

水库异重流淤积成因分析及前锋运动规律

周磊,安瑞冬,谭升魁,李磊

(四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室,四川成都 610065)

摘要 汛期暴雨冲刷河道两岸形成浑水入库,在一定条件下会潜入水库底部形成异重流。若上游降雨历时较短,形成的异重流因失去后续浑水补给而停止运动进而造成水库淤积。针对这一问题,基于水库异重流挟沙能力的计算公式,分析异重流造成水库淤积的原因,即异重流的超饱和输沙和沿程流量损失。针对异重流因沿程流量损失而发生的水库淤积,对失去后续浑水补给的异重流进行水槽试验,分析坡度和浑水入流流速对异重流前锋厚度及运动速度的影响。试验结果表明,坡度或浑水入流流速越小,失去浑水补给的异重流前锋运动速度越慢,前锋厚度减小越快。

关键词 水库淤积;浑水补给;异重流;前锋厚度;前锋运动速度

中图分类号:TV145+.2

文献标识码:A

文章编号:1006-7647(2012)02-0006-05

Study on reservoir sedimentation caused by turbidity currents and experimental study on front movement//ZHOU Lei, AN Rui-dong, TAN Sheng-kui, LI Jia(State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract :Turbidity currents are formed in certain conditions when the rainstorm scours riverway with lots of sediments, plunging into the bottom of the reservoir. If the rainfall duration is short and the runoff quickly reduces, turbidity currents will lose the follow-up muddy water supplies, stop and cause reservoir sedimentation. Factors of reservoir sedimentation caused by turbidity currents are analyzed via formulas of sediment transport. Front thickness and motional time of turbidity currents without supplement are studied via experiments in different conditions. Meanwhile, influences on front of turbidity currents by slope and muddy water inflow are analyzed. The results show that in the condition of the experiment, the smaller the slope or the muddy water inflow velocity is, the faster front thickness decreases and the slower the movement forward of the turbidity currents without follow-up supplement is.

Key words :sedimentation in reservoir; muddy water supplies; turbidity currents; thickness of front; moving velocity of front

天然河道的水流特性会因巨型水库的修建而改变,致使水库内水深增加,流速减缓。汛期暴雨冲刷河道两岸,挟带大量泥沙形成浑水入库,在一定的条件下浑水会潜入水库底部形成异重流。若上游降雨历时较短,产汇流迅速减少,入库流量降低,形成的异重流将在入库洪峰过后失去后续浑水补充,异重流运动逐渐减弱甚至消失,在库区内产生淤积,这将导致水库综合效益降低、水库寿命缩短。在我国南方河流中,异重流淤积的现象时有发生,如武汉青山运河、筑围堰断流后的长江宜昌三江、广西西津船闸引航道等^[1]。随着金沙江水电梯级开发的推进,在比降较大、河谷深切、汛期入库含沙量较高的西南山区河流也极易发生异重流并导致水库淤积,所形成的水库异重流在失去后续浑水补给后的运动规律对

水库排沙减淤措施有重大影响。因此,研究失去后续浑水补充的异重流运动特性有助于认识并减少水库淤积。本文基于异重流的挟沙力公式分析了水库异重流产生淤积的原因。

为了研究异重流,国内外的学者们做了许多水槽试验。Savage 等^[2]通过水槽试验得到潜入点附近 Fr^2 的范围为 0.09 ~ 0.64;Simpson^[3]对动水条件下的底层盐水异重流进行研究,指出动水中逆水异重流运动速度的减小值约为环境水体流速的 60%;Parker 等^[4]在底部铺有和异重流同样泥沙的水槽中进行试验,验证了动量方程中纵向运动速度的修正系数;Alexander 等^[5]利用玻璃水槽,通过改变入流流量和水槽坡度进行异重流试验,得到异重流前锋厚度与坡度、流量、粒径及含沙量的关系;范家骅^[6-7]对

