

# 2014年汛期小浪底库区异重流演进规律分析

李向阳<sup>1</sup>, 许立祥<sup>1,2</sup>, 解赞琪<sup>1</sup>, 严军<sup>2</sup>

(1. 黄河水利委员会水文局, 河南 郑州 450004; 2. 华北水利水电大学, 河南 郑州 450011)

**摘要:** 2014年汛期,通过对万家寨、三门峡、小浪底水库进行水沙联合调度,塑造了小浪底水库异重流,并实测异重流在潜入点区、库内演进区和坝前区的演进数据。分析得出:在潜入点区垂向上,异重流厚度变化与来流量同步,平均流速从上到下逐渐增大;横向上,平均流速与含沙量主流较大,边流较小。在库内演进区,异重流厚度在同1天内沿程增加,靠近坝前出现壅高,平均流速总趋势沿程递减;沿来流方向,由前断面含沙量大于后断面逐渐变为后断面大于前断面;在坝前区横向上,异重流厚度增加;在垂向上,当出水口、排沙洞开启后,平均流速在清水层底部与异重流底部分别出现极值,含沙量在异重流底部也出现极值。通过本次对小浪底水库异重流的运动规律分析,为最优水库调度提供支撑,从而减少库区淤积、延长水库的使用寿命。

**关键词:** 异重流; 潜入点区; 库内演进区; 坝前区; 演进规律; 小浪底水库

中图分类号:TV145+.24

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2017)06-0163-05

## Density current motion analysis of Xiaolangdi reservoir in 2014 flood season

LI Xiangyang<sup>1</sup>, XU Lixiang<sup>1,2</sup>, XIE Zhanqi<sup>1</sup>, YAN Jun<sup>2</sup>

(1. The Yellow River Conservancy Commission Hydrographic Office, Zhengzhou 450004, China;

2. North China University of Water Conservancy and Hydropower, Zhengzhou 450011, China)

**Abstract:** In the flood season of 2014, through the joint operation of water and sediment in Wanjiashai, Sanmenxia and Xiaolangdi reservoirs, the gravity flow of Xiaolangdi Reservoir was shaped and the evolution data of the density flow at the dive site, the reservoir evolution area and the dam front area were measured. In the vertical direction of the submerged point, the analysis shows that the variation of the thickness of density flow synchronizes with the incoming flow, and the average flow velocity gradually increases from top to bottom. In the horizontal direction, the average flow velocity and sediment concentration are larger and the edge flow is smaller. In the evolution area of the reservoir, the thickness of density flow increases along the way in the same day and the height appears near the dam, and the general trend of the average flow rate decreases along the course. In the direction of the incoming flow, the sediment concentration in the front section becomes larger than that in the posterior section. In the vertical direction, when the outlet and the drain hole are opened, the average flow velocity appears two extremums in clear water layer and density flow layer's bottom, with sediment concentration's extremum appearing in the bottom of density current. Through the analysis of the movement of density current in xiao langdi reservoir, it can provide technical support for optimizing the reservoir scheduling, in order to reduce sedimentation, and prolong the service life of the reservoir.

**Key words:** density current; plunging point areas; evolving areas in reservoir; areas in front of the dam; evolution law; Xiaolangdi reservoir

## 1 研究背景

小浪底水库是我国在黄河中游建设的用于防

洪、供水、发电和调沙的大型水库之一<sup>[1]</sup>,也是治理开发黄河的关键性工程<sup>[2]</sup>,其排沙形式主要为利用异重流排沙出库。“异重流”是当高含沙水流进入

