

# 分层水库异重流挟沙特性及适宜排沙口的确定

解 岳, 陈恩源, 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:** 利用异重流排沙是控制水库泥沙淤积和避免水库浑水现象的一种有效手段,但是目前对水库水温分层环境下的情况却鲜有研究。基于自然水温分层的分层模型水库研究,分别在入流量为  $0.08 \sim 0.64 \text{ m}^3/\text{h}$ 、入流泥沙浓度为  $1.25 \sim 7.5 \text{ g/L}$  和泥沙粒径为  $0.01 \text{ mm}$  的条件下,进行了一系列分层水库异重流的中试研究,测定了水库中5个断面、6个运行时间下的垂向泥沙浓度分布,系统分析了其变化特性和影响因素。对于固定工况,定义出水口断面处泥沙浓度不低于10%最大浓度( $\geq 10\% C_{\max}$ )的位置为适宜排沙口位置。中试结果表明,在跃温层温度梯度为  $41 \sim 48 \text{ }^\circ\text{C}/\text{m}$  的分层条件下,入流量和泥沙浓度均能影响水库内异重流的主要挟沙范围及适宜排沙口的位置。水库内最大泥沙浓度随入流量和泥沙浓度的增大而增大,其主要挟沙范围亦随之扩大,异重流排沙口的适宜垂向位置下移。

**关键词:** 分层水库; 异重流; 入流; 泥沙浓度; 排沙口

**中图分类号:** TU991 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2017)05-0094-05

## Characteristics of Transporting Sediment by Density Currents and Determination of Proper Location of Sediment Releasing Outlet in Stratified Reservoir

XIE Yue, CHEN En-yuan, SUN Xin

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

**Abstract:** Emission of sediments by density currents is one of the most effective measures for both controlling sedimentation and avoiding turbid water in reservoirs. However, little research has been reported on thermal stratification in reservoirs. Under the boundary conditions of inflow rates of  $0.08 \sim 0.64 \text{ m}^3/\text{h}$ , sediment concentrations of  $1.25 \sim 7.5 \text{ g/L}$  and sediment size of  $0.01 \text{ mm}$ , a series of pilot experiments were carried out to characterize density currents, using a naturally stratified reservoir model. Vertical distributions of sediment concentrations were measured at five cross-sections under six running times, and were systemically analyzed for variations and factors. For a given condition, a proper location of sediment releasing outlet was selected where the sediment concentration was no less than 10% of the maximum sediment concentration. The result showed that when temperature gradients in the thermocline were between  $41 \sim 48 \text{ }^\circ\text{C}/\text{m}$ , both active sediment scour areas and proper locations of sediment releasing outlet were influenced by inflow rates and sediment concentrations. When the inflow rate and sediment concen-

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51278404); 人力资源和社会保障部留学人员科研择优资助项目(DB03153); 西安建筑科技大学人才基金资助项目(RC1130)

tration were increased, the maximum sediment concentration in the reservoir would increase, the main zones for carrying sediment would expand, and the depths of the reasonable location of sediment releasing outlet would decrease.

**Key words:** stratified reservoir; density current; inflow; sediment concentration; sediment releasing outlet

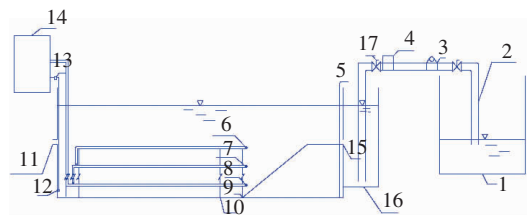
水库排沙减淤是指将含沙量较高的入库水流直接排出库从而减轻水库淤积。常见的排沙方法有异重流排沙、滞洪排沙、浑水水库排沙等<sup>[1~6]</sup>,其中异重流排沙作为一种非常有效的方法而备受关注。近 70 年来,国内外学者主要对非分层水库中的异重流携沙特性、异重流泄出层高度及厚度等问题进行了研究,主要可分为三大类<sup>[7~9]</sup>:中部垂直壁和底孔二元与三元孔口出流时的极限泄出层高度和厚度;密度线性分布的分层流通过垂直壁和底孔二元和三元孔口时的极限泄出层高度和厚度;异重流出口密度的变化规律。在小尺度的模型水库内模拟异重流携沙特性和泄出层厚度一直是异重流研究的难点,而目前国内外分层水库异重流的模型试验研究基本处于空白。在国内仅有姚志坚等<sup>[10]</sup>通过设计水循环和加热方式模拟了水库水温分层环境,研究了强、弱分层条件下间层流的演变过程,分析了温跃层平均密度梯度与分离点深度以及间层流厚度的关系。但该水温分层形成方法存在加热不均的问题,对分层水环境异重流演变过程中泥沙浓度的变化规律和可调式排沙口的设置问题也未作研究。查阅国内外有关水温分层和非分层水体异重流研究资料,还尚未发现涉及异重流排沙口的适宜设置问题。