作者简介:周磊(1987—),男,四川江油人,硕士,主要从事环境水力学研究。E-mail:zlsatan23@163.com

通讯作者:安瑞冬(1983—),男,天津人,讲师,博士,主要从事环境水力学研究。E-mail:anruidong@163.com

沉淀池中的异重流和槽宽突变时浑水异重流的局部掺混进行了试验研究,程桂福^[8]针对不同水流条件下的异重流进行了大量试验,分析了异重流运动速度和环境水流流速的关系,陈稚聪等^[9]用盐水和含沙量为 $1 \sim 4 \text{ kg/m}^3$ 的浑水进行水槽试验,发现盐水减少异重流入侵的效果是显著的。总的来说,以往的异重流水槽试验通常在来流有持续补给的条件下进行,对失去补给条件的异重流的运动研究很少。为此,本文通过水槽试验,对失去后续浑水补给的异重流前锋运动规律进行初步探讨。

1 水库异重流淤积成因分析

如图1所示,挟沙水流进入水库壅水段后,由于水深增加,流速减缓,浑水中较粗的泥沙颗粒不断落淤,较细的颗粒则保持悬浮状态,形成三角洲淤积。到达A点后,表层水流撇清,形成明显的清浑水交界面,浑水挟带悬浮颗粒潜入水库底部,形成异重流。异重流沿库底向前运动,并带动交界面上的清水同向而行,由于水量平衡而在水库清水区形成环流,使大量漂浮物向潜入点聚集。运动过程中需排出水库中一部分清水,异重流头部受到较大的阻力,因此前锋厚度比后续稳定潜流的厚度略大。

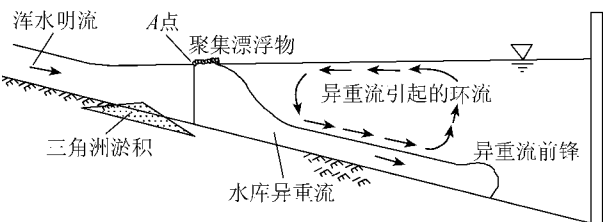


图1 水库异重流示意图

水库异重流引发的淤积已在实际工程中得到证实^[1]。在一定速度下的异重流挟沙能力决定了其中泥沙的沉淀量,而水库的淤积可以看成是水流挟沙能力或运动速度很小时超饱和输沙的特例。因此,分析水库异重流的淤积成因,应分析影响异重流挟沙力的各因素。韩其为^[10]得到了异重流为二维定常均匀流运动时的挟沙力公式:

$$S'_m = K \left(\frac{8\eta_g qJ}{\lambda h \omega} \right)^m \quad (1)$$

对各系数近似取值后得到:

$$S'_m = 0.0495 \frac{qJ}{\omega h} S \quad (2)$$

式中: K 为挟沙能力系数; η_g 为重力修正系数; q 为异重流单宽流量; J 为坡度; λ 为异重流阻力系数; h 为异重流厚度; ω 为泥沙颗粒沉速; m 为挟沙能力指数; S 为异重流含沙量。

由此可见,低含沙异重流的挟沙能力 S'_m 通常

较小,易造成水库淤积。4种常见的水库异重流淤积类型如下:

a. 在有持续后续浑水补给的情况下,水库异重流运动到坝前并排出水库,但在库区产生沿程淤积。由式(2)可以看出,在一般条件下异重流的挟沙能力远小于其含沙量,属于超饱和输沙。异重流在运动过程中经过粗沙和细沙的分选沉降,所挟带的悬沙颗粒细、沉速低,使得水库异重流产生均匀的沿程淤积。

b. 在有持续后续浑水补给的情况下,水库异重流运动到坝前,但泄流建筑物并没有及时开启,导致坝前淤积。异重流运行至坝前因挡水建筑物阻滞而爬高,底部含沙量持续增大,动能转化为势能,在坝前形成淤积,且淤积体的粒径下粗上细。这是因为式(2)中 q 减小, h 增大,使得异重流挟沙能力很小,造成泥沙在坝前淤积。