收稿日期:2017-08-15; 修回日期:2017-10-20

作者简介:李向阳(1967-),男,宁夏青铜峡人,大学本科,高级工程师,研究方向为水文水资源。

通讯作者:许立祥(1990-),男,河南信阳人,硕士研究生,研究方向为港航航道与近海工程。

水库遭遇库区清水后,由于密度差而潜入清水底部运行的一种现象<sup>[3]</sup>。在多沙河流水库中较为常见<sup>[4]</sup>,水库异重流的研究起源于20世纪40年代,美国米德湖蓄水后水库底孔排出浑水,表明异重流可以挟带大量泥沙历经长距离而不与清水相混。在异重流运动规律方面,国内外进行了深入的研究,法国谢都水利试验所曾对异重流的各种特性进行过比较系统的研究<sup>[5]</sup>。1953年,在我国官厅水库首次发现异重流排沙现象,之后国内对异重流排沙的研究逐渐展开,并取得了众多的研究成果。冯慧<sup>[5]</sup>通过对小浪底水库2010年异重流各水文要素和库区进出口水沙变化数据观测,认为小浪底水库利用异重流排沙是行之有效的;王燕<sup>[6]</sup>通过对黄河口高浓度泥沙异重流过程现场观测,对异重流排沙进行过数值模拟。在水库异重流的整个发展过程中,按异重流在水库中的不同演进部位可划分为潜入点区、库内演进区和坝前区3个部分。朱素会等<sup>[7]</sup>通过2001-2009年小浪底水库调水调沙试验数据,分析小浪底水库异重流潜入点的形成条件、水力学特征以及潜入点区流速、含沙量垂向分布的特点;侯素珍<sup>[8]</sup>利用2001年洪水期小浪底水库异重流的水沙观测资料,对异重流在小浪底库区演进过程中的特点进行了分析;张保伟等<sup>[9]</sup>通过水库联合调度的实测数据对小浪底水库坝前异重流厚度变化进行了分析。前人的研究表明,利用异重流排沙是减少水库淤积、

延长水库寿命的一条重要途径<sup>[6]</sup>。研究小浪底水库异重流的发生条件、发展过程、运行速度、挟沙能力、以及到达坝前的时机,可为小浪底水库在异重流期间排沙和开展最大排沙量及最优排沙时段提供预报服务,意义重大<sup>[10]</sup>。

## 2 试验方案及测验项目

2014年6月29日至7月9日,黄河水利委员会组织实施调水调沙生产运用,通过万家寨、三门峡、小浪底水库联合调度,塑造小浪底水库异重流。调水调沙期间小浪底水库异重流测验由河南水文水资源局承担。小浪底水库异重流监测的主要目的是在小浪底水库出现异重流时,对异重流各种水文要素在垂线方向、横断面方向及沿程变化进行观测。具体的测验项目包括:异重流潜入点位置、时间、沿程各控制断面异重流的厚度、流速、含沙量的变化及泄水建筑物开启情况等,同时还要观测库区水位的变化和进出库水沙量的变化过程。

### 2.1 断面选取

本次试验根据《2014年汛前黄河调水调沙预案》和《2014年汛前黄河调水调沙原型观测任务书》的目标和要求,在小浪底库区共布设2个异重流基本测验断面和2个异重流辅助测验断面。基本断面分别为HH01、HH04;辅助断面为潜入点断面、HH06断面。异重流各测验断面布设见图1。

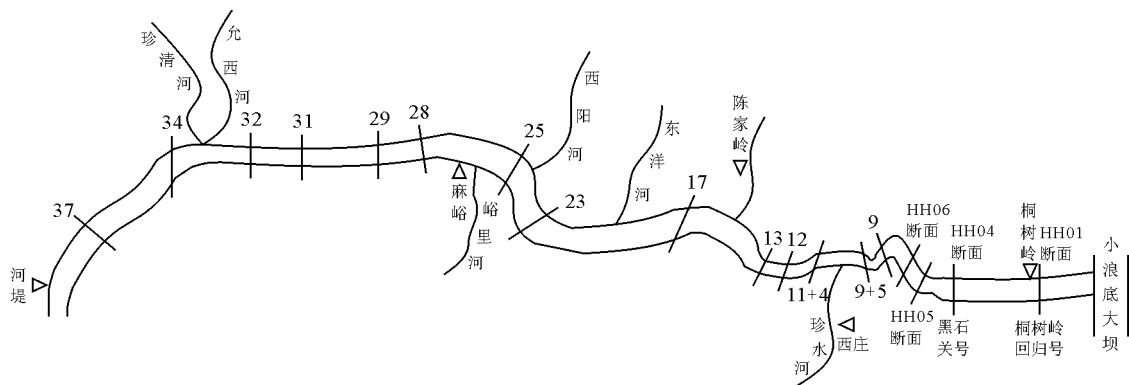


图1 2014年小浪底水库异重流测验断面布设

### 2.2 试验方式

2014年小浪底水库异重流观测启用4条机动船,采用停船抛锚,利用GPS为测船定位。

起点距:采用GPS定位的方式直读起点距。

水深:各断面统一采用100kg重铅鱼测深。铅鱼均安装水面、河底信号自动测量水深,每条垂线均施测两次水深取其平均值。

泥沙:采用铅鱼悬挂两仓横式采样器进行取样并加测水温,泥沙处理采用电子天平称重,用置换法计算含沙量;颗粒分析采用激光粒度分析仪处理。

流速:采用铅鱼悬挂流速仪进行测验,根据流速大小分别采用LS25-3型和LS78型流速仪。流向测验采用细钢丝绳悬吊小重物(用水温计替代),在不同流向层内测得最小偏角时的水深,然后取两流