笔者通过分层水库中泥沙异重流运动的实验室模拟,重点研究入流量和泥沙浓度对分层水库异重流运动过程中泥沙分布的影响,进而探讨在坝前可调式排沙口设置位置的问题,以便更好地通过异重流排沙提高排沙效率。期望研究成果可进一步补充和完善现有的异重流输排沙理论,为分层水库汛期的运行管理和防治水体富营养化提供重要的理论依据和技术支持。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 中试装置

采用有机玻璃制作的可视化中试装置(如图 1 所示),水深为 0.6 m,主要包括单相自吸泵、温控器、空调、电磁流量计、浊度仪、高清摄像机、温度计以及基于虹吸原理的水下多点同时取样器。



1.进水箱 2.加水管 3.单相自吸水泵 4.电磁流量计  
5.刻度尺 6.第 1 层冷凝管 7.第 2 层冷凝管  
8.第  $N-1$  层冷凝管 9.支架 10.模型水库  
11.出流口(37.5 cm) 12.温度探头 13.温度感应器  
14.空调主机 15.缓冲水池 16.进水槽 17.球阀

图 1 可视化中试系统

Fig. 1 Schematic diagram of pilot-scale experiment system

沿水流方向,在斜坡的正中间设第一个取样断面(记为 0 断面),距 0 断面 0.3 m 处设第二个取样断面(记为 0.3 断面),距 0.3 断面 0.5、1.0、1.5 m 处分别设第三、四、五断面(记为 0.8、1.3、1.8 断面)。在水深方向,每隔 0.05 m 设一个取样点,从水面开始到池底取样点分别记为 0 ~ -0.6 m。

### 1.2 中试程序及条件

中试程序如下:①向模型水库注入自来水至水深达到 0.6 m,开启空调对水库底部水体降温直至底部水温稳定降至 5 ℃后,空调自动关闭,依靠自然传热在水库内部形成水温分层<sup>[11]</sup>;②在进水箱内配制一定石英砂浓度的浑水,并搅拌均匀;③开启水泵,调节流量计使入流量达到要求值;④开启高清摄像机记录流动过程;⑤打开进水阀门使浑水进入缓冲水池和进水槽,同时开启模型水库出水口;⑥调节出水阀门使得水库内水位恒定在 0.6 m;⑦稳定运行 5 min 后开始测量水温并取样,后续取样间隔分别为 10、20、30、40、50 min;⑧测定水样的浊度  $y$  (NTU),通过试验确定的关系式  $y = 812.46x$  ( $R^2 = 0.9759$ ),计算出水样的泥沙浓度  $x$  (g/L)。

中试采用的石英砂粒径为 0.01 mm,密度为 1.69 g/mL。入流量分别为 0.08、0.16、0.32、0.48、0.64 m<sup>3</sup>/h,入流泥沙浓度分别为 1.25、2.5、3.75、5、7.5 g/L,入流水温约为 16.5 ℃,采用单因素试验方法。

## 2 结果与分析

### 2.1 温度场及浓度场的演变

以入流量  $Q=0.08 \text{ m}^3/\text{h}$ 、泥沙浓度  $C=1.25 \text{ g/L}$  的工况为例,在异重流运动的 50 min 内,模型水库内的温度场演变如图 2 所示。可见,该模型的初始入流和库内水温情况与实际水库类似,通过底部水体制冷和水体自然传热形成的水温分层结构与实际水库类似,其水温随异重流向出水口运动不断降低。同时不难看出,异重流运动过程中,水库内水温结构变化相对较小,故本试验重点研究水库内泥沙浓度的时空变化。