c. 在有持续后续浑水补给的情况下,水库异重流沿程所受阻力过大,没有运动到坝前而就地淤积。异重流在库底运动时受到交界面与河床的阻力,前锋不断克服阻力做功,动能转化为势能和热能。从式(1)和式(2)可以看出,异重流阻力系数和库区坡降会影响异重流的挟沙能力。当异重流经过弯道、突扩突缩断面及汇口处时,阻力系数将增大。另外,库区部分区段的坡降较小,使得挟沙能力降低,异重流不能运动到坝前,造成就地淤积。

d. 水库异重流形成后,途中失去后续浑水补给而不能运动到坝前,产生就地淤积。西南山区某些河流上游经历短时强降雨后,暴雨冲刷河道两岸形成浑水入库,并以异重流的形式在库底运动。由于降雨历时短,运动中的异重流将迅速失去后续浑水补给,使得动能和单宽流量减小,挟沙能力降低。随着清浑水的不断掺混和泥沙的沉降,清浑水的密度差越来越小,异重流的运动速度减缓,甚至停滞,造成水库淤积。

上述4种常见的水库异重流淤积类型均与其挟沙能力密切相关。由异重流的挟沙能力公式可以看出,异重流高程度的超饱和输沙和沿程流量损失是造成水库异重流淤积的关键性因素。

2 前锋运动规律试验

水库异重流引发的淤积与异重流的挟沙能力密切相关,而异重流的前锋厚度与速度决定了异重流的单宽流量,从而影响挟沙力。然而,现有的数值模拟技术还存在很多缺陷,原型观测也难以跟踪异重流的前锋运动情况^[11]。为研究异重流因沿程流量损失而造成水库淤积,同时为数值模拟提供参考,针对失去后续浑水补给的异重流前锋运动规律进行了水槽试验。

2.1 试验方案

2.1.1 试验装置

试验在两相流水槽中进行,试验装置见图 2^[12]。水槽系统由清水循环系统、浑水循环系统、进水系统、控制系统、水槽主体和出水口切换系统共 6 个部分组成,其中出水口的连通器设计可保证试验过程中水槽液面稳定。水槽为钢架结构玻璃水槽,主体长 20 m,宽 15 cm,高 1 m。水槽纵向共 17 个断面,断面间距为 120 cm。

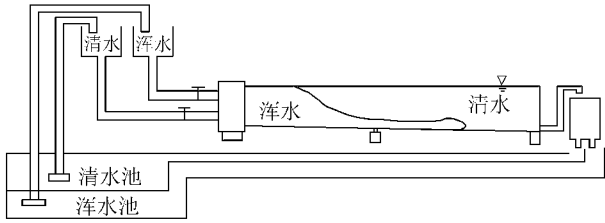


图 2 两相流试验水槽示意图

2.1.2 试验方法

首先开启清水阀,使水槽中形成有一定水深、稳定的清水流场。通过水槽进口旁的地下浑水池投入适当泥沙,经过水泵抽水搅拌,使泥沙与水充分混合,形成浑水。而后关闭清水阀,开启浑水阀,使浑水以全断面入流方式进入水槽,同时开始计时。待浑水潜入水槽底部形成稳定的异重流,便开始测量异重流的厚度和环境水深。当浑水运行至距槽首 10 m 处关闭浑水阀,继续观测异重流前锋的厚度和运动时间。待异重流运行至水槽末端时结束试验,开启槽尾闸阀排水。

2.1.3 试验设计

共进行了 6 组失去浑水补给条件下的异重流试验,6 组试验工况见表 1,并对工况 1、工况 2 进行了 2 组有持续浑水补给的异重流试验,以作对照。

表 1 无浑水补给的异重流试验工况

试验 工况	入口 水深/m	浑水入流流速/ ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	含沙量/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Re	Fr	坡降/%
1	0.3	1.27	0.063	3810	0.93	0.1
2	0.3	1.27	0.063	3810	0.93	0.5
3	0.3	1.24	0.072	3720	0.91	0.1
4	0.3	1.10	0.072	3300	0.73	0.1
5	0.3	0.98	0.072	2940	0.72	0.1
6	0.3	0.85	0.072	2550	0.62	0.1

