

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2017.06.18

出水口位置对异重流运动及泥沙分布的影响

解岳, 李璇, 孙昕

(西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要:在实验室小环境下模拟大型水库及水库的分层环境,在水库温度分层条件下进行异重流实验,研究不同出水口位置条件下由水温分层引起的间层流现象,并探究分层环境下,出水口不同位置水库异重流运动的普遍规律及泥沙分布特性。结果表明:当入流泥沙浓度确定,出水口分别位于上、中、下层时,异重流的厚度、分离点深度、水跃高度和行进时间等参数数值差异较小;当入流泥沙浓度确定,上层出水口形成的间层流厚度基本沿程不变,中、下层出水口的间层流会因卷吸作用而卷吸周围清水导致间层流厚度局部增加;出水口位置确定,入流泥沙浓度基本不影响排沙比;入流泥沙浓度确定,上层出水口的排沙比远远大于中层和下层的排沙比。

关键词:间层异重流;分层水库;出水口位置;泥沙浓度;排沙比

中图分类号:X524

文献标志码:A

文章编号:1004-6933(2017)06-0114-07

Influence of different outlet positions on density currents movements and sediment distributions

XIE Yue, LI Xuan, SUN Xin

(School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of
Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: The large reservoir and its stratified water environment could be simulated in a small laboratory environment. The density currents experiments were carried out under the condition of reservoir temperature stratification. The phenomenon of laminar density currents caused by water temperature stratification under different outlet positions was studied. Besides, exploration has been done about the universal law of the density currents movement and the sediment distribution characteristics in the stratified environment. As it turned out, when the influent sediment concentration was determined and the outlet position was located at the upper, middle and lower levels respectively, the parameters' numerical difference was small in terms of the thickness of the density current, the depth of the separation point, the hydraulic jump height and the travel time. When the sediment concentration was determined, the thickness of the laminar density currents was almost constant along the way in the upper outlet position; and the thickness of the same would increase partially due to the sucking effect from clear water in the middle and bottom outlet positions. When the water outlet position was set unchanged, the influent sediment concentration basically did not affect sedimentation ratio. When the sediment concentration was determined, the sedimentation ratio at the upper outlet position was much larger than that at the middle and bottom outlet positions.

Key words: laminar density currents; stratified reservoir; outlet position; sediment concentration; sediment discharge ratio

基金项目:国家自然科学基金(51278404);陕西省科技统筹创新工程计划项目(2015KTCL-03-15)

作者简介:解岳(1971—),男,副教授,博士,主要从事水处理、景观水质控制技术及水污染控制理论与技术研究。E-mail: xieyue@xauat.edu.cn

通信作者:孙昕,教授。E-mail: xinsunn@163.com

1 研究背景

异重流是重力作用于两种或两种以上具有不同密度的流体所产生的流动^[1],密度的差异可由含沙量、水温、盐度等单因素或多因素共同造成。泥沙异重流是造成夏季水库水温成混合型的主要原因,研究泥沙异重流的影响有助于预测多沙河流上水库水温的变化规律。异重流是当前国际沉积学的热点话题之一^[2],在国内,河口海岸动力研究者和水利学家们陆续开展了异重流的相关研究^[3-4]。Kassem等^[5]首次数字模拟出了从上游自由流体到潜入水体最终形成异重流的全过程。但目前关于不同出水口位置对异重流特性和排沙量影响的研究还较少。笔者对模型水库温度分层条件及出水口位置不同条件下间层异重流的形式及排沙量的影响进行探究,旨在为异重流主要存在区域、潜在的内源污染及较好的排沙效果确定适宜出水口位置。

泥沙异重流在运动过程中,会受到密度分层交界面处和(或)水库底部壁面的阻力,同时还受水体水温分层的影响,其密度也因泥沙沉降和交界面处的局部混掺而变化,这些因素使异重流的演变非常复杂^[6-9],浑水形成也随之复杂化。泥沙异重流有时会持续运动到水库出口,有时会搁浅库中,有时也会充满整个水库。异重流具有一定的挟沙能力,泥沙在异重流运动过程中会发生移流传输、扩散和沉积,泥沙组成及浓度的不同会使泥沙的流体性质发生根本改变。与温度均一的水库不同,分层水库中异重流在运动过程中常出现从底坡分离而侵入水库中层的现象,这种现象被称为间层流,间层流经常以清水水库中“夹心”浑水层的形式出现。由于温度差异所造成的密度差异有限,且温控(加温、保温)较困难,因此在实验室的小尺度水体下模拟相对大尺度水库的稳定温度分层环境并对分层强度进行控制一直都是难题,而且对不同出口位置异重流的特性的研究鲜少。本文通过设计底部空调制冷系统模拟水库的温度分层环境,在水库分层强度下进行异重流试验,在不同出水口位置条件下重点观测由水温分层引起的间层流现象,并探究分层环境下,出水口位置不同,水库异重流运动的普遍规律。