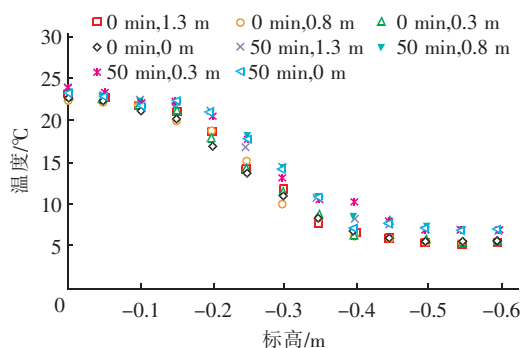


图2 不同时刻模型水库的水温分布

Fig. 2 Temperature distribution of model reservoir in different time

以 0、0.3、0.8、1.3、1.8 断面为研究对象,分析含沙水流进入模型水库 5、10、20、30、40、50 min 后的泥沙浓度分布情况,其中入流泥沙浓度为  $1.25 \text{ g/L}$  时 0.8 断面泥沙浓度的垂向分布情况见图 3。

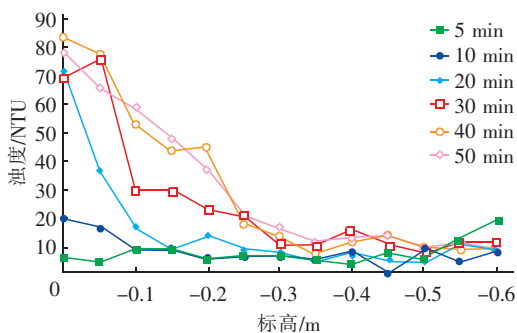


图3 0.8 断面水体浊度的垂向分布

Fig. 3 Vertical distribution of turbidity in 0.8 section

由图 3 可知,在同一标高处水的浊度(反映泥沙浓度)均随时间的推移而增大。这是因为进入模型水库的含沙量随时间的推移而增加,而水体总容积不变,故同一段面上模型水库的泥沙浓度增加。在同一时间段内,泥沙浓度随水深的增加而降低。

这是因为流量较小,横向截面不变,导致垂向运动速度较小,同时由于水流阻力作用的存在,使得流速不断减小。

### 2.2 入流条件的影响

#### 2.2.1 垂向泥沙浓度分布

按照 2.1 节所述方法,对其他试验工况条件下模型水库水体中泥沙的垂向时空分布进行了汇总。

当入流量为  $0.08 \text{ m}^3/\text{h}$ 、入流泥沙浓度在  $1.25 \sim 2.5 \text{ g/L}$  范围变化时,随入流泥沙浓度的增加,模型水库内的最大浊度也在增大;但最大浊度所在断面的纵向位置基本稳定在 0.3 断面处。在垂向上,模型水库内水体的浊度与水深成反比,即浊度随水深的增加而减小,最大浊度所在位置在模型水库表面。当泥沙浓度在  $3.75 \sim 7.5 \text{ g/L}$  范围变化时,浊度与水深的曲线分为两段,一段为开口向下的抛物线,一段近似为直线。随入流泥沙浓度的增加,抛物线的分布范围扩大,其分布区间由  $(0 \sim -0.35 \text{ m})$  扩大为  $(0 \sim -0.45 \text{ m})$ ,抛物线的对称轴所在标高逐渐减小,即最大浊度所在位置下移;在直线段内,浊度不随标高的变化而变化,其值基本保持恒定。

