

浊度型清浑水交界面识别方法及其在水库异重流观测中的应用

严忠奎¹, 安瑞冬¹, 李 嘉¹, 李 永¹, 邓良胜²

(1. 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;

2. 四川省紫坪铺开发有限责任公司, 四川 成都 610091)

摘要:针对传统异重流观测方法不利于对异重流进行实时追踪的问题,基于浊度型清浑水交界面的概念,提出浊度型清浑水交界面识别方法,并将其应用于紫坪铺水库汛期浑水异重流观测。该方法利用浊度值突变能判定异重流交界面位置,利用浊度型清浑水交界面描述异重流前锋厚度和浓度外边界线,并将异重流交界面位置确定在 1.2~3.5 m 厚的水层内,同时还分析了地形变化对异重流运动规律的影响。异重流原型观测结果表明,浊度型清浑水交界面识别方法可以作为水库汛期监测异重流的有效手段。

关键词:浑水异重流;清浑水交界面;水库观测;水温

中图分类号:TV145⁺.24

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2013)06-0071-05

Turbid interface identification method of turbidity currents and its application in field observation at Zipingpu Reservoir//YAN Zhonglun¹, AN Ruidong¹, LI Jia¹, LI Yong¹, DENG Liangsheng²(1. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. Sichuan Province Zipingpu Development Co., Ltd., Chengdu 610091, China)

Abstract: The turbidity currents are observed in traditional methods which aren't suitable for the real-time observation. Therefore, based on the concept of the turbidity-interface between turbid water and clear water, this paper proposes an interface identification method that can be applied in the field observation of turbidity currents at reservoir during floods. By analyzing the sudden change in water turbidity, this method can locate the position of the interface within a water layer thick of about 1.2 m to 3.5 m. Then the front thickness and outer boundary of transition region can be illustrated by using the concept of the interface proposed in the present paper. In addition, the paper also analyzed the impact on the performances of turbidity currents caused by topography variation. On all accounts, the results show that the method is effective for monitoring the turbidity currents at reservoir during the floods.

Key words: turbidity currents; interface between turbid water and clear water; reservoir observation; water temperature

汛期暴雨冲刷河道两岸,挟带大量泥沙形成浑水入库,在适当条件下,浑水会潜入库底形成水库水沙异重流,并可能运动到坝前,通过泄水建筑物排出库外。但若后续能量不足,异重流携带的泥沙将沿程落淤,减小水库有效库容,长此以往势必影响水库的使用寿命。因此,研究异重流的运动特性能够对水库的淤积情况进行预测,为实现人工塑造异重流以及水库异重流多目标调度提供科学依据,具有重要的工程意义和学术价值。

国内外针对异重流的研究开展已久,主要的研

究成果集中在模型试验和数值模拟方面。Alexander等^[1]在2002年利用玻璃水槽,通过改变入流流量和水槽坡度进行异重流试验,得到前锋厚度与流量、坡度、粒径及含沙量的关系;An等^[2]在2010年针对浑水异重流潜入点的水力学特性,在两相流玻璃水槽中进行了16组试验,利用粒子成像测速(PIV)对浑水异重流潜入点附近的流场进行了测量,得到了潜入点附近水体的反向速度及回流图像;Francois等^[3]在2004年采用二维数学模型模拟了不同底坡倾角条件下的异重流运动情况,计算得到异重流运

基金项目:国家自然科学基金(51109148);四川大学青年教师科研启动基金(2011SCU11113)