2 实验装置及步骤

2.1 分层水库模型

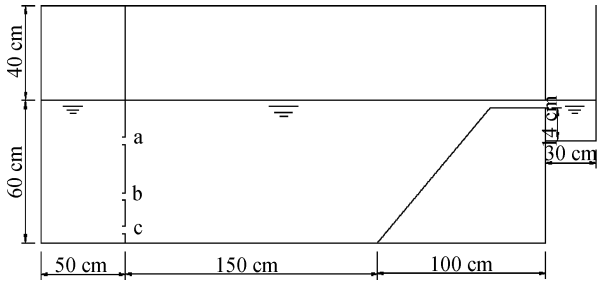
分层模型水库由透明有机玻璃制成(图1),以便于观测实验过程中异重流的发生、发展过程。模型水库主要分为3段,进水区0.3 m,水库模型区2.5 m,出水区0.5 m(底部设置排水口以保证在实验

过程中保持水位0.6 m不变),水库总宽度0.6 m,总高度1.0 m。主库区包括入口平坡部分、斜坡部分和水库模型池,在模型池区底部每隔10 cm设置了两层空调蒸发器铜管。铜管的目的是对底部20 cm的水体进行制冷并在试验开始前保持水温恒定在5℃,水池表层水利用自然传热,以此使整个水体形成稳定的水温分层。在出水区与模型池中间设置隔板,在隔板上分别开3个出水口,距离池底的高度分别为38.5 cm、18 cm和4 cm。出水口的尺寸均为3 cm×60 cm。

2.2 材料与方法

本实验采用的是270目(相当于粒径0.05 mm)的石英砂,配置成浓度分别为1 250 mg/L、3 750 mg/L、7 500 mg/L的泥沙溶液。进水水箱容积大约为800 L,内置搅拌泥沙的搅拌机。采用一台单相自吸泵,主要是对进水加压以保证进水管满流;采用电磁流量计测量入流流量。

实验时5个人分别在5个断面利用垂向同时多点取样系统取样,5个断面分别距离出水口断面0、0.5、1.0、1.5、1.8 m,取样水深间隔0.05 m。实验开始后,取样时间为泥沙溶液进入进水区后的5、10、20、30、40、50 min。取样结束后使用WGZ—2000A浊度计测量浊度,再利用浓度-浊度转化曲线将测量的浊度转化为浓度,以便计算含沙量。水温使用1台30通道TYPEK数显测温仪(台湾群特CENTER 309型)进行测量。将测温仪探头沿垂向每隔5 cm分布1个,共30个探头。分别在0、1.0 m断面布置12个探头,在1.8 m断面布置8个探头。实验过程中,采用SONY HDR—PJ660E摄像机(最大像素543万,帧宽度是1 440,帧高度是1 080,比特率是256 kbps,音频采样频率是48 Hz)记录异重流的运动过程。



注:a 为上层出口;b 为中层出口;c 为下层出口。

图1 实验装置图

3 实验工况和条件

3.1 实验工况与特征参数

本次实验主要是在分层条件下研究异重流,Ungarish^[10]研究异重流在分层水体中沿着平坡的发

展情况,他用相对层结度 S 来描述环境水体的分层情况:

$$S = \frac{\rho_B - \rho_{h0}}{\rho_{c0} - \rho_{h0}} \tag{1}$$

式中: ρ_B 为模型水库底部恒温层水体密度; ρ_{h0} 为上层变温层水体的密度; ρ_{c0} 为初始时刻入流泥沙密度; h_0 为初始状态的异重流厚度及进水区中异重流的水深, $h_0 = 17\text{ cm}$ 。