试验采用 $d_{50} = 0.0149 \text{ mm}$ 的非均匀沙,干密度为 1667 kg/m^3 ,试验泥沙级配见表 2。

表 2 试验泥沙级配

D/mm	体积分数/%	D/mm	体积分数/%
< 0.004	10.83	< 0.026	75.95
< 0.005	14.63	< 0.039	89.45
< 0.010	33.76	< 0.052	95.00
< 0.013	45.30	< 0.079	98.91
< 0.017	57.92		

2.2 试验成果及分析

浑水进入水槽与清水短暂掺混后通常在距水槽进口 4 m 处潜入水槽底部运动,并在距槽首 6 m 附近趋于稳定,形成稳定的清浑水交界面。由于浑水密度较小,沙粒很细,潜入异重流的前锋呈云团状,扩散作用明显。运行过程中,前锋因受到交界面和水槽底部阻力,不断向上翻起,后又因重力作用迅速沉降于异重流头部,使得前锋厚度比后续过渡段的厚度略大。

当异重流运行至距槽首 10 m 处,在有稳定后续浑水补给的情况下,异重流的前锋厚度比较稳定,头部浓度较大,透明度小,交界面平缓,如图 3 所示。失去浑水补给的异重流,浑水由于细颗粒泥沙的絮凝、惯性和扩散作用继续前行。由于受到清浑水交界面与水槽底部的阻力,异重流运动速度变缓。部分泥沙颗粒沉降落淤,致使前锋厚度与过渡段厚度逐渐变小,整个水槽的异重流厚度趋于均匀化。异重流头部浓度减小,透明度加大,见图 4。前锋运行至水槽末端,开启底孔排水阀后,异重流的运行受到孔口抽吸作用,速度迅速加快。清浑水交界面清晰平坦,浑水水深缓慢减小。

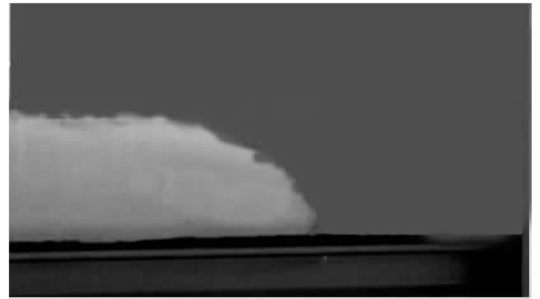


图 3 有持续浑水补给的异重流前锋

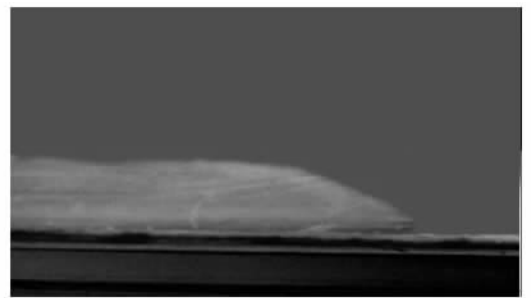


图 4 失去浑水补给的异重流前锋

2.2.1 前锋厚度

取浑水异重流头部较稳定的部分作为前锋厚度量测点,并设异重流前锋厚度与当地总水深的比值为 δ 。

为便于分析,设水槽长度为 L ,异重流头部距水槽进口的距离为 x 。工况 1 有持续浑水补给时,异重流 δ 全程维持在 0.5~0.6 之间,而无补给的 δ 由刚失去补给时的 0.58 降至 0.26,减小了 55%。整个

过程中,失去后续浑水补给的异重流前锋厚度沿程减小,如图 5(a)所示。工况 2 异重流前锋厚度在失去浑水补给后立即减小,至水槽末端, δ 由 0.61 降至 0.39,减小了 36%。而在相同坡度、含沙量和浑水入流流量的条件下,有持续浑水补给的异重流 δ 维持在 0.55 ~ 0.61 之间,如图 5(b)所示。可以看出,坡度越小,失去后续浑水补给的异重流前锋厚度变化越剧烈。这是因为坡度越小,泥沙受到重力的垂向分力越大,颗粒分选落淤,使得前锋厚度减小越快。

