

刚性植被对沿坡运动泥沙异重流动力 及湍流特性的影响*

王雨杭¹ 韩东睿¹ 吴挺峰² 林颖典¹

(1. 浙江大学海洋学院 舟山 316021; 2. 中国科学院南京地理与湖泊研究所 南京 210008)

摘要 开展一系列开闸式斜坡泥沙异重流水槽实验, 采用高速相机记录异重流发展过程, 并利用声学多普勒流速仪(acoustic doppler velocimeter, ADV)获取泥沙异重流的速度、浓度及湍流结构, 探究刚性植被对异重流运动特性的影响。实验结果表明: 随着植被高度的增大, 泥沙异重流的头部与尾部发生分离, 且植被高度对异重流头部速度削减作用的重要性大于植被密度; 受植被作用的影响, 异重流速度剖面的峰值位置和峰值大小均发生改变; 此外, 由于植被与异重流相互作用产生的湍流, 使异重流的泥沙浓度剖面发生改变, 并使悬浮于流体中的泥沙颗粒向上输运。本研究的结论对自然环境保护、水下工程建设等生产实际问题提供重要的科学依据。

关键词 泥沙异重流; 斜坡; 刚性植被; 湍流

中图分类号 TV145 **doi:** 10.11693/hyhz20201200340

异重流(gravity current)是指两种或两种以上不同密度流体相互接触时, 密度差异的存在, 使得其中一种流体能够沿着交界面流动, 且不与其他流体发生全局性混掺的运动现象(张瑞瑾, 2002)。当密度差异是由于重流体内悬浮的泥沙等颗粒物造成时, 该类异重流被称为泥沙异重流 (particle-laden gravity current), 又被称为浊流(turbidity current)(Ouillon *et al.*, 2019)。泥沙异重流是陆地、湖泊、海洋泥沙输移的主要动力, 也是深海沉积岩系统、海底峡谷的主要成因(唐武等, 2016)。

由于自然界中植被的广泛存在, 异重流在运动过程中很有可能会流经植被群(Ozan *et al.*, 2015), 且由于植被遮蔽作用使植被区内外产生温差, 在植被和非植被交界区域容易生成温差驱动的异重流(Lövstedt *et al.*, 2008)。而植被的存在不仅会改变流场的横向和纵向速度分布, 还会影响推移质输沙能力、水位水量关系、悬浮物沉积和挟带、悬浮物质的溶解

等(Liu *et al.*, 2008; Tanino *et al.*, 2009)。因此, 探究植被群落对泥沙异重流运动的影响不仅能为湖泊、河口、湿地及海洋区域的异重流研究提供科学依据, 同时也对自然环境保护、水下工程建设等生产实际具有指导意义。

目前已有许多学者围绕这一问题展开研究。Tanino 等(2005)对平坡开闸式盐水异重流流经非浸没式植被展开实验研究, 其结果表明随着植被阻力作用的增加, 异重流会逐渐从惯性主导阶段转变为阻力主导阶段, 与环境流体的交界面也从椭圆形界面转为三角形界面。Zhang 等(2008)进行了类似实验, 其结果表明随着植被阻力的增加, 进入植被的异重流流速和体积流量均呈下降趋势。Cenedese 等(2016)对异重流流经浸没式植被展开了研究, 发现异重流的掺混机制由于植被密度不同而发生改变, 在植被密度较低时, 异重流由于植被尾部的涡旋而加剧掺混; 而植被密度较高时, 掺混主要由上部的重流体与环境轻流体接触时

* 国家重点研发计划, 2017YFC0405205 号; 国家自然科学基金资助项目, 11672267 号, 41876089 号; 舟山市科技计划项目浙江大学海洋学院专项, 2018C81034 号; 浙江省自然科学基金资助项目, LY20A020009 号; 中央高校基本科研业务费专项资金, 2020QNA4038 号。王雨杭, 硕士研究生, E-mail: 21934126@zju.edu.cn

通信作者: 林颖典, 硕士生导师, 副教授, E-mail: kevinlin@zju.edu.cn

收稿日期: 2020-12-24, 收修改稿日期: 2021-02-27

的瑞利-泰勒不稳定性(Rayleigh-Taylor instability)造成。Zhou 等(2017)通过室内实验和大涡模拟(large eddy simulation)发现坍塌阶段异重流的头部速度随植被密度的增加先减小后增大。熊杰等(2020)利用粒子图像测速技术(particle image velocimetry, PIV)对异重流流经植被时的速度场和涡度场进行了分析。林颖典等(2019)研究了层结环境下植被对异重流运动的影响, 结果表明层结水体和植被对异重流掺混均有抑制作用, Zhou(2020)等通过数值模拟得到了类似的结论。

总的来讲, 目前关于植被对异重流动力特性影响的研究, 主要集中在盐水异重流和平坡条件下, 而对沿坡运动的泥沙异重流研究很少。而泥沙异重流是自然界中一种十分常见的异重流形式, 且现实中的异重流在运动过程中往往会流经具有某一倾角的斜坡底床(Meiburg *et al.*, 2010), 因此研究斜坡条件对泥沙异重流的影响是十分必要的。除此之外, 前人对这一问题的研究大多集中于异重流头部速度、头部角度、掺混机制, 流量等方面, 而对于植被区域内异重流的速度浓度结构研究较少, 且目前尚未有学者就植被对异重流湍流结构的影响展开研究, 因此本文就这方面研究的空缺进行补充。