当入流量为  $0.16 \text{ m}^3/\text{h}$ 、入流泥沙浓度在  $1.25 \sim 7.5 \text{ g/L}$  范围变化时,模型水库内的最大浊度值也随着入流泥沙浓度的增加而增大,其垂向位置由  $-0.05 \text{ m}$  减小到  $-0.2 \text{ m}$ ,随后保持不变;最大浊度所在的纵向位置位于 0.3 断面,基本保持恒定。浊度与水深的曲线同样分为两部分。随入流泥沙浓度的增加,抛物线所在区间由  $(0 \sim -0.35 \text{ m})$  扩大为  $(0 \sim -0.4 \text{ m})$ ,随后保持不变,其对称轴由  $-0.15 \text{ m}$  变为  $-0.2 \text{ m}$ ,随后保持不变,即最大浊度所在的垂向位置先下移后不变。

当入流量为  $0.32 \text{ m}^3/\text{h}$  时,最大浊度所在位置恒定在 0.3 断面,标高为  $-0.2 \text{ m}$ ;浊度垂向分布的抛物线,一部分开口向下,区间稳定在  $(0 \sim -0.4 \text{ m})$ ,对称轴为  $-0.2 \text{ m}$ ;泥沙浓度在  $1.25 \sim 2.5 \text{ g/L}$  范围变化时,直线段内浊度保持恒定且不随标高发生变化;而泥沙浓度在  $3.75 \sim 7.5 \text{ g/L}$  范围变化时,直线段内的浊度随标高的增加而减小。

当入流量为  $0.48 \text{ m}^3/\text{h}$ 、入流泥沙浓度在  $1.25 \sim 5 \text{ g/L}$  范围变化时,最大浊度值所在位置恒定在 0.3 断面,标高为  $-0.2 \text{ m}$ ;浊度垂向分布抛物线,开口向下区间稳定在  $(0 \sim -0.35 \text{ m})$ ,对称轴为  $-0.2 \text{ m}$ 。在浓度为  $1.25 \text{ g/L}$  时,直线段内浊度保持恒定

且不随标高发生变化,浓度在 $2.5 \sim 5 \text{ g/L}$ 范围变化时,直线段内的浊度随标高的增加而减小;而浓度为 $7.5 \text{ g/L}$ 时,浊度随标高的增加而减小,即越靠近池底,浊度越大,可见浊度与标高的线性关系良好。

当入流量为 $0.64 \text{ m}^3/\text{h}$ 、入流泥沙浓度在 $1.25 \sim 5 \text{ g/L}$ 范围变化时,最大浊度所在位置恒定在 $0.3$ 断面,其标高为 $-0.2 \text{ m}$ ;浊度分布曲线一部分为开口向下的抛物线,所在区间稳定在 $(0 \sim -0.35 \text{ m})$ ,其对称轴为 $-0.2 \text{ m}$ ;当浓度为 $1.25 \text{ g/L}$ 时,直线段内浊度保持恒定,而泥沙浓度在 $2.5 \sim 5 \text{ g/L}$ 范围变化时,直线段内的浊度随标高增加而减小;浓度为 $7.5 \text{ g/L}$ 时,浊度随标高的增加而略有减小。

不考虑水温分层时,浑水异重流泥沙浓度在垂向上呈抛物线分布;在本试验的水温分层条件下,泥沙浓度的垂向分布规律不同于非分层条件,所以水库的水温分层会对异重流排沙产生一定影响。