作者简介:严忠奎(1988—),男,福建连江人,硕士研究生,主要从事环境水力学研究。E-mail:yanz0213@163.com

通信作者:安瑞冬(1983—),男,天津人,副研究员,博士,主要从事环境水力学研究。E-mail:anruidong@scu.edu.cn

动速度和水流定性特征,与异重流试验现象描述一致;李永等^[4]在2009年采用基于两相流理论的ASM(algebraic slip mixture)模型,对异重流的潜入、前锋形态及推进速度进行了模拟。目前国内已有一些高含沙河流异重流原型观测方面的成果,如官厅水库、红山水库、小浪底水库等^[5-7],但鲜有低含沙量河流水库异重流运动观测成果的报道,究其原因主要是观测手段的缺乏。对于快速、动态的水沙异重流运动变化过程,传统方法难以进行实时追踪,这无疑会延误异重流的观测时机。2004年黄河第3次调水调沙试验中采用了光电式浑水界面探测器对异重流进行观测^[8],该仪器的使用无疑提高了水库异重流的测量精度和效率。但将浑水交界面临界含沙量定义为 $1\text{kg}/\text{m}^3$,含沙量测量精度为 $\pm 0.2\text{kg}/\text{m}^3$,对于高含沙异重流监测追踪有较强的适用性,而对于低含沙河流异重流的原型观测还需验证。为此,本文根据浊度与含沙量的关系,提出一种适用于低含沙河流异重流原型观测的方法,该技术可以快速地确定异重流交界面位置,该方法在紫坪铺水库原型观测中取得了较好的应用效果。

1 浊度型浑水交界面

1.1 定义

在水库中,当浑水初遇清水时,两种水体的碰撞使得垂向断面上含沙量分布均匀。随着后续浑水的补充及粗颗粒泥沙受重力作用向下运动,浑水水体间密度差增大,压力差在断面底部达到最大,使得浑水潜入清水底部形成异重流。至此,交界面由潜入点开始形成,并随着异重流的运动而发展。而事实上,交界面并非一个截然分明的面,而是具有一定厚度、密度及流速等物理量梯度分布的过渡层。

在异重流形成后的过渡阶段,浑水具有较大动能,含沙量垂向分布均匀,交界面上泥沙扩散作用强烈,过渡层较厚且其边界模糊不清;当异重流运动达到稳定后,交界面上掺混达到一定的平衡状态,过渡层的边界逐渐变得清晰。但无论过渡层的厚薄如何,在清水层、过渡层与浑水层之间浊度必然存在沿深度方向的变化。由此本文定义,由过渡层内浊度突变位置构成的交界面为浊度型浑水交界面。若在异重流原型观测中,能通过浊度对异重流进行快速定位,就可以迅速确定潜入点位置、前锋位置及前锋厚度,对于异重流原型观测和水库利用异重流进行排沙工作有一定的参考意义。

1.2 识别技术

以往在水沙异重流原型观测中,通常以含沙量的变化来分析异重流的运动规律,且异重流浑水水

样的采集和含沙量的测定是异重流原型观测的重要内容。但现场水沙异重流水样采集工作难度大且耗费时间,水样经长时间搁置又容易破坏含沙的原始状态,再经过实验室采用如振动管法^[9]、超声波法^[10]及 γ 射线法^[11]等方法分析,对含沙量的测量结果影响大、效率低且不利于异重流观测时现场使用。同样现场测量时交界面位置是通过视觉观测及人工判断,这样做显然不够科学。可见传统的异重流观测方法在观测精度和效率方面有所欠缺,对于异重流的快速变化很难及时作出反应,容易延误利用异重流清淤排沙的时机。

本文基于前期研究中进行的含沙量与浊度关系的试验^[12],开展紫坪铺水库含沙量与浊度关系的试验。试验采集岷江紫坪铺库区泥沙,在实验室内烘干,再充分搅拌后配置成10种含沙量低于 $2.5\text{kg}/\text{m}^3$ 的水样进行试验,得到结果如图1所示。

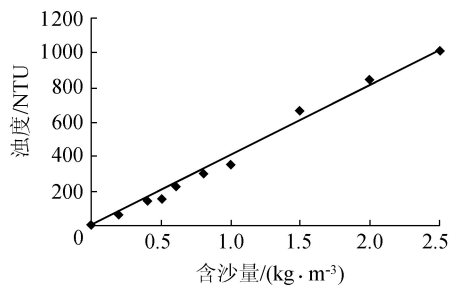


图1 含沙量与浊度的关系

由图1可以看出,含沙量与浊度具有很好的线性关系,根据试验数据可拟合出含沙量与浊度的线性方程如下:

$$T = 405.91C \tag{1}$$

式中: T 为浊度,NTU; C 为含沙量, mg/L 。

浊度型浑水交界面识别方法正是基于浑水交界面的研究及含沙量与浊度之间的关系而建立的观测方法。应用浊度传感器可自动记录断面上垂向浊度分布,通过判断数据突变位置,来实现浑水交界面位置的确定,继而快速反映异重流潜入点位置、前锋厚度等要素,从而提高异重流的观测效率。因此,浊度型浑水交界面识别方法在水库异重流原型观测中的应用具有可行性。