向相反的相邻测点水深值的算术平均值,作为流向变化的分界点,流向朝向大坝方向(下游)为正值,相反为负值。

### 3 异重流发展分析

#### 3.1 潜入点区

3.1.1 潜入点区的水力学特征 范家骅等<sup>[11]</sup>根据理论分析及水槽实验结果分析,得出如下异重流潜入点判断公式:

$$Fr^2 = \frac{V_0^2}{\eta_g g h_0} \quad (1)$$

式中:  $Fr$  为佛汝德数;  $V_0$  为垂线平均流速,  $m/s$ ;  $h_0$  为垂线水深,  $m$ ;  $\eta_g$  为重力修正系数,  $\eta_g = \frac{\gamma' - \gamma_0}{\gamma'}$ , 其中  $\gamma'$ 、 $\gamma_0$  分别为浑水容重和清水容重,  $\gamma' = \gamma_0 + (1 + \frac{\gamma_0}{\gamma_s})C_s$ ,  $C_s$  为含沙量,  $kg/m^3$ 。

引入潜入点的佛汝德数( $Fr$ )描述潜入点区的水力学特征,以修正佛汝德数( $Fr$ )判定潜入点出现的位置(表 1)。佛汝德数( $Fr$ )代表惯性力与重力的比值,当  $Fr > 1$  时为急流,当  $Fr < 1$  时为缓流<sup>[12]</sup>。若拐点处水深和流速为  $h_k$  和  $v_k$ ,则该断面  $Fr^2 = \frac{V_k^2}{\eta_g g h_k} =$

1,而潜入点的水深  $h_0 > h_k$ ,因此  $Fr^2 = \frac{V_0^2}{\eta_g g h_0} < 1$ 。

表 1 潜入点佛汝德数计算值

日期	潜入点位置断面	水深/ m	平均 流速/ ( $m \cdot s^{-1}$ )	佛汝 德数 $Fr$
2014-07-05	HH05 断面	5.3	0.28	0.23
2014-07-05	HH05 断面上游 140m	6.1	1.17	0.93
2014-07-06	HH05 断面上游 240m	10.5	0.72	0.62
2014-07-07	HH05 断面上游 530m	11.5	0.35	0.59
2014-07-08	HH05 断面上游 320m	9.1	0.42	0.81

3.1.2 潜入点区实测情况 选取 HH05 断面做为基础断面,2014 年 7 月 5 日 17 时,随着上游来流量的增加,潜入点位置从 HH05 断面上移至 HH05 断面上游 140 m,7 月 6 日 7 时 10 分,潜入点位置继续上移至 HH05 断面上游 240 m,且异重流厚度不断增大;从 7 月 7 日 7 时 15 分开始,当上游来流量减小,潜入点位置从 HH05 断面上游 530 m 开始下移,到 7 月 8 日 7 时 12 分,异重流潜入点位置下移至 HH05 断面上游 320 m,且异重流厚度逐渐变小,随着上游来流量的减小,异重流强度减弱,直至消失。出现异重流时,各断面的实测数据见表 2。

表 2 潜入点测验统计

日期	时刻	水深/m	最大 流速/ ( $m \cdot s^{-1}$ )	最大 含沙量/ ( $kg \cdot m^{-3}$ )	异重流平 均流速/ ( $m \cdot s^{-1}$ )	异重流 平均含沙量/ ( $kg \cdot m^{-3}$ )	异重流 厚度/ m	潜入点 位置
2014-07-05	10:30	5.3	0.44	74.7	0.28	45.0	0.79	HH05 断面
2014-07-05	17:00	6.1	1.53	131	1.17	43.0	4.69	HH05 断面上游 140m
2014-07-06	07:10	10.5	1.07	34.7	0.72	21.3	6.3	HH05 断面上游 240m
2014-07-07	07:15	11.5	0.48	9.44	0.35	4.99	5.3	HH05 断面上游 530m
2014-07-08	07:12	9.1	0.50	6.92	0.42	4.84	1.01	HH05 断面上游 320m