## 2.2.2 最大浊度及出水口处最大浊度所在位置

通过分析汇总试验数据得出在不同入流条件下,模型水库内水体的最大浊度及出水口处最大浊度所在位置,如图4所示。

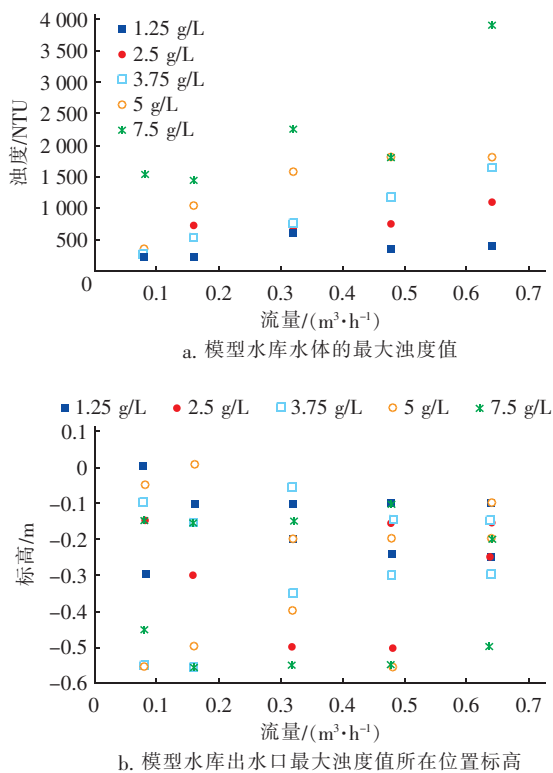


图4 模型水库最大浊度及出水口处最大浊度所在位置

Fig.4 Location of maximum turbidity at outlet and maximum turbidity of model reservoir

由图4(a)可知,在入流量不变时,模型水库内最大泥沙浓度与入流泥沙浓度呈正相关关系;在入流泥沙浓度不变,模型水库内的最大泥沙浓度与入流量也呈正相关关系。由图4(b)可知,流量不变时,随着泥沙浓度的增加( $1.25 \sim 7.5 \text{ g/L}$ ),模型水库出水口处最大浊度所在位置从表层开始向下移动,即最大浊度分布范围越来越靠近池底;泥沙浓度不变时,随着流量的增加( $0.08 \sim 0.64 \text{ m}^3/\text{h}$ ),模型水库出水口处最大浊度所在位置的变化规律也与不同浓度条件下的类似。

## 2.2.3 模型水库适宜排沙口的设置

当入流量为 $0.08 \text{ m}^3/\text{h}$ 、入流泥沙浓度为 $1.25 \text{ g/L}$ 时,在异重流运动的 $50 \text{ min}$ 内,模型水库水体最大浊度为 $226.4 \text{ NTU}$ ,最大浊度的 $10\%$ 为 $22.64 \text{ NTU}$ 。 $1.8$ 、 $1.3$ 、 $0.8$ 、 $0.3$ 断面各个时刻最大浊度分别位于区间 $(-0.1 \text{ m}, 0)$ 、 $(-0.4 \text{ m}, 0)$ 、 $(0.15 \text{ m}, 0)$ 、 $(-0.15 \text{ m}, 0)$ 。模型水库的出水口标高为 $-0.355 \text{ m}$ ,高度为 $0.03 \text{ m}$ 。此处出水浊度很低,远低于 $22.64 \text{ NTU}$ 。 $1.8$ 取样口浊度 $\geq 22.64 \text{ NTU}$ 的水体主要位于 $(-0.2 \text{ m}, 0)$ 范围内。结合各个取样口最大浊度的分布情况,排沙口的设置高度宜在 $(-0.2 \text{ m}, 0)$ 范围内。

为进一步了解异重流运动过程中的挟沙特性,按照上述方法,对不同条件下模型水库水体中异重流挟沙的主要水深范围进行分析,结果如图5所示。

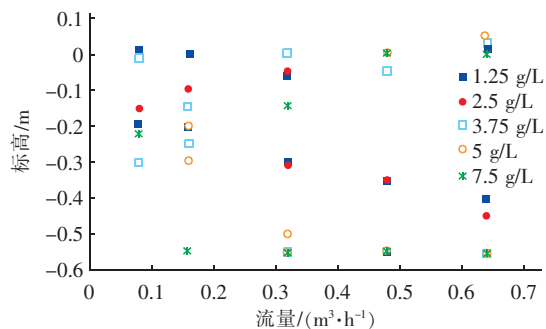


图5 模型水库出水口处浊度 $\geq 10\%$ 最大浊度所在位置范围

Fig.5 Range of outlet location with turbidity value more than 10% maximum turbidity value of model reservoir

由图5可知,入流量不变时,随着入流泥沙浓度的增加( $1.25 \sim 7.5 \text{ g/L}$ ),出口处异重流主要挟沙范围扩大,最小标高减小;浓度不变时,入流量对异重流主要挟沙范围垂向位置的影响与上述相同。即当入流泥沙浓度从 $1.25 \text{ g/L}$ 增加到 $7.5 \text{ g/L}$ 、流量从 $0.08 \text{ m}^3/\text{h}$ 增加到 $0.64 \text{ m}^3/\text{h}$ ,异重流引起的主要