异重流观测采用走航方式进行,利用全球定位系统GPS进行库区测量点的定位,采用激光测距仪测量水面宽度。在应用浊度传感器和温度传感器记录断面上垂向浊度与温度分布的同时,进行水样采集工作。应用浊度传感器时采用 90° 散射法,通过观测水体中散射光线强度来测量水体的浑浊程度,测量范围为 $0\sim 1\,000\text{NTU}$,分辨率为 0.1NTU ,精度为 $\pm 5\%$ 。

2 水库异重流观测

紫坪铺水利枢纽位于四川省成都市西北 60 余 km 的岷江上游都江堰市麻溪乡,水库总库容 11.12 亿 m³,工程坝址以上控制流域面积 22662 km²,多年平均流量 469 m³/s,年径流总量 148 亿 m³,水库水温呈分层结构,属不完全年调节型水库。1955—1990 年多年平均悬移质输沙量为 792 万 t,多年平均含沙量为 0.572 kg/m³,汛期(7—9 月)输沙量占年输沙量的 98.3%。

由于岷江上游普降暴雨,观测当日紫坪铺入库流量由 370 m³/s 增加到 640 m³/s,洪水挟沙入库往往是异重流运动的诱发因素,本次水库异重流观测断面共有 12 个,其布置见图 2,断面距坝里程见表 1。

表 1 断面距坝里程

断面编号	距坝里程/km	断面编号	距坝里程/km
1	16.7	7	10.8
2	15.5	8	9.9
3	14.1	9	8.4
4	12.5	10	7.4
5	13.7	11	5.5
6	11.3	12	1.3

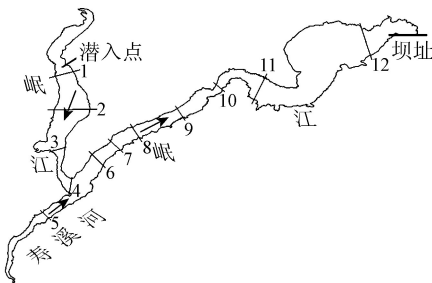


图 2 观测断面布置示意图

2.1 异重流潜入段特性

观测船行至库尾 1 号断面时,观测到该断面上游有大面积的垃圾漂浮带,且表面水体浑浊,该现象与潜入点的标志相符。结合 1 号、2 号和 3 号断面的观测数据分析潜入段的浊度和温度变化,如图 3 和图 4 所示。通过分析垂向浊度分布数据可以发现,在 1 号断面,水深 1.5~2.7 m 之间的浊度由 34 NTU 增大到 131 NTU,浊度变化梯度为 78.6 NTU/m,根据清浑水交界面定义,可以判断该断面的清浑水交界面位置在水深 1.5~2.7 m 之间;同样可以判断 2 号与 3 号断面的清浑水交界面位置分别在水深 2.0~3.6 m 和 1.3~2.5 m 范围内,3 个断面间异重流厚度沿程增大。分析水温分布数据可以发现,在 1 号断面,水深 1.5 m 处的水温突然升高,至 6.6 m 处又开始降低;在 2 号和 3 号断面,水温的影响主要集中在断面底部,底部温度与其断面上温度拐点处的温差

均达到 0.2℃,同时在温度拐点处的浊度也发生较大变化。由此可以推断挟沙水流在 1 号断面上游已经潜入并形成异重流,再经过 2 号断面,运动到 3 号断面时已经趋于稳定,且异重流在影响库区垂向水体含沙量分布的同时也对水温结构造成破坏。