由发生异重流时的监测数据及 HH06、HH04 断面流速及含沙量的变化(图 2、3)分析可以得出:潜入点区异重流厚度受上游来流量影响,表现为异重流厚度与上游来流量大小同步;垂向上,流速在库区内由上到下,逐渐增大,最大流速位于库底附近。异重流界面以下含沙量逐渐增加,含沙量极大值也位于库底附近;横向上,主流异重流层平均流速较大,边流流速较小;含沙量表现为主流含沙量大,动能大,流速相对也较大,边流含沙量小,相应的流速也小,异重流层流速形态分布与含沙量分布密切相关<sup>[13]</sup>。

#### 3.2 库内演进区

3.2.1 异重流厚度沿程变化 从异重流厚度沿程变化(图 4)可以看出:各日异重流厚度沿程增加,HH01 断面异重流厚度比 HH04 断面有所增加。7 月 6 日为此异重流强度最强的一天,表现为各断面异重流厚度达到最大。7 月 8 日随着入库水沙的减小,异重流厚度开始减小。

3.2.2 异重流平均流速沿程变化 由实测资料计算异重流层平均流速,得到平均流速沿程变化(图 5)。由图 5 可知,异重流平均流速总趋势为沿程递

减,同时各断面流速受入库流量影响非常大<sup>[14]</sup>。7月5日当三门峡水库大流量高含沙下泄水流渗入小浪底水库后,异重流平均流速在各断面表现为最强。