挟沙范围由 $(-0.2\text{ m}, 0)$ 逐渐扩大到 $(-0.55\text{ m}, 0)$ 。

在异重流引起的主要挟沙范围内均可设置排沙口。当入流泥沙从 $1.25\text{ g/L}$ 、 $0.08\text{ m}^3/\text{h}$ 变为 $7.5\text{ g/L}$ 、 $0.64\text{ m}^3/\text{h}$ 时,可设置排沙口的宽度由 $0.2\text{ m}$ (主要挟沙范围的高度)增加到 $0.55\text{ m}$ 。可设置排沙口的宽度与水深比由 $1:3$ 增加到 $11:12$ 。

### 3 结论与建议

① 在跃温层温度梯度为 $41\sim 48\text{ }^\circ\text{C/m}$ 、入流泥沙浓度为 $1.25\sim 7.5\text{ g/L}$ 、流量为 $0.08\sim 0.64\text{ m}^3/\text{h}$ 的中试条件下,泥沙浓度和流量都会对库内泥沙浓度的分布产生较大影响。

② 入流泥沙浓度从 $1.25\text{ g/L}$ 增加到 $7.5\text{ g/L}$ 、流量从 $0.08\text{ m}^3/\text{h}$ 增加到 $0.64\text{ m}^3/\text{h}$ ,分层模型水库中最大泥沙浓度均出现递增,而异重流引起的主要挟沙范围由 $(-0.2\text{ m}, 0)$ 逐渐扩大到 $(-0.55\text{ m}, 0)$ 。

③ 当入流泥沙浓度和流量分别从 $1.25\text{ g/L}$ 、 $0.08\text{ m}^3/\text{h}$ 增加到 $7.5\text{ g/L}$ 、 $0.64\text{ m}^3/\text{h}$ 时,适宜排沙应设置的宽深比(宽度和水深的比值)从 $1:3$ 变为 $11:12$ 。

④ 根据上述试验结果,在水库泄洪处设置具有不同泄洪口高程的泄洪塔,可最大限度地利用异重流排沙。

### 参考文献:

- [1] 金宝琛,杨极,吴铁华,等. 闹得海水库冲淤规律分析[J]. 泥沙研究,2005,(4):41-47.
- [2] 杨庆安,龙毓骞. 黄河三门峡水利枢纽运用与研究[M]. 郑州:河南人民出版社,1995.
- [3] 吴保生,马吉明,张仁,等. 水库及河道整治对黄河下游游荡性河道河势演变的影响[J]. 水利学报,2003,34(12):12-20.
- [4] 胡春宏,郭庆超,陈建国. 降低潼关高程途径的研究

[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2003,1(1):30-35.

- [5] Wu B S, Wang G W, Wang Z Y, et al. Effect of changes in flow run off on the elevation of Tongguan in Sanmenxia Reservoir[J]. Chinese Science Bulletin, 2004, 49(15): 1658-1664.
- [6] Wu B S, Wang Z Y, Li C Z. Yellow River basin management and current issues[J]. Journal of Geographical Sciences, 2004, 14(S1): 29-37.
- [7] 吴保生,张仁. 三门峡水库建库前潼关高程变化研究成果的比较分析[J]. 泥沙研究,2004,(1):70-78.
- [8] 易家训. 分层流[M]. 北京:科学出版社,1983.
- [9] Hsu S M, Yu W S, Fan K L. Experiments on selective withdrawal of a codirectional two-layer flow through a line sink[J]. J Hydraul Eng, 2004, 130(12): 1156-1166.
- [10] 姚志坚,张小峰,陆俊卿. 温度分层环境下的水库异重流试验研究[J]. 人民长江,2011,42(13):51-55.
- [11] 孙昕,陈恩源,解岳. 一种基于自然传热的湖泊水库水温分层模拟装置[P]. 中国专利:CN103924548A, 2014-07-16.



作者简介:解岳(1971-),男,陕西乾县人,博士,副教授,研究方向包括水污染控制理论与技术以及景观水体水质控制技术。

E-mail: 842824553@qq.com

收稿日期:2016-07-12