# 黄河小浪底库区高含沙异重流的运动过程分析

# 高亚军,陆永军,李国斌

(南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

摘要:从黄河小浪底水库实测资料出发,描述了水库异重流厚度、流速、含沙量随时间的变化过程,其沿程变化 受地形的改变和进出库水沙量的影响;分析了水库异重流潜入的运动特性及异重流运行过程.结果表明,各断 面异重流厚度随时间表现为发生、增强、维持和消失4个阶段;异重流的厚度、流速和含沙量除受制于地形外,还 受制于进出库的水量;异重流潜入点附近水流的Fr数与范家骅公式计算值基本一致,异重流潜入点随库水位的 下降而下移,随来水来沙的增大而下移.

**关 键 词:**水库异重流;潜入点;运动过程;小浪底水库 中图分类号:TV145.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-640X(2008)02-0060-07

# Analysis on character of hyper-concentration density flow in Xiaolangdi Reservoir in the Yellow River

GAO Ya-jun, LU Yong-jun, LI Guo-bin

(Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: Based on analyzing the observation data of the Xiaolangdi Reservoir in the Yellow River, this paper presents the depth, the velocity, and the sediment concentration change with time which is affected by topographic and water flux. Results indicate that the depth of density flow varies by four stages with time, i. e. appearance, swell, maintaining and disappearance. The depth, the velocity, and the sediment concentration of the density flow are affected by not only topographic change but also water flux into or out of the reservoir. It is indicated that Fr in the section where density flow plunges into the bottom of the reservoir in the paper is basically consistent with Fangjiahua formula. The section where density flow plunges moves downward when the water level of reservoir descends or when incoming water and sediment increase.

Key words: density flow; section plunged into; movement character; Xiaolangdi Reservoir

异重流是自然界一种常见的现象,有时需防止或减少异重流的形成(如船闸引航道盲肠段的异重流入 侵、沉淀池的异重流入侵等)<sup>[1,2]</sup>,有时也促使异重流的形成(如水库建后初期可增强近坝区泥沙淤积铺盖和

收稿日期: 2007-07-05

作者简介:高亚军(1964-),男,浙江宁海人,高级工程师,主要从事河流动力学及泥沙运动的研究. E-mail: YJgao@nhri.cn 防渗、后期为减少库内淤积,可利用异重流排沙)<sup>[3-5]</sup>.由于异重流的复杂性,国内外许多学者对其进行了研究.我国黄河水体含沙量较大,高含沙异重流更具有复杂性.黄河小浪底水库泥沙主要集中在汛期,汛期的高 含沙和异重流排沙是造床的主要原因,异重流排沙一般使库区产生沿程淤积.

不论是汛期还是非汛期,库区的河床变化与水库的运行调度关系密切.坝前水位的高低,决定库区的河床冲淤部位.水库的泥沙淤积往往堆积在回水末端附近,随坝前水位高低而变化.同时,异重流的出现使得泥 沙淤积变得更加复杂,淤积形态多变.异重流在运行过程中总是处于超饱和状态,由于清浑水交界面不稳定 所引起的掺混作用,使得一部分泥沙发生沿程淤积;如果入库的浑水一旦停止产生异重流,异重流失去前进 的动力而停止运动,泥沙就地沉淀<sup>[6]</sup>.库区地形影响异重流的排沙效果,反过来异重流又塑造了库区地形. 异重流运行过程对库区断面淤积和水库运行方式等产生较大的影响.

小浪底库区流域属土石山区,沿黄河干流两岸山势陡峭,沟壑较多.库区支流库容大于1亿m<sup>3</sup>的有 12条,其中较大的支流有大峪河、煤窑沟、畛水河、石井河、东洋河、西阳河、芮村河、沇河、亳清河等.库区内 黄河干流河段上窄下宽,自坝址至水库中部的板涧河河口长63.36 km,除八里胡同河段外,河谷底宽一般在 500~1000 m.坝址以上26 km,进入宽约200~300 m的八里胡同,长约4 km,该段河谷两岸陡峻直立,是全 库区最狭窄之河段.板涧河口至三门峡河谷底宽200~400 m.小浪底库区平面图见图1.



图 1 黄河小浪底库区平面图 Fig. 1 Ichnograph of the Xiaolangdi Reservoir in the Yellow River

# 1 异重流潜入运动特性

水库异重流潜入点位置随着上游来水来沙情况和库水位的不同而上下移动.由于水库回水末端上游处 于天然河道的明流,流速相对较大,上游来沙和河道的冲刷使得水流已达到一定的含沙浓度,至回水末端.由 于水深的增加,流速突然减小,重度相对较大的浑水开始下沉,底层浓度增大,最大流速下移,产生异重流潜 入.异重流潜入处的清水上部逆流而上,下部受浑水带动向下游运动,形成一个环流,清水水面出现倒比降.