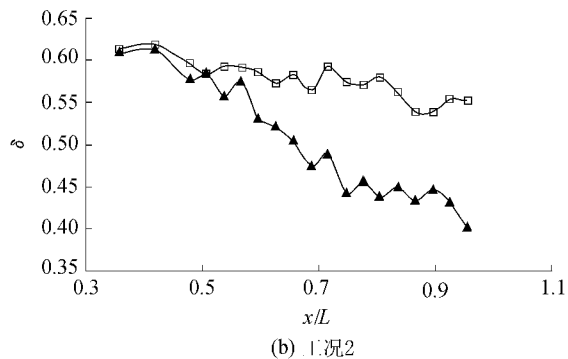
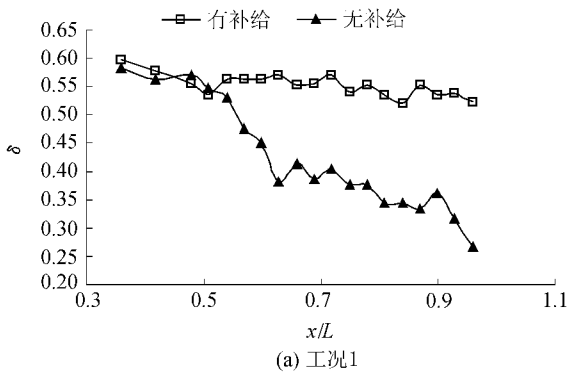


图 5 工况 1~2 前锋厚度与总水深比值沿程变化曲线

图 6 为工况 3~6 异重流前锋厚度与总水深比值沿程变化曲线。可以看出,工况 6 的前锋厚度变化迅速,异重流从失去浑水补给至运行到水槽末端, δ 由 0.56 降至 0.31,减小幅度为 45%;而工况 3~5 的前锋厚度减小幅度相差不大,分别为 32%, 33%, 34%。从试验结果来看,异重流在失去后续浑水补给后,前锋厚度的变化幅度和浑水入流流速有关,且总体趋势为浑水入流流速越大,前锋厚度的变化幅度越小,这是因为异重流的入流流速越大,挟沙能力

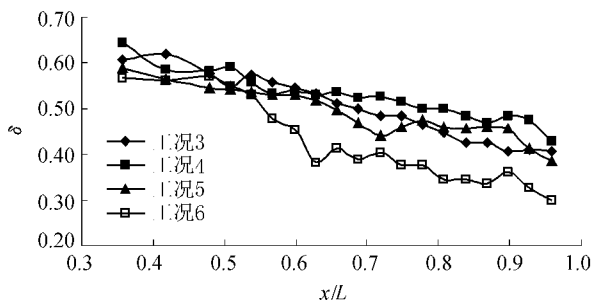


图 6 工况 3~6 前锋厚度与总水深比值沿程变化曲线

越强。在浑水入流流速较小的情况下,维持异重流继续运动的能量不断用于克服阻力做功,前锋部分由于能量耗散厚度减小较快。

2.2.2 前锋运动速度

图 7 为工况 1 和工况 2 异重流前锋运动时间沿程变化曲线。由图 7 可以看出,有持续浑水补给的异重流前锋运动时间沿程线性增加,前锋运动速度稳定,而失去浑水补给的异重流,前锋运动速度逐渐变缓。工况 1 中,待浑水异重流运行至水槽末端,无补给条件下的运行时间为 963 s,有补给条件下的运行时间为 886 s,前者比后者慢了 8.7%;工况 2 中,无补给条件下,异重流运行至水槽末端的运行时间为 913 s,有补给的条件下的运行时间为 877 s,前者比后者慢了 4%。在有补给条件下,工况 1 和工况 2 中,异重流运行至水槽末端的时间相差仅 1%,而无补给条件下两者相差 5%。有补给条件下的试验符合钱宁等^[13]指出的异重流头部的运动速度与库底的比降无关的结论。可以看出,失去浑水补给的异重流前锋速度和坡度有关。坡度越大,速度越快,这与有持续补给条件下的异重流不同。限于水槽长度,未观测到异重流完全停滞的情况,但异重流速度变化趋势是减小的。

