

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2009.02.024

小浪底水库异重流对库区河床冲淤的影响

高亚军,陆永军,许 慧

(南京水利科学研究院河港研究所,江苏 南京 210029)

摘要:对小浪底水库异重流潜入位置、地形坡降、坝前水位及其库区河床地形的变化进行分析,结果表明:异重流的发生、运行及其消亡受制于地形的改变和进出库水沙量的影响,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.小浪底水库随着淤积三角洲顶点的不断向前推进,近坝段的比降变陡,有利于异重流排沙,可减少库区的泥沙淤积.

关键词:小浪底水库;异重流;地形坡降;坝前水位;沿程淤积;就地淤积

中图分类号:TV145.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-1980(2009)02-0240-05

异重流是自然界一种常见的现象,许多工程都要解决异重流淤积的问题.异重流形成有其不利的一面,也有其有利的一面,因此有防止或减少异重流形成的方法(如船闸引航道盲肠段的异重流入侵^[1],沉淀池的异重流入侵^[2]等),也有促使异重流形成的方法(如水库建后初期为增强近坝区泥沙淤积,进行铺盖和防渗^[3-4],后期为减少库内淤积,利用异重流排沙).

黄河小浪底水利枢纽是一座以防洪为主,具有防凌、减淤、发电、灌溉等综合效益的大型水利工程^[5].在多沙河流上兴建水库,泥沙淤积问题是关系到水库是否能长期利用的技术问题,而异重流对库区河床冲淤产生了较大影响.为了减少异重流造成的库区泥沙淤积,并充分利用异重流排沙,以长期保留兴利库容,本文对小浪底水库的冲淤规律及其成因关系进行了研究.

1 异重流淤积的影响因素

异重流的形成需要一定的条件,入库水流中挟带足够数量的泥沙是异重流发生的必要条件之一.除此之外,入库水流还必须有足够的能量,即有足够大的流量或单宽流量.

异重流潜入点处的弗劳德数一般可表示为^[6]

$$Fr = \frac{V_0^2}{\frac{\Delta\rho g}{\rho_0 g}gh_0} = 0.6 \tag{1}$$

式(1)表达了异重流潜入点处水深 h_0 、流速 V_0 、清浑水密度差 $\Delta\rho g$ 三者之间的关系.由此可见,当浑水水流入库时,库内水深过大(或过小)、流速过大(或过小)及密度差过小(即含沙量过小),都不能形成异重流.

异重流形成后,要有效地将浑水排出库外,提高异重流的排沙效果,需要研究异重流的运动过程.影响异重流排沙效果的因素很多,包括入库的水沙条件、库区的地形以及泄流排沙设备的大小和位置等.入库洪峰时间越长、库区中的河床比降越陡以及水库回水越近,异重流越容易到达坝前,排沙效果越好.

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.由于黄河在汛期基本上每年都产生高含沙水流,并且水库消落冲刷也会形成高含沙水流,因此对于小浪底水库而言,只要三门峡下泄浑水或水库消落冲刷,均可在小浪底水库形成异重流,只是强弱不同.有些异重流在形成之初即消失,有些在库区运行过程中消失,只有部分强度较大的异重流能够运行至坝前.异重流运行过程对库区断面泥沙淤积和水库运行方式等产生较大的影响.

1.1 异重流潜入断面位置

小浪底水库异重流淤积分布与异重流潜入点位置有关.总体来说,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, 异重流形成后随库水位的下降而下移, 随库水位的抬升而上移, 随来水、来沙的减小而上移. 潜入点位置一般位于回末端下游 1 km 左右处, 随来水、来沙的不同而上下变化.

异重流流速、含沙量垂线分布与明渠流分布不同. 明渠流流速最大值位于水面附近, 含沙量垂线分布相差不大, 没有极值点. 出现异重流潜入后, 从潜入点处上游到潜入点处下游, 垂线上最大流速位置从河面向库底移近, 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会表现为 0 流速或回流 (负流速) 现象, 负流速大小与异重流的强弱及潜入点的位置有关. 流速垂向分布上一般会存在 0 流速, 潜入点及其下游附近断面流速较大. 含沙量垂线分布为表层含沙量为 0, 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, 见图 1.