异重流潜入点位置一般取 A-A 断面(见图 2),但由于潜入点附近流速较大,船只无法靠近,表面水流流态比较紊乱,测量比较困难,因此难以取得野外实测资料.一 <sub>潜入断面</sub>般仅在A-C段异重流潜入点下游测量,而实验室资料取得相

对容易些. 范家骅等通过水槽试验和野外观测资料分析,确定异重

流潜入点的平均关系满足修正佛汝德数为<sup>[7]</sup>:

$$Fr_{p} = \frac{U_{p}}{\sqrt{\eta_{g}gh_{p}}} = 0.78 \tag{1}$$

式中: $U_p$ , $h_p$ 分别为潜入点平均流速和水深;g为重力加速度; $\eta_g = (\rho' - \rho)/\rho'$ 为重力修正系数, $\rho$ , $\rho'$ 分别为清、浑水密度.



异重流主要发生在洪水期,由于近几年黄河来水量的减少,利用三门峡水库与小浪底水库联合调度,进

行了人工造峰过程,以形成异重流进行排 沙.从黄河小浪底异重流测量资料来看, 潜入点位置一般位于回水末端下游1 km 左右(见图3),随来水来沙的不同而上下 变化.异重流一般发生在淤积三角洲靠近 前坡段的顶部,异重流发生后,前坡段的 河底坡降相对较大,便于异重流的输移.

根据小浪底水库 2002、2005 和 2006 年异重流测量资料(见表 1)可见,异重流 潜入点水流的 Fr 数基本与(1)式的计算 结果一致,有些相对偏小是由于实际测量 位置位于潜入点下游侧.





表1 潜入点 Fr 值计算表

	Tab. 1	The value	of $Fr$ on	the section	where	density	flow	plunges
--	--------	-----------	------------	-------------	-------	---------	------	---------

日期	测验位置	水深/ m	流速/ (m⋅s⁻¹)	含沙量/ (kg・m <sup>-3</sup> )	Fr
2002-07-07	潜入点	6.0	0.48	10.6	0.77
2002-07-07	潜入点下游 100 m	9.5	1.48	291.0	0.39
2002-07-12	潜入点下游 100 m	10.5	1.01	132.0	0.36
2005-06-27	潜入点	15.6	0.96	14.9	0.81
2005-06-28	潜入点下游	18.2	0.26	11.2	0.23
2006-06-25	潜入点	8.8	1.00	34.0	0.75
2006-06-25	潜入点下游1370 m	10.3	0.66	27.6	0.51
2006-06-28	潜入点下游1000 m	6.0	0.43	34.8	0.39

异重流的流速、含沙量垂线分布不同于明渠.明渠流流速极大值位于水面附近,含沙量垂线分布均匀,没 有极值点.而异重流从潜入点上游到潜入点下游,垂线最大流速位置从河面移向库底,最大流速位于库底附 近.受异重流潜入影响,潜入点及其下游断面表层清水为回流(负流速),回流流速的大小与异重流的强弱及 距离潜入点的距离有关.含沙量垂线分布表层为清水,清浑水界面大致处于0流速的位置,界面以下含沙量 逐渐增加,其极大值位于库底附近.而潜入点处表层流速为0,但实际潜入点并不能确定在一个点上,而是一 个大致的范围,因此造成计算 Fr 数的偏差.

2005年6月27日和2006年6月25日小浪底水库异重流潜入点流速和含沙量垂线分布见图4.



Fig. 4 Vertical distribution of the velocity and the sediment concentration in the section where density flow plunges

从图 4 可见,异重流最大流速和含沙量分布相对于明渠的位置有所下移,表层流速有正有负,但数值均较小,可作为潜入断面 A-A 异重流分布.2005 年 6 月 28 日和 2006 年 6 月 28 日表层负流速与异重流最大流速之比达到 0.50 和 0.56(见图 5),表明异重流已完全潜入.





# 2 异重流运行过程

#### 2.1 异重流的厚度

异重流的厚度 h'与水深 H 有关,可表示为  $h' = K_1 H$ . 根据武汉水院统计的水槽资料  $K_1 = 0.54 \sim 0.63$ , 据青山运河野外观测资料  $K_1 = 0.68$ ,根据长江某"盲肠"河段野外观测资料  $K_1 = 0.50^{[1]}$ . 小浪底水库异重 流潜入后的异重流的厚度与水深的关系见图 6,统计得  $K_1 = 0.55$ .