7月6沿程各断面分别出现本次异重流的最大平均流速。7月7日后随着上游来流量逐渐减小,异重流有所减弱,各断面平均流速减小直至消失。

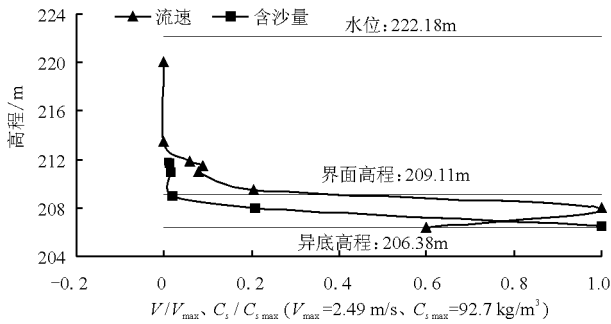


图2 HH06断面流速、含沙量垂向分布

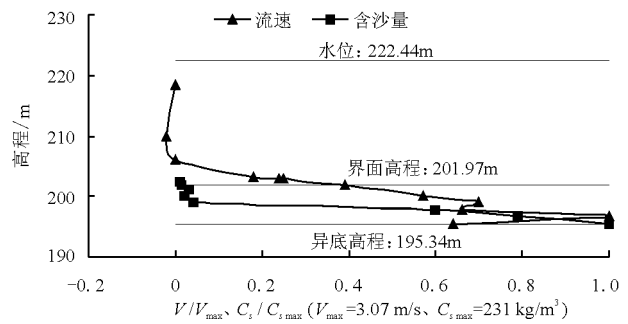


图3 HH04断面流速、含沙量横向分布

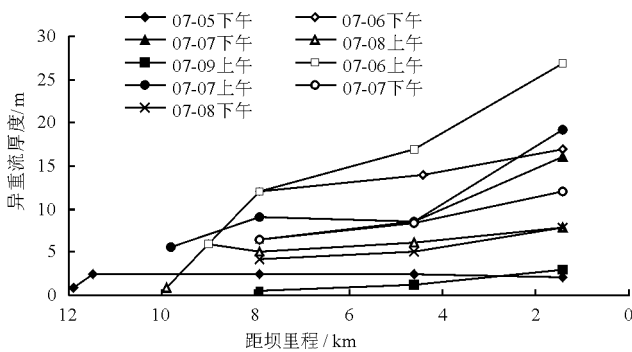


图4 各日异重流厚度沿程变化

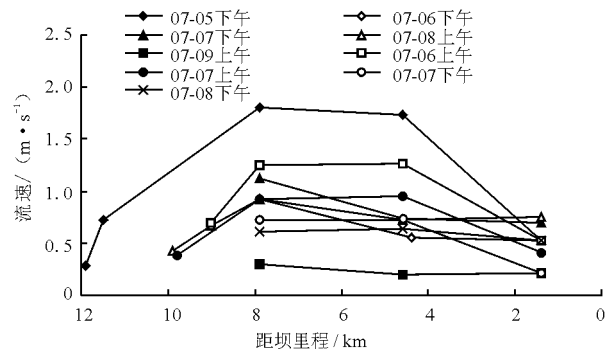


图5 各日异重流平均流速沿程变化

3.2.3 异重流平均含沙量沿程变化 从平均含沙量沿程变化图(图6)中可以看出:在异重流产生初期的7月5日上游各断面含沙量较大,这是由三门峡水库下泄大流量冲刷小浪底自然河道泥沙所形成。随着异重流的持续,各断面的异重流平均含沙量变化保持相对一致。

图6中显示,在异重流运行至坝前断面时,含沙量表现出增加的现象,这是由于小浪底水库大流量下泄,异重流运行到大坝,受到大坝阻挡,在坝前形成拥堵所致,因此表现为异重流厚度增大,含沙量也相应集中增大。

库内演进区异重流每日厚度变化表现为沿程增加,靠近坝前断面异重流会出现壅高现象<sup>[15]</sup>,造成比远离坝前断面异重流厚度显著增加的现象。异重流平均流速总的趋势为沿程递减,同时各断面流速受入库流量影响非常大,表现为基本同步关系。异重流含沙量变化为,从产生异重流开始时,由于三门峡水库下泄大流量冲刷小浪底自然河道泥沙,造成上游断面含沙量高到逐渐趋于稳定,靠近坝前区,由于小浪底水库下泄闸门关闭,异重流形成拥堵,造成含沙量也随之增大。

### 3.3 坝前区

3.3.1 异重流横向厚度沿程变化 从HH01断面异重流测验界面高程、异重流厚度横向分布图(图7)中可以看出,异重流5日14时30分在HH01断面形成后,该断面异重流厚度为2.15 m,随后,前期的异重流峰顶到达,因此出现了在测验时,异重流厚度在断面横向上呈增大的趋势,最大厚度达到27.9 m,厚度增加25.75 m,界面雍高25.8 m。

3.3.2 坝前区异重流横向流速、含沙量分布 HH01断面异重流实测最大流速1.30 m/s,实测异重流层平均最大流速0.77 m/s,流速较大,为异重流的顺利排沙出库创造了有利条件。含沙量分布在185~190 kg/m<sup>3</sup>之间,变化范围不大,实测资料显示如图8。

在坝前区,异重流在HH01断面界面高程基本等高,在横向上异重流分布比较均匀。异重流厚度出现急剧增大现象,这是因为小浪底水库下泄闸门处于关闭状态,运行至坝前的异重流将其动能转化为势能所造成的<sup>[9]</sup>。在出水口、排沙洞同时开启情况下,垂向上,流速分布表现为两个极值点,第1个极值点位于清水层,与出水口开启有关;第2个极值点位于异重流底部,与排沙洞开启有关。含沙量极