1 材料与方法

1.1 实验装置及步骤

本文采用室内实验的方式探究刚性植被对沿坡运动泥沙异重流动力及湍流特性的影响, 实验在长 280 cm、高 46 cm、宽 15 cm 的有机玻璃水槽中进行(图 1), 水槽中设置一机械闸门, 其中闸门左侧放置清水, 水深保持为 $H=34$ cm, 右侧闸室长 19 cm, 放置由高岭土和水混合配置而成的重流体。闸室内的重流体水位与环境流体相同, 水深为 $h_0=9$ cm。高岭土中值粒径 $D_{50}=45$ μm , 且实验的所有组别均保持固定的泥沙浓度 $c=12$ g/L。为了可视化异重流的运动形态, 在重流体中添加了少量食用色素进行染色。

在闸门左侧设有一坡度 $\theta=9^\circ$ 的斜坡, 并在距离闸门口 38 cm, 即两个闸室长度处设置了长 $L_V=30$ cm 的植被区域, 异重流进入该区域时已处于稳定阶段。为了模拟自然界中植被, 本实验采用直径 $D=7$ mm 的刚性木质圆柱体进行简化, 植被区中的圆柱体采用随机排列形式。实验选用三种植被高度: $H_V=3, 6, 30$ cm, 对应植被高度与初始水深的比值 $\alpha=H_V/h_0$ 为 0.33, 0.66, 1.00 (当植被高度大于环境水深时, α 取

1.00), 以及三种植被密度: 单位面积内植被所占比例为 4.5%, 9%和 18%。

在植被区内部 20 cm 处利用声学多普勒流速仪(acoustic doppler velocimeter, ADV)进行三维速度数据的测量, ADV 采集频率为 25 Hz。由于 ADV 是利用声波量测探头下 5 cm 的取样体积内(sampling volume, 大约 0.09 cm^3)的流速, 如果植被距离取样体积太近, 则可能会影响 ADV 的数据质量, 从而影响测量数据的准确性, 因此本实验参照 Ikeda 等(1996)的方法在植被区内的测量点附近移除了少量植被。

每组实验开始前, 对闸室中的重流体进行充分搅拌以防止内部颗粒的沉降。实验开始时, 以固定的速率打开机械闸门, 右侧的重流体进入环境流体, 沿斜坡向下运动形成异重流, 并在水槽一侧利用高速相机进行拍摄, 相机采样频率为 30 Hz。后续通过实验图像获取异重流的头部位置、头部速度等参数。

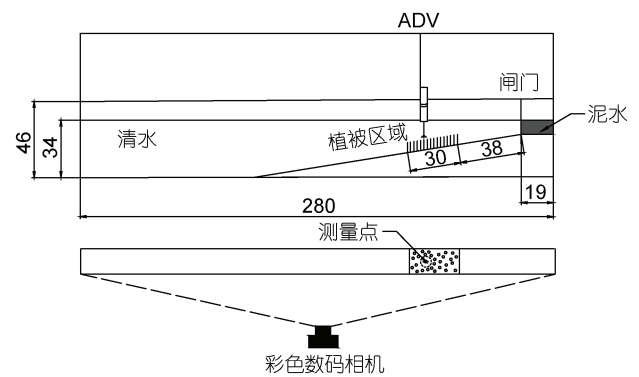


图 1 泥沙异重流实验装置示意图

Fig.1 Sketch of turbidity current experimental set-up
注: 单位为 cm; ADV: acoustic doppler velocimeter, 声学多普勒流速仪

1.2 特征参数及实验组别

为了描述流体之间的密度差异, 本文选用有效重力加速度 g' 作为特征参数, 定义为:

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

其中, $g=9.81$ m/s^2 为重力加速度; $\Delta\rho=\rho_1-\rho_0$ 为重流体和环境轻流体的密度差; ρ_0 为环境水体密度; ρ_1 为重流体密度。

异重流运动状态可由雷诺数(Re)和弗劳德数(Fr)表示, 其计算公式如下:

$$Re = \frac{Uh_0}{\nu}, \quad (2)$$

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{g'h_0}}, \quad (3)$$

其中, ν 为水的运动黏滞系数, 取值 $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$; U 为异重流从闸门口运动到斜坡底部的平均速度; h_0 为闸室内的重流体的初始水深。单位面积内植被所占比例 (solid plane fraction, SPF) F_{SP} 的计算公式如下:

$$F_{\text{SP}} = \frac{N\pi D^2}{4L_v W_v}, \quad (4)$$

其中, N 为植被数目; D 为植被直径; L_v 为植被区域长

度; W_v 为植被区域宽度。

表 1 为本实验的实验工况及相关参数, 每组实验工况重复 5 次, 测量 5 种高度, 分别距离底床 $z=7.5, 17.5, 27.5, 37.5, 47.5 \text{ mm}$ 。实验中所有工况的雷诺数均超过 1 000, 黏滞力对异重流运动的影响不显著 (Shin *et al*, 2004)。另外, 对头部位置、运动时间、头部速度等参数分别进行无量纲化处理:

表 1 实验工况及相关参数
Tab.1 Experimental cases and relevant parameters

工况编号	$L_v(\text{cm})$	α	$g'(\text{m/s}^2)$	$F_{\text{SP}}(\%)$	Re	Fr
N	0	0	0.118	0	3175	0.34
A1	30	0.33	0.118	4.5	2975	0.32
A2	30	0.33	0.118	9	2666	0.29
A3	30	0.33	0.118	18	2666	0.29
B1	30	0.66	0.118	4.5	3006	0.32
B2	30	0.66	0.118	9	2666	0.29
B3	30	0.66	0.118	18	2717	0.29
C1	30	1	0.118	4.5	3072	0.33
C2	30	1	0.118	9	2569	0.28
C3	30	1	0.118	18	2457	0.26