根据小浪底库区河道特征,从异重流最大厚度沿程变化 可以看出,异重流厚度受制于地形.HH17断面以上各断面异 重流厚度较大,位于八里胡同库段的HH17断面狭窄,异重 流厚度最大,2005年异重流最大厚度为6.9m,2006年则达 19.0m.出了八里胡同库段后,异重流厚度明显减小.异重流 厚度除受制于地形外,还受制于进出库的水量.各断面异重 流厚度随时间表现为发生、增强、维持、消失4个阶段(见图 7、图8).





Fig. 7 The depth of the density flow along the flow



Fig. 8 Relation between density flow depth and time on cross section

### 2.2 异重流流速、含沙量分布

异重流主流线平均流速、含沙量沿程分布见图 9. 从异重流层平均流速、含沙量沿程变化可以看出,异重 流潜入时流速、含沙量相对较大,沿程受地形和出入库流量变化的影响,异重流或增强或减弱,有的异重流可 输送至坝前而排出库外,有的随流速的减小途中产生淤积. 异重流平均流速总的趋势为沿程递减,含沙量沿 程略有递增. 异重流随时间的变化受制于后续的来水来沙条件,后续能量不足,异重流持续时间短,输送距离 近;后续能量足,则异重流持续时间长,输送距离远. 持续时间较长的异重流一般有先强后弱,再增加、衰弱直 至消亡的过程(见图 10).

由于库区形成了浑水水库,因此含沙量垂线分布沿程变化不能完全代表异重流含沙量的变化.此外,异 重流同步观测资料不十分完整,也难以准确给出异重流沿程变化过程.HH17断面以上入库含沙量较大时, 异重流含沙量沿程递减.HH17断面以下含沙量沿程变化能反映异重流含沙量的沿程变化,并且包含了浑水 水库的影响.异重流的含沙量对流速有直接的影响,异重流的流速和含沙量是两个互相影响、互相制约、互相 依存的因素<sup>[8]</sup>.





图9 异重流主流线平均流速、含沙量沿程分布

Fig. 9 Distribution of the average velocity and the sediment concentration along the flow in main streamline





Fig. 10 The average velocity and the sediment concentration change with time on sections in main streamline

### 2.3 水流 Fr 随时间及沿程变化

异重流的 Fr 随时间、沿程变化见图 11. 可见, HH28~HH17 断面异重流发生时水流的 Fr 相对较大, 随后逐渐减小, HH13 断面以下 Fr 相对较小, 变化不大. 沿程平均 Fr 逐渐减小, HH13 以后保持稳定.



Fig. 11 Values of Fr changes with time and along the flow

## 3 结 语

(1)根据实测资料计算的异重流潜入点的水流 Fr 与范家骅等公式的计算结果基本一致.异重流 Fr 沿程 逐渐减小,各断面异重流发生时的 Fr 相对较大,随后逐渐减小.

(2)异重流的厚度 h'与水深 H 有关. 小浪底水库异重流潜入后的异重流厚度与水深的关系可表明为h'= 0.55 H.

(3)水库异重流潜入点位置随上游来水来沙和库水位的不同而上下移动.异重流潜入点随库水位的下降而下移,库水位的抬升而上移;随来水来沙的增大而下移,来水来沙的减小而上移.

(4)异重流的厚度、流速和含沙量除受制于地形外,还受进出库水量的影响.各断面异重流厚度随时间 表现为发生、增强、维持和消失4个阶段.

#### 参考文献:

[1] 陈稚聪,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): 33-36.

- [2] 詹 咏, 吴文权, 王惠民. 沉淀池中的异重流运动特性[J]. 中国给水排水, 2003, 19(1): 43-45.
- [3] 张金良, 王育杰, 练继建. 水库异重流调度问题的研究[J]. 水利水电技术, 2001, 32(12): 17-19.
- [4] 焦恩泽,李红良. 浅谈小浪底水库泥沙问题[J]. 人民黄河, 2002, 24(1): 16-17.
- [5] 张俊华,陈书奎,王严军,等. 小浪底水库 2000 年运用方案库区动床模型试验研究[J]. 人民黄河, 2008, 22(8): 36-37.
- [6] 钱 宁, 万兆惠. 泥沙运动力学[M]. 北京: 科学出版社, 1983: 457-460.
- [7] 范家骅,吴德一,沈受白,等.第一届河流泥沙国际学术讨论会论文集[C].北京:水利电力出版社,1980:253-262.