流体之间的密度差是形成异重流的根本原因,描述这两者之间的差异可用有效重力加速度这一概念。Baines^[11]在进行异重流的实验研究中,定义初始有效重力加速度 g_0 为

$$g_0 = g \frac{\Delta\rho}{\rho'} \tag{2}$$

其中

$$\Delta\rho = \rho_{c0} - \rho_{h0}$$

式中: $\Delta\rho$ 为上层变温层水体密度与初始时刻入流泥沙密度的差值; ρ' 为上层变温层水体密度与初始时刻入流泥沙密度的平均值; g 为重力加速度, $g = 9.81\text{ m/s}^2$ 。

此外,描述异重流运动特性的参数还有雷诺数 Re ^[12]:

$$Re = \frac{h_l \sqrt{g_0 h_l}}{\nu} \tag{3}$$

式中: h_l 为进水口高度,实验中进水口高度均为 3 cm (贺治国等^[13]认为进水口高度在一定程度上会影响异重流头部厚度和形态,在之前的研究中,会将 h_l 作为相应的特征参数^[14-15]); ν 为水的运动黏滞系数, m^2/s 。

计算表明,在所做的所有实验中,雷诺数均远大于 1000 ,说明各组实验均为紊流情况。表 1 给出了以上各参数的试验工况。

温度分层的程度也是影响异重流含沙量的重要因素之一。温度分层水体稳定程度的评价指标,通常采用浮力频率平方值来表征:

$$N^2 = - \frac{g}{\rho'} \frac{d\rho}{dz} \tag{4}$$

式中, N 为浮力频率,负号表示浮力频率方向与重力相反; z 为跃温层厚度。水体稳定度的强弱与浮力频率的大小成正相关。当水体浮力频率 N 大于 2.235×10^{-2} 时,水体分层稳定,即强分层水体;当 N 小于 0.71×10^{-2} 时,水体没有分层特性,即为混合水体;当 N 介于 $0.71 \times 10^{-2} \sim 2.235 \times 10^{-2}$ 时,水体呈现不稳定的弱分层状态,称为过渡水体。

理查森数 R_i 用来描述密度梯度与剪切速度之间的相对作用情况^[11,16],定义为

$$R_i = \rho' \frac{d}{U^2} \cos\theta \tag{5}$$

式中: θ 为实验坡度; d 为异重流头部厚度; U 为异重流头部运动的平均速度。在实验过程中可以观察到异重流头部厚度 d 是沿程变化的。实验过程中由于异重流的头部运动速度并不能精确测量,所以本次实验中没有计算异重流的头部运动速度这个参数。

表 1 实验工况及相应参数

试验 编号	θ	g_0'	S	Re	N^2
1	40°23"	0.026	0.735	1206	0.091
2	40°23"	0.026	0.741	1242	0.093
3	40°23"	0.024	0.737	1188	0.092
4	40°23"	0.036	0.481	1420	0.087
5	40°23"	0.036	0.491	1448	0.091
6	40°23"	0.038	0.499	1569	0.094
7	40°23"	0.056	0.343	1858	0.097
8	40°23"	0.056	0.345	1866	0.098
9	40°23"	0.056	0.345	1866	0.098

范家骅等^[17-18]在探讨异重流卷吸系数时提到异重流在运动过程中总会卷吸周边流体进入流动,因此异重流被稀释后,密度差会减少。密度差减小到一定程度时,就不能再维持异重流运动而导致异重流停止运动。Paker 等^[19]在水槽中进行异重流实验,根据他们自己的测量数据得到以下近似公式,即掺混系数 E 为

$$E = \frac{0.0075}{\sqrt{1 + 718R_i^{2.4}}} \tag{6}$$

3.2 实验水体分层特性

实验前,在模型水库底部 10 cm 和 20 cm 利用空调制冷到 5°C 左右,形成恒温层;表面利用自然传热,形成变温层,表层变温层温度范围在 $19 \sim 22^\circ\text{C}$,这样就在实验室模拟了水库的分层环境。实验结束后用 WGZ—2000A 浊度计测其浊度(单位 NTU),再利用浓度-浊度转化标准曲线将测量的浊度转化为浓度。浓度-浊度转化标准曲线为 $Y = 0.0016X + 0.0577$ ($R^2 = 0.9916$,其中 X 为浊度,NTU; Y 为浓度, g/L)。另外,在实验前,利用了 30 通道 TYPEK 数显测温仪(台湾群特 CENTER 309 型)对温度进行准确测量。结果表明,在实验开始前,同一水深的水温差最大不超过 1°C ,可以认为模型水库在水平方向上各处水温基本相同,说明在实验开始前的准备过程中模型水库的水体一直有着稳定的分层结构,可以忽略环境水体自身的掺混。