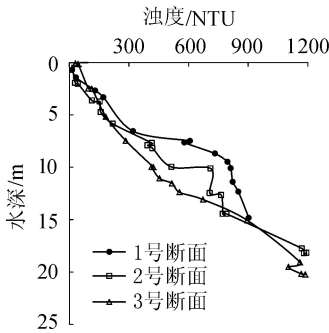


图 3 潜入段各断面垂向浊度分布

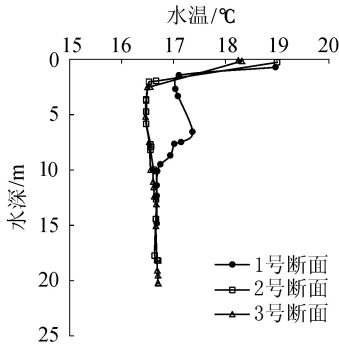


图 4 潜入段各断面垂向水温分布

2.2 异重流潜流段及前锋段特性

7~12 号断面的垂向浊度分布如图 5 所示。7、8、9 号断面的垂向浊度突变点位置分别处于水深 14.2~16.2 m、22.3~24.6 m 和 24.3~27.8 m 的范围内,显然清浑水交界面位置在潜流段沿程不断变深。在 10 号断面上,浊度突变位置的深度明显减小,清浑水交界面位于水深 18.6~20.3 m 之间,而 11 号和 12 号断面的距坝里程分别为 5.5 km 和 1.3 km,两断面上垂向浊度最大值仅为 32.7 NTU,而 9 号和 10 号两断面上垂向浊度最大值分别达到 1036 NTU 和 810 NTU,远大于 11 号与 12 号两断面

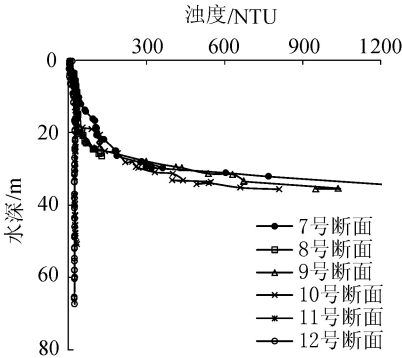


图 5 潜流段和前锋段各断面垂向浊度分布

的浊度最大值,因此可以推断异重流前锋已经运动到距坝 5.5~7.4 km 之间的河段,11 号与 12 号两断面同一深度的水体浊度相差不到 3 NTU,可以肯定 11 号断面的水体未受到异重流的影响且异重流前锋所在位置更靠近 10 号断面。

各段面的垂向温度分布如图 6 所示,分析可以发现 7~10 号断面上垂向水温拐点位置在水深 14.2~25.1 m 之间变化,而除 10 号断面外,7~9 号断面的温度拐点位置与其浊度突变位置同步变化,说明 10 号断面水温受异重流影响的时间较短,库底水温已受异重流影响而升高,中层水体水温还未发生变化或受影响较小。从库底水温变化来看,11 号断面在水深 35 m 处的水温比 10 号断面低 0.8℃,而与 7 号断面之间的温差可达 1.25℃。由此可见,异重流运动对水库水温结构的影响由库底向上发展,受异重流影响时间越长,水温结构破坏程度越大。

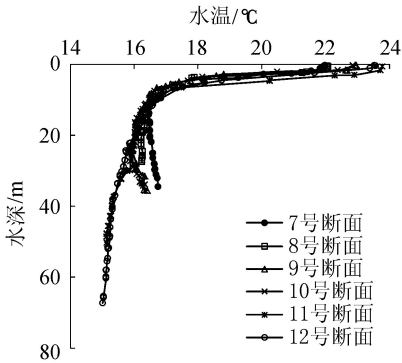


图 6 潜流段和前锋段各断面垂向水温分布

2.3 地形变化的异重流特性

库区浊度、水深与水面宽度的沿程变化如图 7 所示。处理数据过程中发现在浊度突变点的水深范围内,相应的浊度值在 50~150 NTU 范围内变动且大部分浊度值接近 100 NTU,因此以浊度值为 100 NTU 的等值线作为此次原型观测中的清浑水交界面。从 1 号到 4 号断面水库库底坡度基本不变,但水面宽度变化较大。在从 1 号到 3 号断面的运动过程中,异重流运动速度较快,因此其受水面宽度的影响很小,很快趋于稳定并保持较好的运动形态,而异重流厚度增大有可能是因较大的流速将沿程淤积的泥沙从库底卷进异重流所致。而从 3 号到 4 号断面沿程为深切的 V 形河谷,由宽河段进入窄河段,受到河槽束窄的作用,异重流的厚度有所增加^[13]。

4 号到 6 号断面之间的河段由寿溪河支流从 5 号断面汇入,4 号断面靠近汇口,汇口以下至 9 号断面河段水面宽度基本不变,河道相对顺直,而 4 号到 6 号断面间异重流厚度的减小,可能是异重流在流经 4 号断面后于汇口处遇支流汇入,水体碰撞损失