注: N 表示无植被工况, A, B, C 分别表示植被高度为 3, 6, 30 cm 工况; 1, 2, 3 分别表示植被密度为 4.5%, 9%, 18% 工况; L_v 为植被区域长度; g' 为有效重力加速度; F_{SP} 为单位面积内植被所占比例; α 为植被高度与初始水深的比值; Re 为雷诺数; Fr 为弗劳德数

$$x^* = \frac{x}{h_0}, \quad t^* = \frac{t}{t_c}, \quad u^* = \frac{u_h}{\sqrt{g'h_0}}, \quad (5)$$

其中, x 为异重流头部位置; t 为异重流运动时间;

$t_c = \frac{H}{\sqrt{g'h_0}}$ 为特征时间参数; u_h 为异重流头部速度。

1.3 数据处理方法

由于异重流属于非恒定流, 为了获得异重流的湍流特性, 本文依照 Zordan 等(2018)的方法采用移动平均法对 ADV 速度时间序列进行处理。数据处理时选用的时间窗口(time-window)依照 Baas 等(2005)的方法确定为 0.4 s(即 10 个数据), 在该长度的时间窗口下依旧能够保持速度特征的可分辨性, 而当时间窗口增大时, 所得平均流速会包含开闸式异重流的非恒定特性, 影响后续的湍流计算。为了排除异常测量值的干扰, 对信噪比(signal-to-noise ratio, SNR)小于 5 dB 和相关系数小于 70% 的数据予以舍弃 (Chanson *et al*, 2008), 并采用 Goring 等(2002)提出的相空间阈值法进行去毛刺处理(despiking)。

定义平行于水槽中心轴线的方向为 x 轴, 垂向方向为 y 轴, 横向为 z 轴, 取该时间窗口下的速度平均值, 可以得到三个方向上的时均速度 \bar{u} , \bar{v} , \bar{w} , 进而

对瞬时速度进行雷诺分解得到脉动流速 u' , v' , w' :

$$u = \bar{u} + u', \quad v = \bar{v} + v', \quad w = \bar{w} + w'. \quad (6)$$

通过脉动流速可以确定湍动能(turbulent kinetic energy, TKE) E_{TK} , 其计算公式如下:

$$E_{\text{TK}} = \frac{1}{2}(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}). \quad (7)$$

2 结果与讨论

2.1 实验现象

图 2 为泥沙异重流在无植被和不同高度植被工况下的形态变化过程。在异重流进入植被区域前, 各工况下异重流形态类似, 均形成一个典型的椭圆形头部(图 2)。当 $\alpha=0.33$ 时, 由于异重流的高度高于植被, 进入植被区域时与植被顶端发生剧烈的剪切作用, 使得异重流厚度明显增大(图 2b2)。穿过植被区域后, 异重流又重新形成规则的椭圆形头部。尾部的重流体一部分继续缓慢沿坡运动, 另一部分由于植被的阻碍和泥沙的沉降作用被滞留在植被区中(图 2b3), 但此时异重流的头部与尾部未发生明显的分离。而随着植被高度的增大, 离开植被区域后重新形成的头部规模逐渐减小, 且头部与尾部出现明显的分离现象。此外, 在植被的阻碍作用下, 重流体不仅

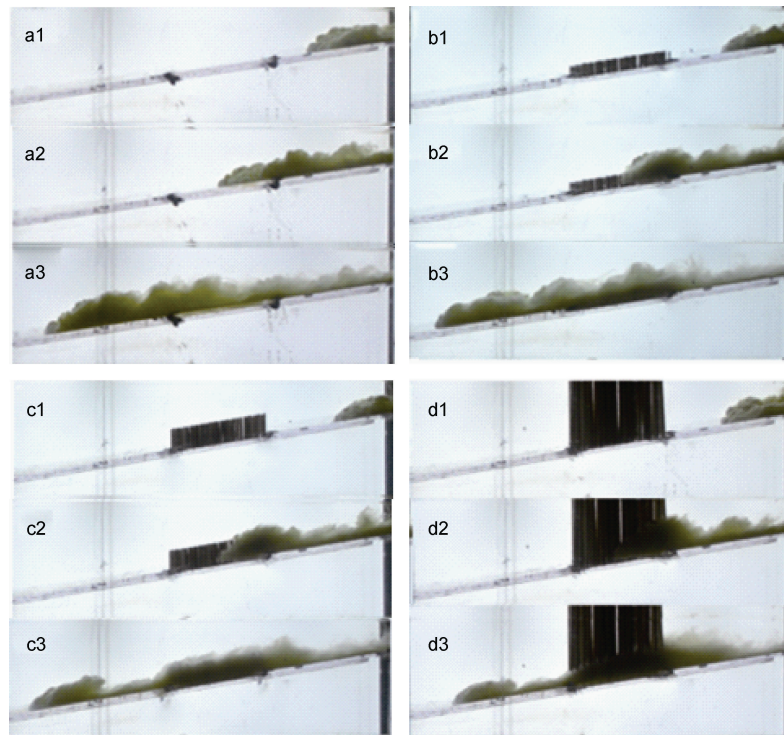


图2 不同植被高度下泥沙异重流形态变化

Fig.2 Variation in the form of turbidity current under different vegetation height
注: a1— a3 表示工况 N; b1— b3 表示工况 A2; c1— c3 表示工况 B2; d1— d3 表示工况 C2