4 结果分析

4.1 不同出水口位置间层流参数对比

将实验数据进行分析,得到表 2。其中,间层流厚度取异重流到达出水口断面变化不大的厚度;分离点深度指异重流从斜坡分离进入分层水体的最低

点距离水面的距离;异重流从斜坡分离进入分层水体后会形成跃起,水跃高度是指异重流从斜坡分离时最低点跃起后水平进入分层水体的高度;行进时间是指从进水口开始计时,异重流在模型库区行进至模型水库出水口断面的时间。

从表 2 可知,在浓度确定的情况下,间层流厚度、分离点深度、水跃高度和异重流行进时间并没有太大的差别。这是因为在各个条件下,间层流都会先行进至模型水库出水口位置断面。通过观察实验过程中可知,当出水口位于上层时,异重流成水平状态直接排出库外;当出水口位于中层和下层时,异重流为了排出库外会发生卷吸掺混,所以在异重流没有排出库外之前,出水口位置对这些参数产生的数值差异较小。

表 2 不同出水口位置参数对比

出水口位置	泥沙浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	间层流厚度/cm	分离点深度/cm	水跃高度/ cm	行进时间/ s
上层	1 250	10	25	7	625
中层		10	23	7	617
下层		10	23	6	636
上层	3 750	15	33	6	620
中层		13	32	7	634
下层		13	33	7	619
上层	7 500	15	35	7	618
中层		15	35	6	622
下层		14	36	7	613

4.2 不同出水口位置条件下泥沙浓度对比

在所做的实验中,选取确定的泥沙浓度 1 250 mg/L ,流量 0.324 m^3/h ,在不同出水口位置(上层 38.5 cm、中层 18 cm、下层 4 cm)对泥沙浓度进行对比。图 2 ~4 分别为行进时间 20 min 和 50 min 时的泥沙浓度对比图。

从图 2 ~4 可以看出,当浓度为 1 250 mg/L 、流量为 0.324 m^3/h 时,异重流表现为明显的间层流,泥沙浓度集中在间层流部分,50 min 时异重流有明显的卷吸现象,并且可以看出,随着出水口位置的下移,间层流也有下移现象。

对所有的实验进行观察可以得到:出水口在上层时,间层流成水平状态直接排出库外,这是因为间层流范围一般都在距离模拟水库底部 30 ~ 50 cm 范围内,而上层出水口位置为 38.5 cm,具有间层流可以直接成水平状态排出库外的条件;出水口在中层时,异重流先运动到模型水库出水口断面位置,而当出水口位置在中层出水口位置 18 cm 处时,并没有异重流可以直接排出的条件,开始时从中层出水口排出的大部分都是清水。根据卷吸理论,异重流无法及时排出库区,会卷吸周边清水进入异重流,所以在实验过程中从直观上看到的是间层流运动到出水

口断面时形成涡旋且厚度增大。由于卷吸的作用,当间层流厚度增大到一定程度时有泥沙开始排出;出水口在下层时,异重流还是会先运动到模型水库出水口断面位置,而下层出水口位置在距离模型水库 4 cm 处时,与出水口位置中层现象一致,异重流无法及时排出库区,同样会卷吸周边清水进入异重流,在实验过程中可以看到间层流运动到出水口断面会形成涡旋且厚度增大。只是出水口位于下层时,卷吸作用时间更长,间层流厚度更大。异重流在卷吸周边清水的过程中,间层异重流密度不断减小。出水口位置不同时,异重流运动到出水口断面处的头部厚度和速度基本没有变化,根据式(5)和(6)可以得出,掺混系数 $E_{\text{上}} < E_{\text{中}} < E_{\text{下}}$ 。根据观察和实验数据,泥沙浓度为 3 750 mg/L 、7 500 mg/L 与 1 250 mg/L 可以得到相同的结论。

根据已有的数据及图 2 ~4 可以知道,在间层流运动到出水口断面之前,间层流泥沙主要分布在距离模拟水库底部 30 ~ 50 cm 范围内,出水口位置不同,产生泥沙时空分布差异较小。当间层流开始排出模型水库,只有上层具有间层流可以直接排出库外的条件,中层和下层则并不具备,此时异重流会发生卷吸掺混,泥沙分布范围主要向下扩散掺混。出水口位置越靠下,泥沙分布范围向下扩散掺混则越严重。