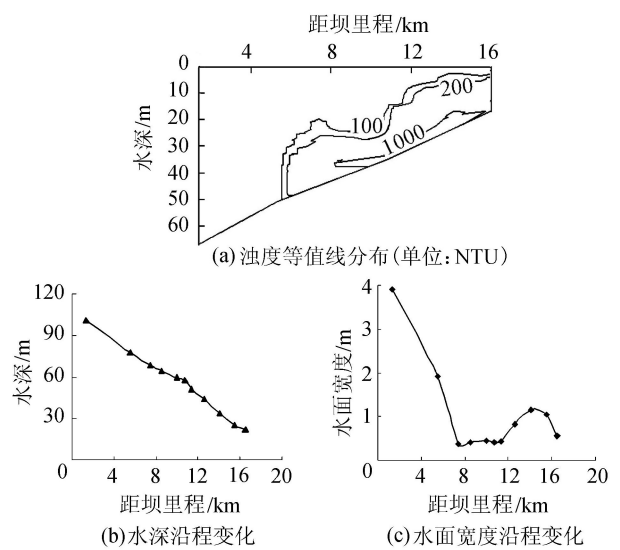


图 7 库区浊度、水深与水面宽度的沿程变化

部分能量,而水面突然拓宽也降低了流速,水流挟沙能力下降,异重流厚度变薄,而进入顺直河道后,异重流流速开始增大并形成稳定的异重流形态,但相对 4 号断面,异重流厚度减小。6 号到 9 号断面,水面宽度基本不变,异重流在形态上趋于稳定,异重流厚度随水深增大而增加。在异重流由 9 号断面运动至 10 号断面的过程中,异重流核心不再沿库底运动,断面上垂向浊度呈现先增加再减小的趋势,原因可能是该河段底坡较 7 号到 9 号断面间的河段底坡突然增大,水深增加明显,而异重流核心部分惯性力较大,依旧能保持原先的运动趋势。

2.4 低含沙量异重流

前文所提及的官厅水库、红山水库及小浪底水库的多年平均含沙量均大于 15 kg/m³^[14],而位于西南山区岷江上游的紫坪铺水库多年平均含沙量仅为 0.572 kg/m³。与文献[15]中小浪底异重流形成的含沙量下限条件(10 kg/m³)比较,位于低含沙河流岷江上游的紫坪铺水库的异重流形成时的含沙量要小很多,原因可能是西南山区天然落差大,岷江上游 340 km 长河段的天然落差为 3 009 m,浑水来流在高坡降的河道上运动后,在进入紫坪铺水库时已具有较大的动能,使得浑水潜入形成异重流。可见,该原型观测在验证浊度型清浑水交界面识别技术的适用性的同时,填补了西南山区低含沙量河流水库异重流观测资料的空白,进一步补充了低含沙量河流异重流观测资料,对低含沙量河流水库管理及泥沙运动研究有一定的参考意义。

3 结 论

a. 基于浊度型清浑交界面概念的交界面识别方法在紫坪铺水库异重流观测中应用效果良好,成

功地捕捉到了低含沙量条件下的异重流现象,并将浑水交界面的位置确定在 1.2 ~ 3.5 m 厚的水层内,同时这也是首次在西南山区低含沙河流水库中观测到异重流现象,是对该区域异重流资料空白的填补。

b. 通过浊度分析发现,在异重流从潜入到稳定的过程中,异重流的厚度受河段水面宽度影响较小,而流速增大使其挟沙能力增强,能将沿程淤积的泥沙卷进浑水内,并增加自身浑水层厚度;稳定后的异重流在支流汇入后,由于水体的碰撞及河宽突扩的影响,异重流厚度减小;在异重流能量足够的情况下,异重流能迅速恢复先前运动形态。

c. 温度数据的分析显示汛期高温异重流会破坏水库的水温结构,先造成水库底层水温升高,水温影响范围从库底向上发展,且对于受影响较久的水体,温度拐点靠近浊度突变点位置。

参考文献:

[1] ALEXANDER J, MULDER T. Experimental quasi-steady density currents [J]. Marine Geol, 2002, 186 (3): 195-210.

[2] AN Ruidong, LI Jia. Characteristic analysis of turbidity currents plunging [J]. Journal of Hydrodynamics: Ser B, 2010, 22 (2): 274-282.