会滞留在植被区内, 还有一部分滞留在了植被区后方, 且有部分泥沙颗粒脱离异重流被带入到环境流体中(图 2c3, d3)。

图 3 为泥沙异重流流经植被群后的沉积情况, 由图可知, 由于植被的阻碍作用导致异重流的滞留, 植被群上游的沉积量要明显高于下游(图 3a)。图 3b 为植被区域内部的沉积情况, 就单株植被而言, 沉积区域主要集中在茎干的两侧以及上游部分, 而茎干下游部分的沉积量较小, 这是因为异重流在流经植被时发生绕流, 在单株植被的下游出现一个流量较小区域(图 3c), 从而使得该区域的沉积量减小。

2.2 头部速度

图 4 为异重流在不同植被高度和密度下头部速度随运动距离的变化曲线。在无植被条件下, 异重流经过初始的加速后进入相对匀速阶段, 并在该阶段与异重流侵入环境流体后产生的内波相互作用(Snow *et al.*, 2014), 导致头部速度不断波动(图 4a)。

存在植被工况下, 异重流进入植被区后, 头部速度受到植被的阻碍作用先迅速下降, 随后经历一个短暂的自加速阶段后, 重新进入减速阶段(图 4a, b)。并且在植被区域内, 植被高度对头部速度削减作用的重要性要大于植被密度。

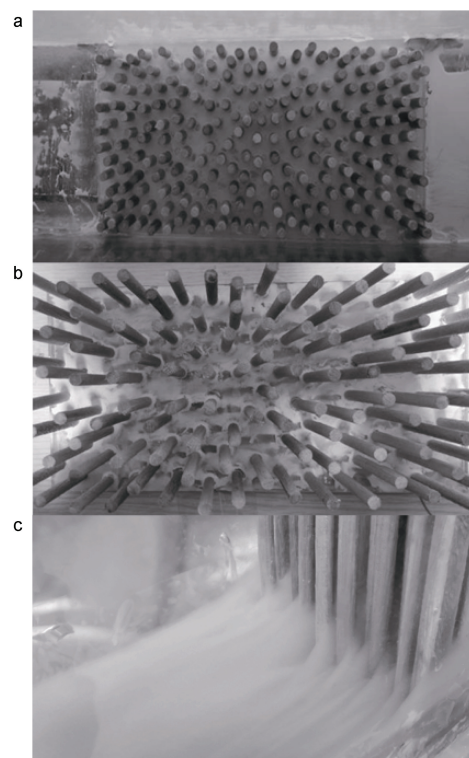


图3 泥沙异重流沉积情况

Fig.3 The deposition patterns of turbidity current
注: a 表示整体沉积情况(工况 A3); b 表示植被区内沉积情况(工况 B3); c 表示局部流场情况(工况 C3)

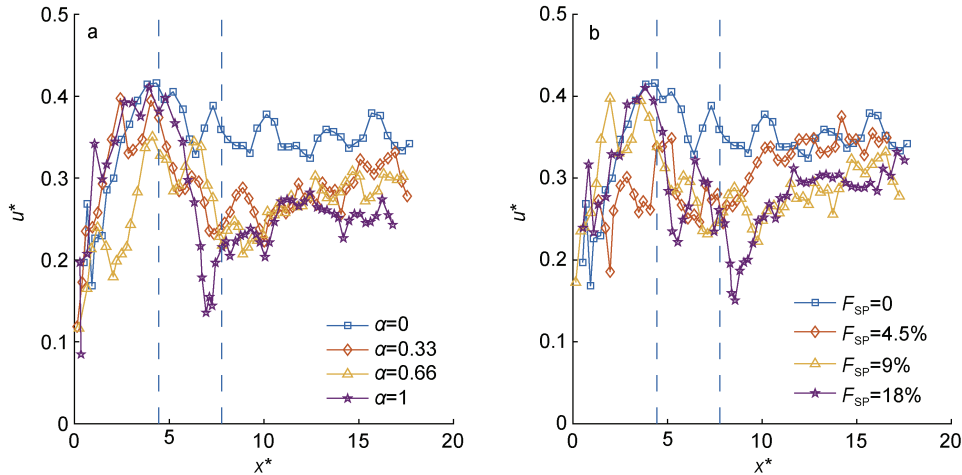


图4 不同植被高度和密度下头部速度和头部位置时间变化过程

Fig.4 Temporal variations of head velocity and head position under a different vegetation height and density

注: a 表示工况 N, A2, B2, C2; b 表示工况 N, A1, A2, A3; 虚线之间区域代表植被区; x*表示无量纲化头部位置; u*表示无量纲化头部速度

异重流流出植被区后, 由于形成新的头部再次进入加速阶段, 且随着植被高度的增加, 加速时间越短, 加速后的头部速度越小。而随着植被密度的增大, 在 $F_{SP}=4.5\%$ 时, 头部速度能恢复到与无植被工况基本一致, 而 $F_{SP}=9\%$ 和 $F_{SP}=18\%$ 时头部速度要明显小于无植被工况, 但两者间相差不大。在植被区域外, 植被高度对头部速度削减作用的重要性依旧要大于植被密度, 且植被密度与头部速度并不呈单调关系, 该实验结果与 Zhou 等(2017)的数值模拟结果一致。