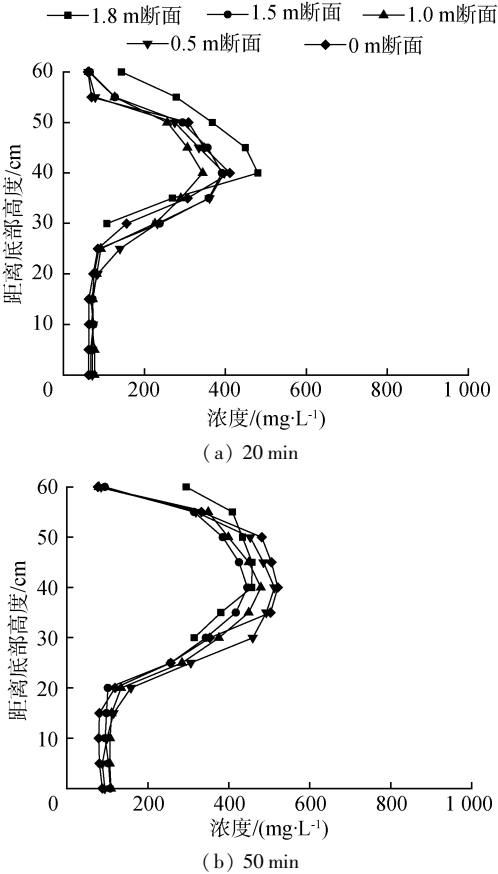
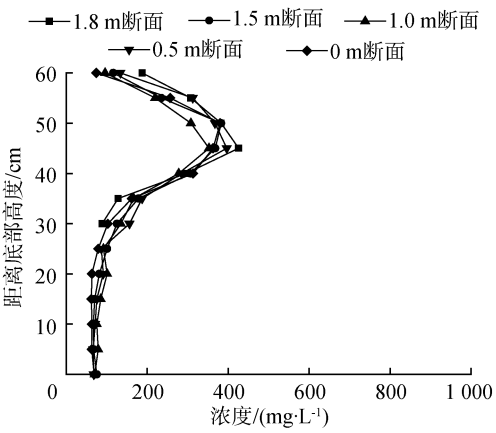
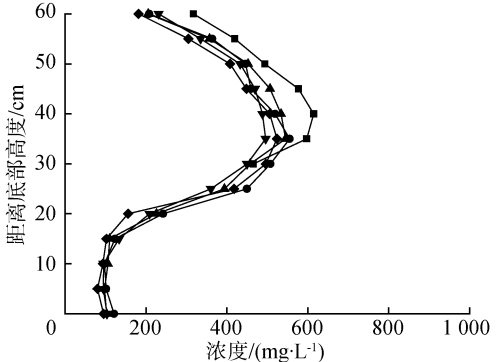