[3] FRANCOIS B, VINCENT P, ECKART M, et al. Evaluation of simplified approach for simulating gravity currents over slopes of varying angles [J]. Computers & Fluids, 2006, 35 (5): 492-500.

[4] 李永, 李嘉, 安瑞冬. 水沙两相流 ASM 模型在浑水异重流计算中的应用及模型试验研究 [J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2009, 41 (4): 102-108. (LI Yong, LI Jia, AN Ruidong. The application of water-sediment two phase flow ASM model in the density current of turbid water and related model test study [J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2009, 41 (4): 102-108. (in Chinese))

[5] 侯晖昌, 焦恩泽, 秦芳. 官厅水库 1953—1956 年异重流资料初步分析 [J]. 泥沙研究, 1958 (2): 70-94. (HOU Huichang, JIAO Enze, QIN Fang. The preliminary analysis of the turbidity current datas from 1953 to 1956 in Guanting Reservoir [J]. Journal of Sediment Research, 1958 (2): 70-94. (in Chinese))

[6] 曹如轩. 天然高含沙水流流变与流态的观测分析 [J]. 人民黄河, 1983 (1): 20-24. (CAO Ruxuan. The observation and analysis of rheology and pattern of the natural hyperconcentrated flow [J]. Yellow River, 1983 (1): 20-24. (in Chinese))

[7] 侯素珍, 焦恩泽, 林秀芝, 等. 小浪底水库异重流运动特征分析 [J]. 泥沙研究, 2004 (5): 46-50. (HOU Suzhen,

JIAO Enze, LIN Xiuzhi, et al. Analysis on the movement characters of the density current in Xiaolangdi Reservoir [J]. Journal of Sediment Research, 2004 (5): 46-50. (in Chinese))

[8] 王庆中, 陈富安, 王秀清, 等. 浑水界面探测器在水库异重流测验中的应用 [J]. 人民黄河, 2006, 28 (2): 67-68. (WANG Qingzhong, CHEN Fu'an, WANG Xiuqing, et al. The application of interface probe of clear-muddy water in the field turbid current test in reservoir [J]. Yellow River, 2006, 28 (2): 67-68. (in Chinese))

[9] 李廷生. 振动管式含沙量测量原理研究 [J]. 泥沙研究, 1985 (3): 26-35. (LI Tingsheng. A study on the principle of measuring sediment concentration by vibratory pipe [J]. Journal of Sediment Research, 1985 (3): 26-35. (in Chinese))

[10] 方彦君, 唐懋官. 超声衰减法含沙量测量研究 [J]. 泥沙研究, 1990 (2): 1-12. (FANG Yanjun, TAN Maoguan. Ultrasonic attenuation method for measuring sediment concentration [J]. Journal of Sediment Research, 1990 (2): 1-12. (in Chinese))

[11] 方彦君, 张红梅, 程瑛. 含沙量测量的新进展 [J]. 武汉水利电力大学学报, 1999, 32 (3): 55-57. (FANG Yanjun, ZHANG Hongmei, CHENG Ying. Progress of sediment concentration measurement [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 1999, 32 (3): 55-57. (in Chinese))

[12] 彭永勤, 李克锋, 曹薇. 利用浑浊度推算含沙量方法的限制性与适用性研究 [J]. 四川环境, 2009, 28 (1): 20-23. (PENG Yongqin, LI Kefeng, CAO Wei. The restriction and applicability for the method of using turbidity to deduce sand content [J]. Sichuan Environment, 2009, 28 (1): 20-23. (in Chinese))

[13] 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. (FAN Jiahua. Local entrainment of turbid density current in width abrupt changed channel [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36 (1): 1-8. (in Chinese))

[14] 姜乃森. 官厅水库淤积上延问题的初步分析 [J]. 泥沙研究, 1985 (1): 61-69. (JIANG Naisen. A preliminary analysis of deposition-extension in Guanting Reservoir [J]. Journal of Sediment Research, 1985 (1): 61-69. (in Chinese))

[15] 李书霞, 张俊华, 陈书奎, 等. 小浪底水库塑造异重流技术及调度方案 [J]. 水利学报, 2006, 37 (5): 567-572. (LI Shuxia, ZHANG Junhua, CHEN Shukui, et al. Formation of density current by means of reasonable operation of reservoir in Xiaolangdi Project [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37 (5): 567-572. (in Chinese))

(收稿日期: 2012-01-07 编辑: 周红梅)