结合实验结果, 植被的存在对泥沙异重流头部速度具有削减作用, 其中一个重要原因就是由于植被的阻碍作用使得一部分泥沙滞留在了植被区内部和后方, 导致流出植被区的异重流密度减小, 从而降

低了其头部速度。

2.3 速度剖面

图 5 为相同时刻异重流头部和尾部在不同植被高度下的平均速度剖面, 其中头部区域和尾部区域的速度均采用 8 s 的测量数据进行平均(下文相同)。在无植被工况下, 异重流速度剖面呈单峰分布, 并以该峰值为界, 将异重流分为射流区与壁面区 (Varjavand *et al*, 2015)。

存在植被工况下, 异重流头部速度剖面依旧呈单峰分布, 但随着植被高度的减小, 该峰值位置逐渐“抬升”。峰值大小相较于无植被工况明显减小, 但植被高度对峰值大小的影响不显著。此外, 植被的存在使得异重流头部的整体速度分布趋向均匀(图 5a)。

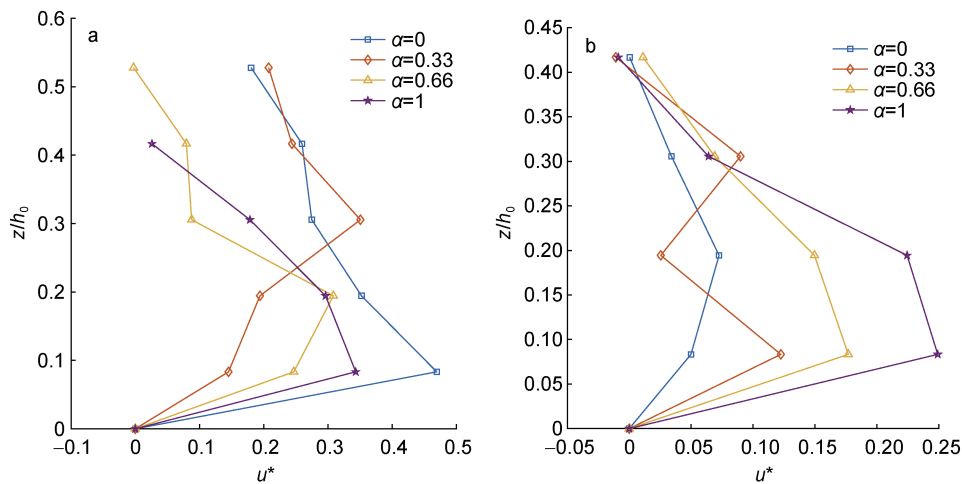


图5 工况 N, A2, B2, C2 泥沙异重流速度剖面

Fig.5 Velocity profiles of turbidity current

注: z/h0 表示测量高度与初始水深的比值; a 表示异重流头部; b 表示异重流尾部

异重流尾部速度剖面, 在 $\alpha=0.33$ 工况下, 由于植被分为植被上方运动与植被内部运动两部分, 剖面形态呈现双峰分布; 而其余工况下依旧保持单峰分布, 峰值位置相比于无植被工况有所“下降”。随着植被高度的增加, 峰值大小逐渐增大。且植被的存在使得异重流尾部的整体速度分布趋向发散(图 5b)。

2.4 浓度剖面

在一定浓度范围内, ADV 采样体积内小颗粒反向散射的声信号强度 I 与泥沙浓度 c 成线性关系, 因此可以通过 ADV 测量得到的信号振幅, 反演得到异重流的泥沙浓度(Hosseini *et al.*, 2006; 李文杰等, 2014)。本实验通过在固定体积清水中加入不同质量的泥沙, 计算得到泥沙浓度, 并在混合泥水中用 ADV 进行测量, 得到各个泥沙浓度下的声信号强度, 最终拟合得到两者的关系式:

$$c=0.369I_a - 19.14, \quad (8)$$

式中, c 的单位为 g/L , 关系式拟合的相关系数为 0.85。其中声信号强度 $I_a=10^{0.043 4S_1}+10^{0.043 4S_2}+10^{0.0434 S_3}$, S_1 、 S_2 和 S_3 分别为 ADV 三个接收器获得的信号振幅。

利用该关系式, 可反演得到异重流头部不同点的泥沙浓度, 结合后即可得头部区域的泥沙浓度(图 6)。结果表明, 在无植被工况下, 泥沙浓度从底床向上大致呈逐渐减小趋势。存在植被工况下, 靠近底床处的泥沙浓度均减小, 而远离底床处的局部泥沙浓度有所增加。对比浸没式与非浸没式植被工况, 在 $\alpha=0.33$ 工况下, 相较于无植被工况, 异重流上交界面处的泥沙浓度明显增大。而在非浸没式植被工况下, 异重流中部的局部泥沙浓度显著增加。因此, 植被的存在导致了泥沙异重流的泥沙浓度重分布, 且趋向于将悬浮于流体中的泥沙颗粒向上输运。

2.5 湍动能剖面

图 7 为不同植被高度工况下, 异重流头部区域的平均相对湍动能剖面, 其中湍动能采用剖面速度最大值的平方 U_{max}^2 进行无量纲化处理。由图可知, 在无植被工况下, 自底床向上湍动能先增大后减小, 随后在上交界面处达到最大值, 这是因为该处靠近异重流的上边界层, 受上边界层的 Kelvin-Helmholtz 涡影响, 导致湍流强度增大。