图 2 不同断面上层出水口不同取样时间泥沙浓度

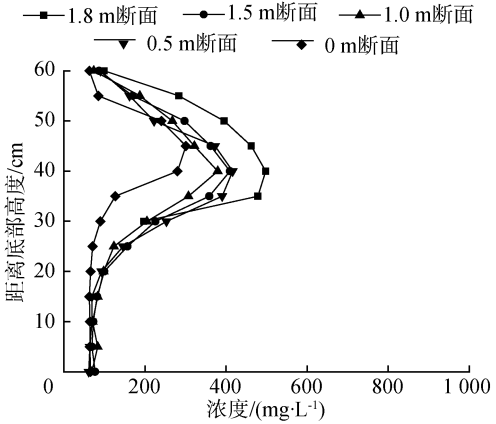


(a) 20 min

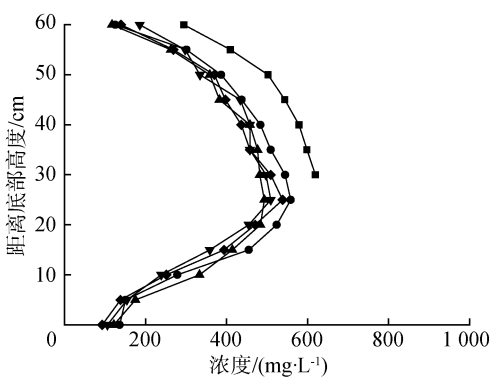


(b) 50 min

图3 不同断面中层出水口不同取样时间泥沙浓度



(a) 20 min



(b) 50 min

图4 不同断面下层出水口不同取样时间泥沙浓度

4.3 排沙比对比

4.3.1 出水口位置相同而泥沙浓度不同

排沙比是指各个取样时间排出库外的泥沙量与进入模型水库泥沙量的比值。计算排沙比是为了得到较好的排沙效果时进入水库最适宜的初始泥沙浓度和出水口位置。

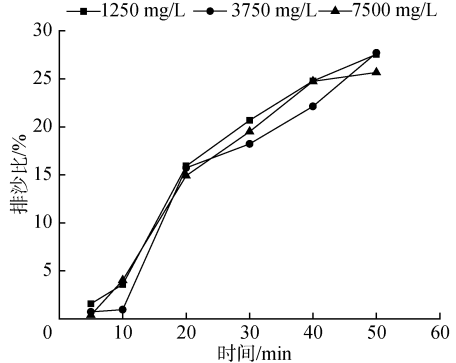
$$m_i = \rho_i q t \quad (7)$$

式中: m_i 为进入模型水库的泥沙量; ρ_i 为进入水库的泥沙初始浓度; q 为进入水库的泥沙初始流量; t 为各取样时间。

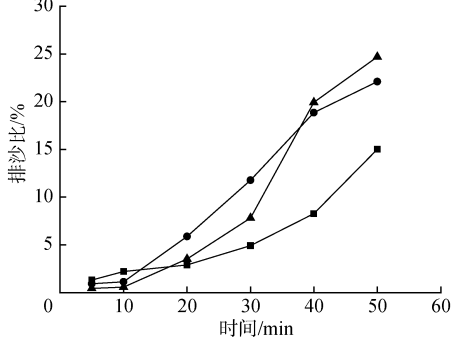
$$m_i = \rho_i q t \quad (8)$$

式中: m_i 为排出模型水库的泥沙量; ρ_i 为泥沙排出水库的浓度。

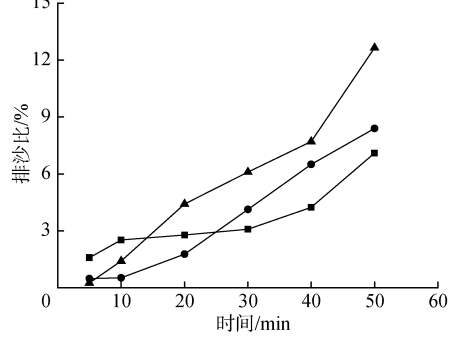
出水口位置确定的泥沙浓度分别为 1 250 mg/L、3 750 mg/L 和 7 500 mg/L,取样时间为实验开始后的 5、10、20、30、40、50 min,将各泥沙浓度各取样时间的排沙比汇总成图 5。



(a) 上层出水口



(b) 中层出水口



(c) 下层出水口

图5 不同泥沙浓度上中下层出水口排沙比

从图 5 可以看出,当出水口位置确定时,泥沙浓度的变化几乎不会影响排沙比,这是因为虽然泥沙初始浓度改变,但在各个取样时间排出库外的泥沙浓度与进入库区的泥沙浓度的比值较恒定。出水口位于上层,当泥沙浓度改变时,各个时间段的排沙比没有太大的变化;当出水口在中层和下层时,泥沙浓度越大,排沙比相对增大,这是因为异重流为了排出库外,当出水口位置越靠下,泥沙浓度大的间层流卷吸作用越大,掺混也越严重,异重流排沙时,泥沙占的比重会增加,清水占的比重则减小,所以泥沙浓度大的排沙比比泥沙浓度小的排沙比要大一些。

4.3.2 泥沙浓度相同而出水口位置不同

泥沙浓度分别确定为 1 250 mg/L、3 750 mg/L 和 7 500 mg/L,出水口位置分别为上层、中层和下层,将各泥沙浓度各取样时间的排沙比汇总成图 6。