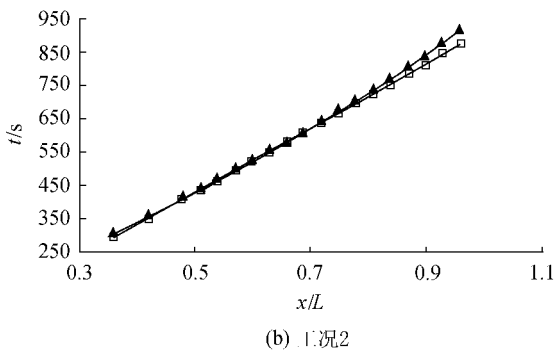
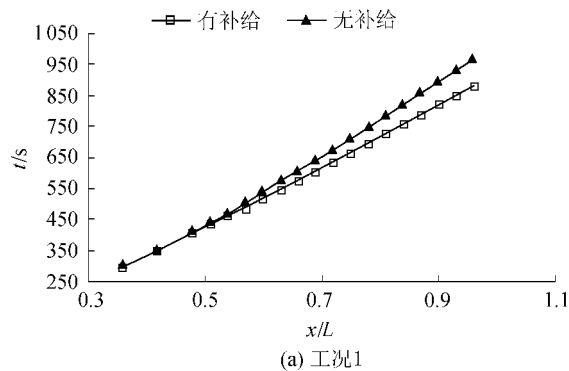


图 7 工况 1~2 异重流前锋运动时间沿程变化曲线

图 8 为失去补给的异重流在不同浑水入流流速下的沿程运动时间。其中,工况 6 的异重流运行时间较长,至水槽末端运动了 1025 s;工况 5 稍快,为 981 s;工况 4 和工况 3 分别为 933 s 和 921 s。4 组工况中,异重流运动时间最大相差约 10%,两者的浑

水入流流速相差 46%。可以看出,失去浑水补给条件下的异重流的运动时间与来流浑水流速有关。浑水入流流速越大,初始动能越大,异重流失去补给后的运动速度也越大。另外,即使异重流运动过程中失去后续浑水补给仍能运动很长一段时间。这是因为浑水异重流在交界面与清水掺混以后,沙粒并没有马上与清水分离沉淀,而是一边与清水掺混,一边沉降,一边分层继续流动。异重流在掺混过程中于交界面形成第二异重流,起到一定缓冲作用。因此,异重流在水库中往往可以持续运动很远的距离。随着后续浑水补给的失去,异重流的动能用于克服交界面和河床的阻力,加上泥沙的沉淀,使得清浑水的密度差越来越小,异重流的运动速度逐渐变缓。