存在植被的工况下, 由于异重流流过植被群时, 会在植被的尾部产生茎干尺度的湍流结构(Nepf *et al.*, 2000), 该结构使得靠近底床处各工况的相对湍动能均有所增加, 表明该处的湍流增强, 而较强的湍流使得该位置处的泥沙向上输运, 从而导致了上文中底

床附近泥沙浓度减小的现象。而相比于浸没式植被工况, 非浸没植工况下的异重流由于整体厚度减小, 且上交界面的 Kelvin-Helmholtz 涡受到抑制, 受该机制的影响作用更强, 因此异重流中部的局部泥沙浓度相较于无植被工况显著增加(图 6)。而脱离底床区域, 当 $\alpha=0.33$ 时, 受植被顶端与异重流剪切作用产生的涡旋影响, 其相对湍动能与无植被工况相比均明显增大, 同样由于该较强的湍流作用使得更多的泥沙被输运至上交界面(图 6)。而在 $\alpha=0.66$ 和 $\alpha=1$ 工况下, 由于植被与异重流的纵向剪切作用较弱, 此时植被对湍流的抑制占据主导作用, 使得相对湍动能有所减小, 从而减弱了异重流与环境流体的物质交换, 阻碍了泥沙的进一步向上输运。因此, 植被高度与异重

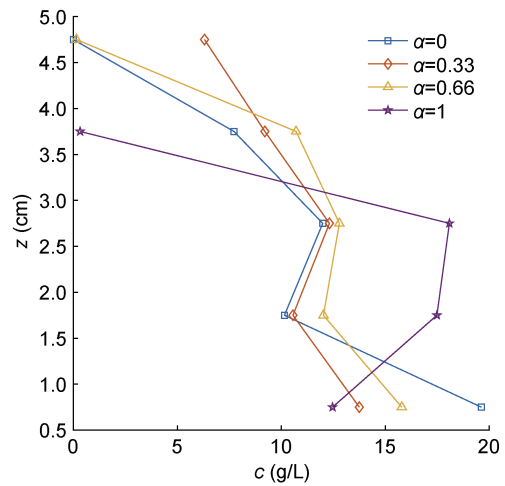


图 6 工况 N, A2, B2, C2 泥沙异重流浓度剖面
Fig.6 The concentration profile of turbidity current
注: z 表示测量高度; c 表示泥沙浓度

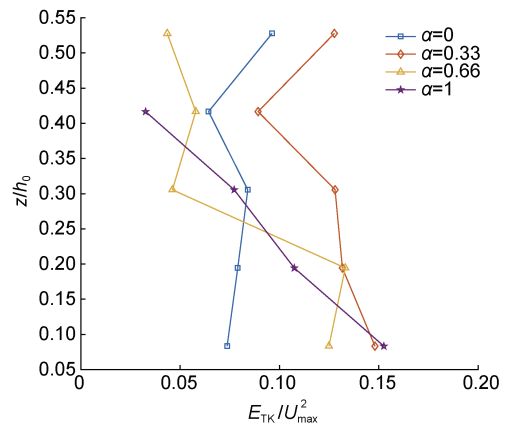


图 7 工况 N, A2, B2, C2 泥沙异重流湍动能剖面
Fig.7 Profile of the turbulent kinetic energy of turbidity current
注: z/h_0 表示测量高度与初始水深的比值; E_{TK} 表示湍动能;
 U_{max}^2 表示剖面速度最大值

流厚度的相对大小是决定泥沙异重流湍流生成和泥沙运输的主导因素。

2.6 湍流猝发现象

极端的湍流猝发(Turbulent bursting)现象决定了流场中的动量与物质交换,且对底床的泥沙再悬浮及流场中的泥沙浓度变化起着主导作用(Yuan *et al.*, 2009; Thompson *et al.*, 2013)。根据纵向和垂向脉动流速方向的不同,可以将湍流猝发过程分为四种类型(Mohajeri *et al.*, 2016):

1) $u' > 0, w' > 0, u'w' > 0$ (Q1): 外相互作用(outward interaction);

2) $u' < 0, w' > 0, u'w' < 0$ (Q2): 低速流体上抛(ejection);

3) $u' < 0, w' < 0, u'w' > 0$ (Q3): 内相互作用(inward interaction);

4) $u' > 0, w' < 0, u'w' < 0$ (Q4): 高速流体下扫(sweep)。

各类猝发现象对雷诺应力的贡献值可定义为

$$S = \frac{\int_0^T X_q |u'w'| dt}{u'w'_{(total)}}, \quad (9)$$

其中指标函数 X_q 定义为

$$X_q = \begin{cases} 1, & |u'w'| \geq \sqrt{u'^2} \cdot \sqrt{w'^2} \\ 0, & |u'w'| < \sqrt{u'^2} \cdot \sqrt{w'^2} \end{cases}. \quad (10)$$

图 8 为不同工况下距离底床 7.5 mm 处四种猝发类型占比及其对雷诺应力的贡献占比。在无植被工况下,四种猝发类型(ejection, sweep, inward, outward)在时间序列中分别占比 4.2%, 2.7%, 7.0%, 7.3%, 但其对雷诺应力的贡献值可达 11.0%, 7.1%, 21.6%, 25.4% (图 8a, 8b), 该结果表明极端的猝发现象是流场中雷诺应力的主要来源。存在植被工况下, ejection 和 sweep 猝发类型的占比及其对雷诺应力的贡献明显下降, 而 inward 和 outward 的占比及其对雷诺应力的贡献明显增加, 而植被高度的影响不大。Nelson 等(1995)的研究表明随着底床粗糙度的增加, ejection 和 sweep 对雷诺应力的贡献会逐渐降低, inward 和 outward 对雷诺应力的贡献会逐渐升高, 与本实验现象相一致, 由此可以推断该结果是由于植被的存在增加了底床糙率导致的。