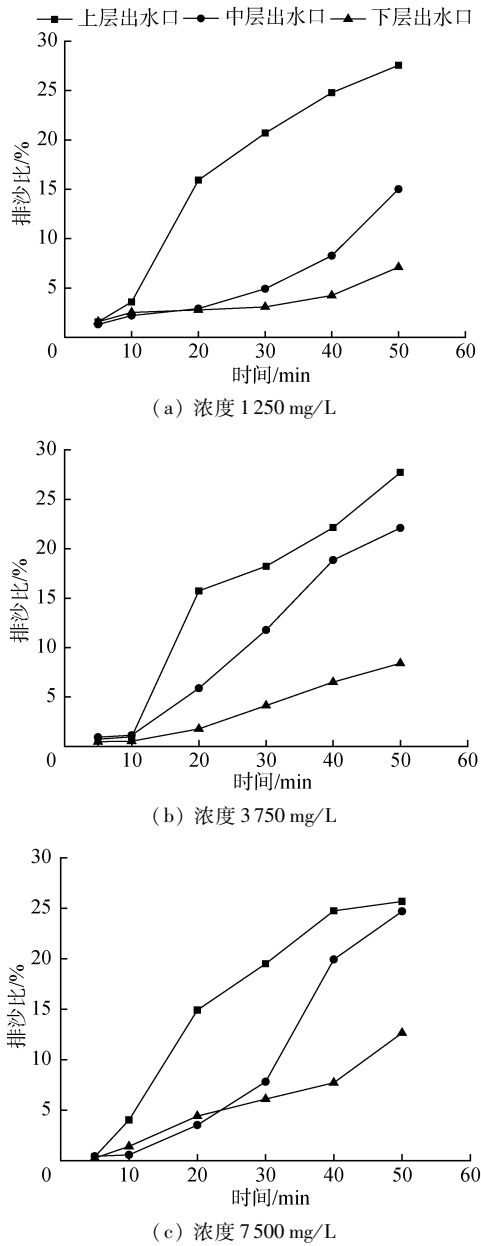


图 6 上中下层出水口不同泥沙浓度的排沙比

从图 6 可以看出,当入流泥沙浓度确定时,上层出水口排沙比远远大于中层和下层出水口,这是因为初始泥沙浓度确定,出水口位置从上变到下的过程中,在各个取样时间排出库外的泥沙浓度与进入库区的泥沙浓度的比值逐渐减小。所以,出水口位于上层时,排沙效果最好;出水口位于下层时,排沙效果最差。当泥沙浓度较大时,取样时间越长 (40 min、50 min),中层出口的排沙比接近于上层出水口,说明异重流在库区停留时间越长,排沙比越增加,但此时库区掺混严重,不利于排沙。

5 结 论

- a. 当入流泥沙浓度确定,出水口分别位于上、中、下层时,异重流的厚度、分离点深度、水跃高度和行进时间等参数数值的差异较小;
- b. 当入流泥沙浓度确定,出水口位于上层时,异重流以间层流形式直接水平排出库外,间层流厚度基本沿程不变;出水口位于中、下层时,间层流运动至出水口位置断面后,会因卷吸作用卷吸周围清水,引起间层流厚度局部增加;
- c. 当出水口位置确定时,入流泥沙浓度基本不影响异重流排沙比;
- d. 当入流泥沙浓度确定,出水口位置会影响异重流排沙比,位于上层的排沙比远远大于出水口位于中层和下层的排沙比。随着异重流停留时间加长,虽然排沙量有所增加,但库区异重流掺混严重,不利于排沙。

参考文献:

[1] 张小峰,姚志坚,陆俊卿. 分层水库异重流试验[J]. 武汉大学学报(工学版),2011,44(4):409-413. (ZHANG Xiaofeng, YAO ZhiJian, LU Junqing. Experiments of density currents in stratified reservoir [J]. Engineering Journal of Wuhan University,2011,44(4):409-413. (in Chinese))

[2] DORREL R M, DARBY S E, PEAKALL J, et al. The critical role of stratification in submarine channels: implications for channelization and long runout of flows [J]. Journal of Geophysical Research Oceans,2014,119(4):2620-2641.

[3] 范家骅. 异重流交界面波动失稳条件[J]. 水利学报, 2010, 41 (7): 849-855. (FAN Jiahua. Interfacial instability in density currents [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2010,41(7):849-855. (in Chinese))

[4] BENJAMIN T B. Gravity currents;in the environment and laboratory[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1999.

