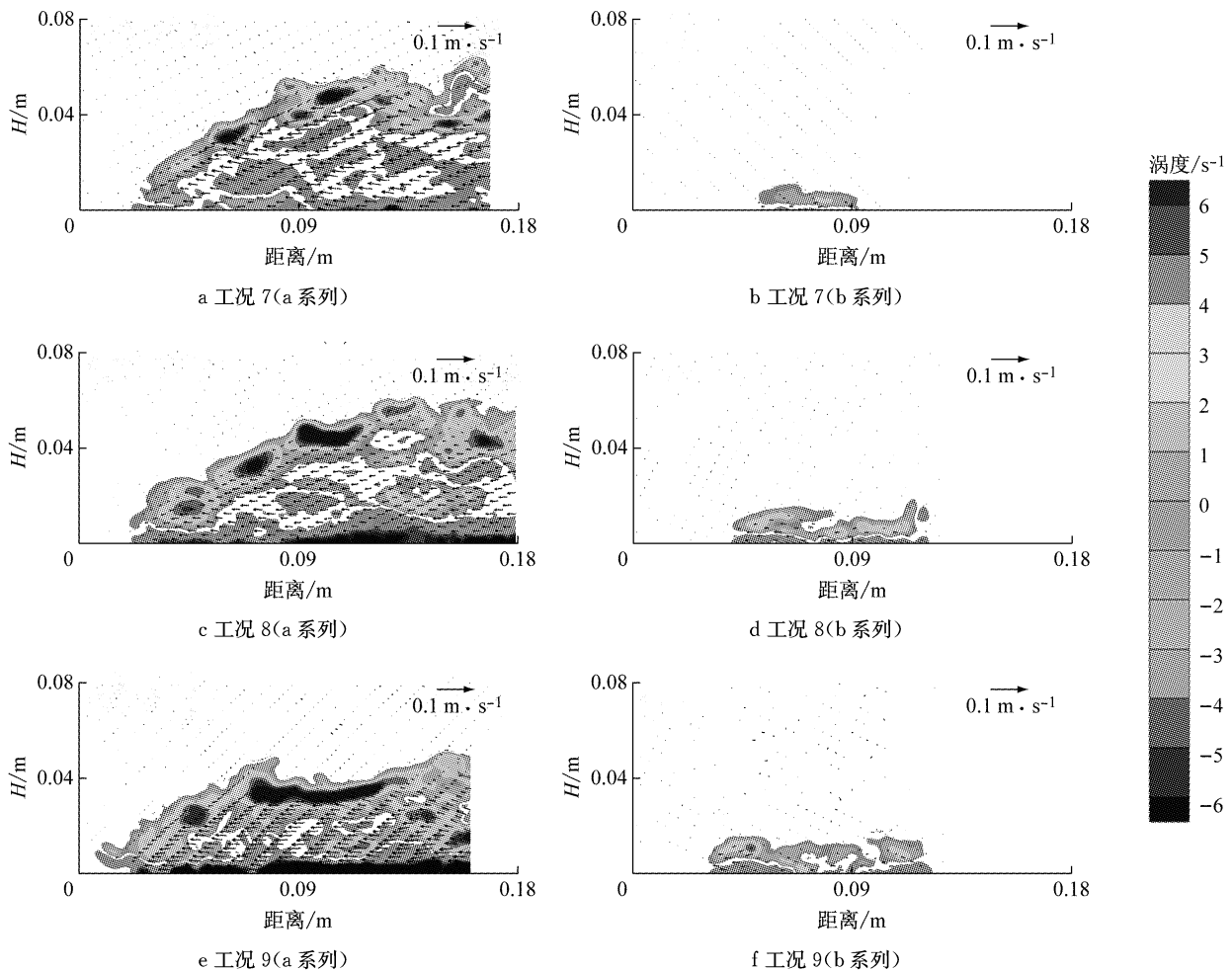


图 6 不同浓度异重流流入和流出植被的速度场和涡度场

Fig. 6 Velocity fields and vorticity fields for inflow and outflow of vegetation at different concentrations of gravity currents