此外, ejection 与流场中悬浮颗粒的运输密切相关, 且 ejection 的发生会增加局部泥沙浓度(Cellino *et al.*, 2004; Noguchi *et al.*, 2009)。因此可以推断植被使得近床附近 ejection 发生比例的减小, 也是导致底床附近泥沙浓度减小的原因之一。

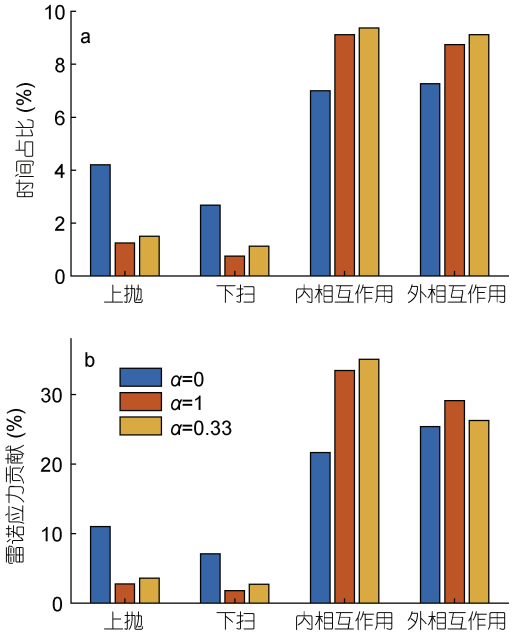


图 8 工况 N, A2, C2 各猝发类型在时间序列中占比(a)以及对雷诺应力的贡献值(b)

Fig. 8 The proportion of each burst type in the time series (a) and the contribution of each burst type to Reynolds stress (b)

3 结论

本文通过室内水槽实验, 探究了刚性植被对沿坡运动泥沙异重流动力及湍流特性的影响, 主要结论如下:

(1) 植被高度较小时, 异重流与植被顶端的剪切作用会加剧其与环境水体的掺混, 使得异重流厚度增加。随着植被高度的增大, 异重流的头部与尾部发生分离。

(2) 植被会加剧异重流在植被区上游的泥沙沉积, 在植被区内部, 沉积主要集中在茎干的两侧及上游, 而茎干下游的沉积量较小。

(3) 在植被区域内外, 植被高度对头部速度削减作用的重要性均大于植被密度。植被密度与头部速度并不呈单调关系。

(4) 植被使得异重流头部速度剖面峰值远离底床, 峰值大小降低, 整体的速度分布趋向均匀; 异重流尾部速度剖面峰值接近底床, 峰值大小增加, 整体的速度分布趋向发散。

(5) 植被的存在导致了泥沙异重流的泥沙浓度重分布, 且趋向于将悬浮于流体中的泥沙颗粒向上输运。

(6) 靠近底床处, 植被使得异重流的相对湍动能增大。远离底床处, 植被高度与异重流厚度的相对大小

是决定泥沙异重流湍流生成和泥沙输运的主导因素。

(7) 植被的存在降低了湍流猝发现象中流体上抛(ejection)和下扫(sweep)的占比及其对雷诺应力的贡献值, 增大了内相互作用(inward)和外相互作用(outward)的占比及其对雷诺应力的贡献值。

本文探究了刚性植被对沿坡运动泥沙异重流动力及湍流特性的影响, 但是实验中仅考虑了一种泥沙粒径, 后续会通过选用不同的泥沙粒径, 进一步探究泥沙粒径对异重流运动特性的影响。