- [5] KASSEM A, IMRAN J. Simulation of turbid underflow generated by the plunging of a river[J]. *Geology*,2001 ,29 (29) :655-658.
- [6] FEMANDEZ R,IMBER G J. Time-varying underflow into a continuous stratification with bottom slope[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*,2008,134(9) :1191-1198.
- [7] 中国科学院水利电力部水利水电科学研究院河渠研究所. 异重流的研究和应用[M]. 北京:水利电力出版社, 1959.
- [8] WANG Z, YU G, HUANG H, et al. Gender of large river deltas and parasitizing river [J]. *International Journal of Sediment Research*,2012,27(1) :18-36.
- [9] HUANG H, IMRAN J, PIRMEZ C. Numercial modeling of poorly sorted depositional turbidity currents [J]. *Journal of Geophysical Research*,2007,112(C1) :1-15.
- [10] UNGARISH M. On gravity currents in a linearly stratified ambient: a generalization of Benjamin stesdy-state propagation results[J]. *Journal of Fluid Mechanics*,2006, 548:49-68.
- [11] BAINES P G Mixing in flows down gentle slopes into stratified environments[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2001,443:237-270.
- [12] DAI A. Experiments on gravity currents prapagating on different bottom slopes[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2013,731:117-141.
- [13] 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实验研究[J]. *中国科学:技术科学*, 2016,46 (6) :570-578. (HE Zhiguo, LIN Ting, ZHAO Liang, et al. Experiments on gravity currents down a ramp in unstratified and linearly stratified salt water environments[J]. *Science China Technological Sciences*, 2016,46(6) :570-578. (in Chinese))
- [14] KATE S, SUTHERLAND B R. Particle-laden flow down a slope in uniform stratifition [J]. *Journal of Fluid Mechanics*,2014,755:251-273.
- [15] SIMPSON J E. Gravity currents in the labortatory, atmosphere, and ocean [J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*,2003,14(1) :213-234.
- [16] SAMOTHRAKIS P, COTEL A J. Propagation of a gravity current in a tuo-layer stratified environment[J]. *Journal of Geophysical Research*,2006,111(C1) :281-291.
- [17] 范家骅. 浑水异重流水量掺混系数的研究[J]. *水利学报*,2011,42(1) :19-26. (FAN Jiahua. Studies on water entrainment coefficient of turbid density currents [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*,2011,42(1) :19-26. (in Chinese))
- [18] 王睿禹, GARCIA M, PARKER G. 异重流卷吸系数和运行距离的初步探讨[J]. *泥沙研究*, 2015 (6) :6-13. (WANG Ruiyu, GARCIA M, PARKER G. Study on water entrainment coefficient and travel distance of density current[J]. *Journal of Sediment Research*, 2015 (6) :6-13. (in Chinese))
- [19] PAKER G, GARCIA M, FUKUSHIMA Y, YU W. Experiments on turbidity currents over an erodible bed [J]. *Journal of Hydraulic Research*, 1987, 25 (1) :123-147.

(收稿日期:2017-01-11 编辑:彭桃英)

(上接第 108 页)

- [8] 石荣. 土壤矿物质吸附砷的研究进展[J]. *土壤通报*, 2007,38(3) :584-588. (SHI Rong. A review of arsenic adsorption onto mineral constitutions in the soil [J]. *Chinese Journal of Soil Science*,2007,38(3) :584-588. (in Chinese))
- [9] KUNDU S, GUPTA A K. Adsorptive removal of As(Ⅲ) from aqueous solution using iron oxide coated cement (IOCC): evaluation of kinetic, equilibrium and thermodynamic models [J]. *Separation and Purification Technology*,2012,52:165-72
- [10] MARKUS B, CHRISTIAN B. Mobilization of arsenic by dissolved organic matter from iron oxides, soil sand sediments[J]. *Science of the Total Environment*,2006, 354:179-190
- [11] HSU J, LIN C, LIAO C. Evaluation of the multiple-ion competition in the adsorption of as(V) onto reclaimed iron-oxide coated sands by fractional factorial design[J]. *Chemosphere*,2008,72:1049-1055.
- [12] 王强,卜锦春,魏世强,等. 赤铁矿对砷的吸附解析及氧化特征[J]. *环境科学学报*,2008,28(8) :1612-1617. (WANG Qiang, BU Jinchun, WEI Shiqiang, et al. Characteristics of isothermal adsorption and desorption, and oxidation of As (Ⅲ) [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*,2008,28(8) :1612-1617. (in Chinese))
- [13] JIA Y F, XU L Y, WANG X, et al. Infrared spectroscopic and X-ray diffraction characterization of the nature of adsorbed arsenate on ferrihydrite [J]. *Cosmochim Acta*, 2007,71(7) :1643-1654
- [14] HORNEMAN A, van GEEN A, KENT D V, et al. Decoupling of As and Fe release to Bangladesh groundwater under reducing conditions. Part 1: evidence from sediment profiles[J]. *Geochemical et Cosmochemical Acta*,2004,68:3459-3473.

(收稿日期:2016-12-15 编辑:彭桃英)