3 结论

进行一系列开闸式异重流水槽试验,分析浸没式植被对不同浓度异重流运动的影响,主要结论如下:

(1) 异重流流经密度为 4.5% 的短植被(长度 30 cm),当植被高度为 3 cm 时,大部分异重流会被抬升至植被顶部向前运动,流经植被后依然保持典型轮廓;当植被高度为 6 cm 时,异重流在植被内部运动,掺混界面趋于平滑,而后保持“长条形”轮廓向前运动. 异重流流经长植被群(长度 80 cm),大部分异重流阻挡于植被后方,并且仅有少部分异重流流出植被后缓慢向前运动.

(2) 植被的长度和高度是影响其对异重流阻挡效应的 2 个因素,并且植被长度或高度越大,阻挡效应越强,但是当植被长度或高度成为影响阻挡效应的主导因素时,次要因素对其阻挡效应影响不甚显著.

(3) 异重流运动过程分为坍塌阶段和自相似阶段,植被的阻挡效应可以减小坍塌阶段向自相似阶段的转化的位置,迫使其更早进入自相似阶段,并且转化点与植被阻挡效应呈负相关,但与异重流浓度关系不显著.

(4) 异重流与环境水体掺混界面涡度值为正,与水平底床界面涡度值为负;在头部位置相同时,异重流浓度越大,正、负涡度值亦越大. 当植被的阻挡效应较强时,异重流流出植被后仅小部分继续向前运动,异重流掺混和卷吸作用较弱,且出流量与异重流浓度呈正相关.

参考文献:

[1] SIMPSON J E. Gravity currents in the environment and the

- laboratory[M]. [S.l.]: Cambridge University Press, 1997.
- [2] ZHANG H Y, WANG Z Y, XU W G, *et al.* Effects of rigid unsubmerged vegetation on flow field structure and turbulent kinetic energy of gradually varied flow[J]. *River Research and Applications*, 2015, 31(9): 1166.
- [3] SHI J Z, LI Y H, HUGHES J M R, *et al.* Hydrological characteristics of vegetated river flows: A laboratory flume study[J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2013, 58(5): 1047.
- [4] NAFTCHALI A K, KHOZEYMEHNZHAD H, AKBARPOUR A, *et al.* Experimental study on the effects of artificial vegetation density on forehead of saline current flow[J]. *Ain Shams Engineering*, 2016, 7(2): 799.
- [5] CENEDESE C, NOKES R, HYATT J. Lock-exchange gravity currents over rough bottoms [J]. *Environmental Fluid Mechanics*, 2016, 18(1): 59.
- [6] ZHOU J, CENEDESE C, WILLIAMS T, *et al.* On the propagation of gravity currents over and through a submerged array of circular cylinders[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2017, 83(1): 394.
- [7] SHIN J O, DALZIEL S B, LINDEN P F. Gravity currents produced by lock exchange[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2004, 521(521): 1.
- [8] 贺治国,林挺,赵亮,等. 异重流在层结与非层结水体中沿斜坡运动的试验研究[J]. *中国科学: 技术科学*, 2016, 46(6): 570.
- HE Zhiguo, LIN Ting, ZHAO Liang, *et al.* Experiments on gravity currents down a ramp in unstratified and linearly stratified salt water environments [J]. *Scientia Sinica Technologica*, 2016, 46(6): 570.
- [9] TANINO Y, NEPF H M, KULIS P S. Gravity currents in aquatic canopies[J]. *Water Resources Research*, 2005, 41(12): 1.
- [10] SOLER M, COLOMER J, SERRA T, *et al.* Sediment deposition from turbidity currents in simulated aquatic vegetation canopies[J]. *Sedimentology*, 2017, 64(4): 1132.
- [11] 彭明. 开闸式异重流的流动结构和颗粒输运的试验研究[D]. 北京: 北京大学, 2013.
- PENG Ming. Experimental study on flow structure and particle dispersion of lock-exchange gravity currents [D]. Beijing: Peking University, 2013.