值靠近异重流底部。

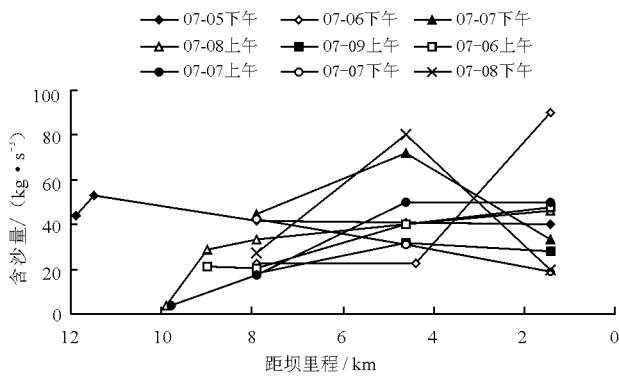


图 6 各日异重流平均含沙量沿程变化

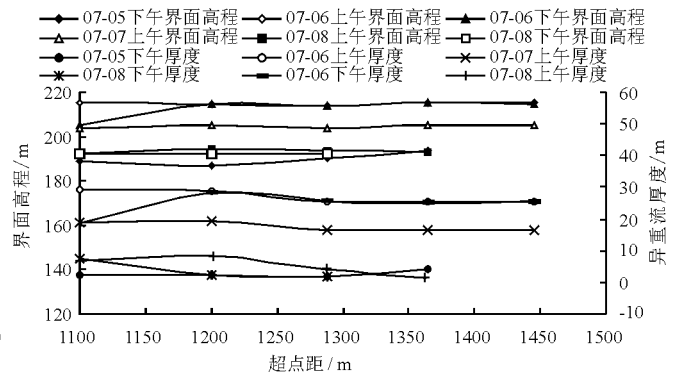


图 7 各日 HH01 界面高程、异重流厚度横向分布

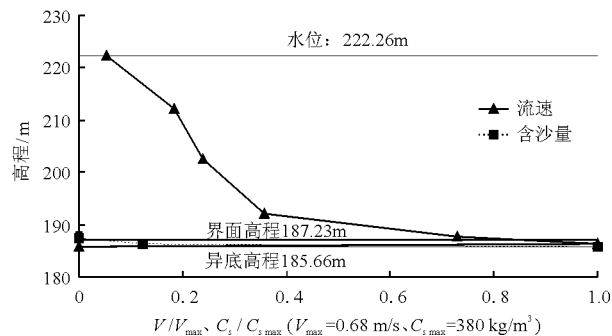


图 8 HH01 断面平均流速、含沙量垂线分布图

区的演进规律,为今后小浪底水库异重流运动规律的研究提供参考。

参考文献:

[1] 李昆鹏,王 瑞,马怀宝,等. 小浪底水库浮泥层水动力学特性初探[J]. 中国农村水利水电,2013(1):35-38.  
 [2] 胡方珍,吴 腾,詹义正. 水库异重流运行特性试验研究[J]. 中国农村水利水电,2013(12):37-40.  
 [3] 钱宁等. 异重流[M]. 北京:水利出版社,1957.  
 [4] 唐 武,王英明,仲米虹,等. 异重流研究进展综述[J]. 海相油气地质,2016,21(2):47-56.  
 [5] 冯 慧. 小浪底水库异重流排沙研究[J]. 水利科技与经济,2015,21(10):73-76.  
 [6] 王 燕. 黄河口高浓度泥沙异重流过程现场观测与数值模拟[D]. 青岛:中国海洋大学,2012.  
 [7] 朱素会,耿胜安,王德军. 小浪底水库异重流潜入点区特性分析[J]. 华北水利水电大学学报,2011,32(2):23-25.  
 [8] 侯素珍. 小浪底水库异重流特性研究[D]. 西安:西安理工大学,2003.  
 [9] 张保伟,杨 彪,史 喆. 小浪底水库坝前异重流厚度变化分析[J]. 河南水利与南水北调,2016(10):7+21.  
 [10] 李书霞,夏军强,张俊华,等. 水库浑水异重流潜入点判别条件[J]. 水科学进展,2012,23(3):363-368.  
 [11] 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.  
 [12] 徐建华,李晓宇,李树森. 小浪底库区异重流潜入点判别条件的讨论[J]. 泥沙研究,2007(6):71-74.  
 [13] 李 涛,夏军强,张俊华,等. 水库异重流潜入点流速分布及其判别式改进[J]. 工程科学与技术,2017,49(2):62-68.  
 [14] 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.  
 [15] 马晓林. 入流条件对异重流形式和运动特征的影响[D]. 西安:西安建筑科技大学,2015.

4 结 论

本次调水调沙试验,成功地塑造了小浪底水库异重流,通过详细记录异重流在潜入点区、库内演进区和坝前区的演进监测数据,分析得到以下 3 点结论:

(1)垂向上,潜入点区异重流厚度与来流量成正比关系,平均流速分布的特点表现为垂直向上由上到下逐渐增大;横向上,平均流速与含沙量表现为主流处较大,边流处较小。

(2)库内演进区,异重流厚度在同 1 天内沿程增加,运行至坝前断面时异重流出现壅高现象;同 1 天内平均流速沿程递减,大小与上游来流量变化同步;异重流发生后,初始前断面含沙量大于后断面,之后由于异重流在坝前拥堵,变为后断面含沙量大于前断面。

(3)坝前区,在出水口、排沙洞关闭时,异重流发生壅高现象,厚度增加;出水口、排沙洞开启后,平均流速在垂向上出现两个极值,分别位于清水层和异重流底部,两个极值的出现分别与出水口、排沙洞的开启有关,含沙量的极值出现在异重流底部。

本次试验对 2014 年小浪底异重流演进过程的测验进行分析,在总结前人对小浪底水库异重流研究的基础之上,提出 2014 年小浪底水库异重流在 3