参 考 文 献

- 李文杰, 张帅帅, 杨胜发等, 2014. 利用 ADV 测量细颗粒泥沙浓度的试验研究. 水力发电学报, 33(4): 98—104
- 张瑞瑾, 2002. 河流泥沙动力学. 北京: 中国水利水电出版社, 211
- 林颖典, 刘雅钰, 袁野平, 2019. 在层结和非层结环境下植被群对异重流运动的影响. 吉林大学学报(地球科学版), 49(6): 1714—1722
- 唐 武, 王英民, 仲米虹等, 2016. 异重流研究进展综述. 海相油气地质, 21(2): 47—56
- 熊 杰, 袁野平, 林颖典, 2020. 浸没及非浸没刚性短植被群对异重流运动特性的影响. 上海交通大学学报, 54(3): 285—294
- Baas J H, McCaffrey W D, Haughton P D W *et al*, 2005. Coupling between suspended sediment distribution and turbulence structure in a laboratory turbidity current. *Journal of Geophysical Research*, 110(C11): C11015
- Cellino M, Lemmin U, 2004. Influence of coherent flow structures on the dynamics of suspended sediment transport in open-channel flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, 130(11): 1077—1088
- Cenedese C, Nokes R, Hyatt J, 2016. Lock-exchange gravity currents over rough bottoms. *Environmental Fluid Mechanics*, 18(1): 59—73
- Chanson H, Trevethan M, Aoki S I, 2008. Acoustic Doppler velocimetry (ADV) in small estuary: field experience and signal post-processing. *Flow Measurement and Instrumentation*, 19(5): 307—313
- Goring D G, Nikora V I, 2002. Despiking acoustic Doppler velocimeter data. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(1): 117—126
- Hosseini S A, Shamsai A, Ataie-Ashtiani B, 2006. Synchronous measurements of the velocity and concentration in low density turbidity currents using an Acoustic Doppler Velocimeter. *Flow Measurement and Instrumentation*, 17(1): 59—68
- Ikeda S, Kanazawa M, 1996. Three-dimensional organized vortices above flexible water plants. *Journal of Hydraulic Engineering*, 122(11): 634—640
- Liu D, Diplas P, Fairbanks J D *et al*, 2008. An experimental study of flow through rigid vegetation. *Journal of Geophysical Research*, 113(F4): F04015
- Lövstedt C B, Bengtsson L, 2008. Density - driven current between reed belts and open water in a shallow lake. *Water Resources Research*, 44(10): W10413
- Meiburg E, Kneller B, 2010. Turbidity currents and their deposits. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 42(1): 135—156
- Mohajeri S H, Righetti M, Wharton G *et al*, 2016. On the structure of turbulent gravel bed flow: implications for sediment transport. *Advances in Water Resources*, 92: 90—104
- Nelson J M, Shreve R L, McLean S R *et al*, 1995. Role of near-bed turbulence structure in bed load transport and bed form mechanics. *Water Resources Research*, 31(8): 2071—2086
- Nepf H M, Vivoni E R, 2000. Flow structure in depth-limited, vegetated flow. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 105(C12): 28547—28557
- Noguchi K, Nezu I, 2009. Particle-turbulence interaction and local particle concentration in sediment-laden open-channel flows. *Journal of Hydro-Environment Research*, 3(2): 54—68
- Ouillon R, Meiburg E, Sutherland B R, 2019. Turbidity currents propagating down a slope into a stratified saline ambient fluid. *Environmental Fluid Mechanics*, 19(5): 1143—1166
- Ozan A Y, Constantinescu G, Hogg A J, 2015. Lock-exchange gravity currents propagating in a channel containing an array of obstacles. *Journal of Fluid Mechanics*, 765: 544—575
- Shin J O, Dalziel S B, Linden P F, 2004. Gravity currents produced by lock exchange. *Journal of Fluid Mechanics*, 521: 1—34
- Snow K, Sutherland B R, 2014. Particle-laden flow down a slope in uniform stratification. *Journal of Fluid Mechanics*, 755: 251—273
- Tanino Y, Nepf H M, 2009. Closure to “Laboratory investigation of mean drag in a random array of rigid, emergent cylinders” by Yukie Tanino and Heidi M. Nepf. *Journal of Hydraulic Engineering*, 135(8): 693—694
- Tanino Y, Nepf H M, Kulis P S, 2005. Gravity currents in aquatic canopies. *Water Resources Research*, 41(12): W12402
- Thompson C E L, Kassem H, Williams J, 2013. Nearshore sediment resuspension and bed morphology. *Journal of Coastal Research*, 65(sp2): 1593—1598
- Varjavand P, Ghomeshi M, Dalir A H *et al*, 2015. Experimental observation of saline underflows and turbidity currents, flowing over rough beds. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 42(11): 834—844
- Yuan Y, Wei H, Zhao L *et al*, 2009. Implications of intermittent turbulent bursts for sediment resuspension in a coastal bottom boundary layer: a field study in the western Yellow Sea, China. *Marine Geology*, 263(1—4): 87—96
- Zhang X Y, Nepf H M, 2008. Density-driven exchange flow between open water and an aquatic canopy. *Water Resources Research*, 44(8): W08417
- Zhou J, Cenedese C, Williams T *et al*, 2017. On the propagation of gravity currents over and through a submerged array of circular cylinders. *Journal of Fluid Mechanics*, 831: 394—417

Zhou J, Venayagamoorthy S K, 2020. Impact of ambient stable stratification on gravity currents propagating over a submerged canopy. *Journal of Fluid Mechanics*, 898: A15

Zordan J, Juez C, Schleiss A J *et al*, 2018. Entrainment, transport and deposition of sediment by saline gravity currents. *Advances in Water Resources*, 115: 17—32

EFFECT OF RIGID VEGETATION ON DYNAMICS AND TURBULENCE OF SEDIMENT GRAVITY FLOW DOWNSLOPE

WANG Yu-Hang¹, HAN Dong-Rui¹, WU Ting-Feng², LIN Ying-Dian¹

(1. *Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan 316021, China*; 2. *State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China*)

Abstract A series of flume experiments were conducted to simulate gravity currents on sluice-opening downslope. The development course of particle-laden gravity currents was videoed with a high-speed camera, in which the velocity, concentration, and turbulence structures of turbidity currents were acquired using acoustic Doppler velocimeter (ADV) to understand the dynamics of particle-laden gravity currents under the effects of rigid vegetation. Results show that with the increase of vegetation height, the head and tail of particle-laden gravity currents were separated, and the vegetation height was more effect than the vegetation density on reducing the front velocity. Due to the presence of vegetation, both the peak velocity and the corresponding position shown in the velocity profile changed. In addition, the turbulence caused by the interaction between vegetation and gravity currents changed the sediment concentration profile and underpinned the suspended sediment particles upward. The findings of this study provide a significant scientific basis for solving engineering issues relative to natural environment protection and underwater engineering construction.

Key words particle-laden gravity currents; downslope; rigid vegetation; turbulence