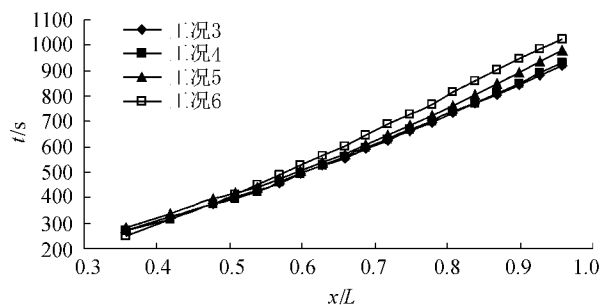


图 8 工况 3~6 异重流前锋运动时间沿程变化曲线

3 结论

a. 水库异重流的淤积,在有后续浑水补给的条件下包括沿程淤积、坝前淤积和就地淤积 3 种类型;在失去后续浑水补给的条件下则为就地淤积。

b. 异重流造成水库淤积的直接原因是异重流挟沙能力的降低,而异重流高程度的超饱和输沙和沿程流量损失是异重流造成水库淤积的关键性因素。

c. 静止环境水体中,在浑水入流含沙量、流速一定的条件下,异重流失去浑水补给后,前锋厚度逐渐变小,运动速度缓慢降低,且坡度越小,前锋厚度与运动速度减小越快;在浑水入流含沙量、水槽坡度一定的条件下,浑水入流流速越小,异重流前锋厚度与速度减小越快。而在有持续浑水补给的条件下,异重流的前锋厚度与环境水深的比值维持在 0.55~0.61 之间,前锋运动速度稳定。

d. 实际工程中,水库异重流形成后,当入库浑水流量减小时,异重流逐渐失去后续浑水补给,前锋厚度与运动速度将减小,导致异重流挟沙能力降低而发生水库淤积。此外,入库浑水流量及库区的坡降将影响异重流前锋厚度与运动速度的减小速率。

参考文献:

[1] 金德春. 浑水异重流的运动和淤积 [J]. 水利学报, 1981,

12(3) 39-48.

[2] SAVAGE S, BRIMBERG J. Analysis of plunging phenomena in water reservoirs [J]. J Hydraulic Res, 1975, 13(2) :187-205.

[3] SIMPSON J E. Gravity currents in the laboratory, atmosphere and ocean [J]. Ann Rev Fluid Mech, 1987, 14) :213-234.

[4] PARKER G, GARCIA M, FUKUSHIMA Y. Experiments on turbidity currents over an erodible bed [J]. J Hydraulic Res, 1987, 25(1) :123-147.

[5] ALEXANDER J, MULDER T. Experimental quasi-steady density current [J]. Marine Geol, 2002, 186 :195-210.

[6] 范家骅. 沉淀池异重流的试验研究 [J]. 中国科学: A 辑, 1984(11) :1053-1064.

[7] 范家骅. 浑水异重流槽宽突变时的局部掺混 [J]. 水利学报, 2005, 36(1) :1-8.

[8] 程桂福. 异重流运动速度与环境水流速度关系的研究 [J]. 泥沙研究, 1990(4) :77-81.

[9] 陈雅聪, 林秉南. 用盐水减少异重流泥沙淤积的试验研究 [J]. 泥沙研究, 2000(5) :32-36.

[10] 韩其为. 水库淤积 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.

[11] 李涛, 淡广鸣, 张俊华, 等. 水库异重流研究进展 [J]. 中国农村水利水电, 2000(9) :21-24.

[12] 赵琴, 李嘉, 安瑞冬. 水库浑水异重流的两相流模型适用性研究 [J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 2010, 25(1) :76-83.

[13] 钱宁, 万兆惠. 泥沙运动力学 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.

(收稿日期 2011-08-16 编辑 骆超)

· 简讯 ·

《Water Science and Engineering》 被 Scopus 数据库收录

由河海大学主办的英文版期刊《Water Science and Engineering》被 Scopus 数据库收录。Scopus 是 Elsevier 公司于 2004 年推出的多学科文摘索引型数据库,是目前全球最大的文摘和引文数据库,能为科研人员提供一站式获取科技文献的平台。来自世界各地不同领域著名科学家组成的甄选委员会指导 Scopus 收录内容的甄选,以确保其广泛而公正收录。截至 2011 年 12 月, Scopus 总计收录全世界期刊、会议论文集等 30794 种,其中期刊有 28169 种(包括同行评审期刊和开放存取期刊,被收录的中国期刊共有 927 种)。Scopus 数据库收录的内容涵盖数学、物理、化学、工程学、生物学、生命科学及医学、农业及环境科学、社会科学、心理学、经济学等学科领域。目前 Scopus 数据库每日更新,使科研人员及时全面地了解当今世界最新的科研成果。读者可以从网站 www.info.scopus.com 或 china.elsevier.com 了解相关新闻,通过 www.scopus.com 检索文献信息,查询被 Scopus 收录的论文及其被引用情况。

(本刊编辑部供稿)