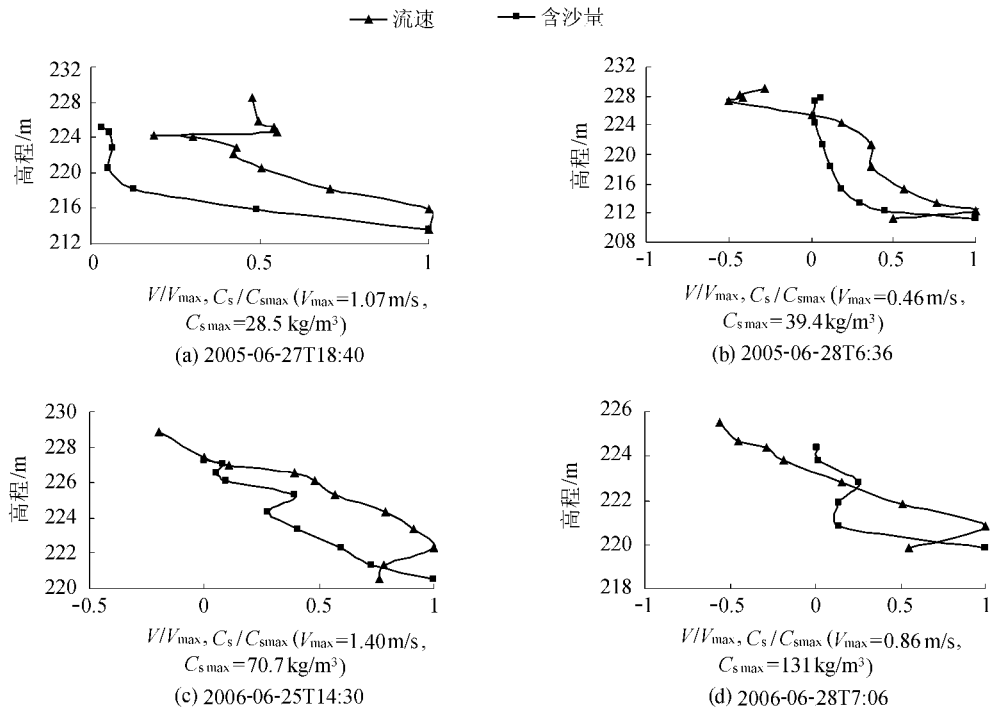


图 1 潜入点流速、含沙量垂线分布

Fig. 1 Vertical distribution of velocity and sediment concentration of section with occurrence of density currents

1.2 河床地形及坡降

小浪底水库异重流淤积分布与河床地形及坡降有关. 从小浪底库区历年汛前深泓线变化来看(图 2), 库区纵剖面淤积形态为三角洲. 2001 年后三角洲顶坡段已大致处于平衡状态. 由于每年坝前水位运行不同, 泥

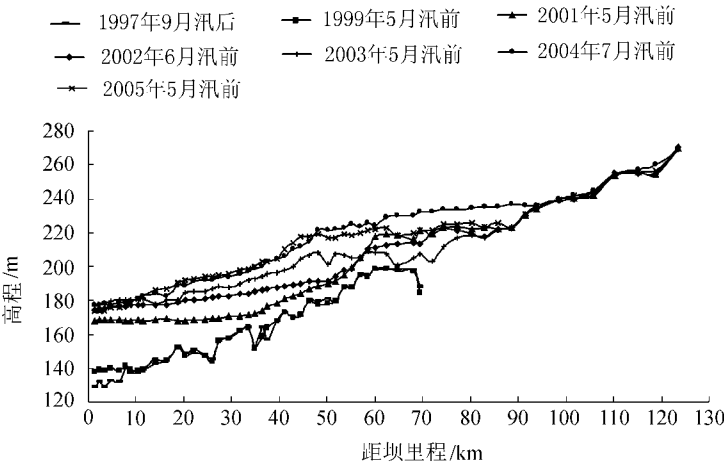


图 2 小浪底库区历年汛前深泓线变化

Fig. 2 Annual talweg change in Xiaolangdi Reservoir area before flood

沙淤积部位和淤积高程不同,一般汛期发生溯源淤积^[7],汛前水位下降时,又发生溯源冲刷,但其顶坡段末端平衡点位置一般在距坝 88.54 km 附近,顶坡段床面高程为 220 m 左右,而三角洲顶点则不断向前推进,2001 年汛前三角洲顶点前移至距坝 60.13 km 附近,2002 年汛前推进至距坝 58.51 km 附近,2003 年汛前推进至距坝 48.0 km 附近,2004 年 7 月时已近汛期淤积,位置未变,2005 年汛前推进至距坝 44.53 km 附近,2001~2005 年汛前三角洲顶点推进了 15.6 km,年平均推进 3.9 km。

前坡段水深迅速增加,流速急剧降低,泥沙大量淤积,使三角洲前沿不断向前推进,前坡段纵比降在 0.12%~0.29% 之间变化。

坝前段(距坝 31.85 km)以下纵比降逐渐增大,从 2001 年的 0.012% 增大到 2005 年的 0.084%。

汛期高含沙使得库区河床发生大量泥沙淤积,淤积部位与坝前水位运行有关,其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,而水位降低,又使得河床发生冲刷,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,如果入库的浑水停止产生异重流,异重流失去前进的动力,泥沙则就地沉淀^[8]。

沿程异重流高度随地形的降低而逐渐下降,比降越陡,异重流高度下降越快,异重流越容易来到坝前,异重流浑水沿程变化过程还与坝前水位以及枢纽开启方式有关^[9]。从 2001~2006 年坝前比降逐年变陡,对异重流排沙是有利的,2005 年和 2006 年的排沙比分别达到 44.4% 和 30.8%,明显大于 2001 年和 2002 年的排沙比。

1.3 坝前水位运行过程

图 3 为调水调沙期间桐树岭站水位变化过程,2002~2006 年异重流基本发生在 6 月下旬至 7 月上旬库水位迅速降落时,2002 年和 2004 年发生异重流时库水位相对较高,回水末端相对较远,异重流输移距离较长,排沙效果较差,排沙比仅为 9.9%。2005 年和 2006 年发生异重流时库水位相对较低,回水末端相对较近,异重流输移距离较短,很容易输送到坝前,排沙效果相对较好,2005 年异重流发生后,水位降落停止而略有回升,以至到达坝前的异重流泥沙停止在坝前而淤积,排沙比仅为 5.0%,坝前淤积厚度达 9 m。2005 年第 2 次异重流排沙比达 44.4%,2006 年为 30.8%。只有 2003 年 8 月异重流发生时库水位迅速抬高,异重流输送至坝前的泥沙较少,大量泥沙淤积在回水末端附近,随着水位的逐渐抬高,泥沙淤积不断上移,大量泥沙主要淤积在坝上段(距坝 51.78~105.85 km),共淤积 4.108 亿 m³,占库区干流汛期淤积的 85%。

2 异重流淤积分布

异重流现象出现后,其淤积形式包括沿程淤积和就地淤积 2 种类型。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引起的掺混作用,使得一部分泥沙发生沿程淤积。异重流沿程淤积与明渠流沿程淤积具有相似特征,即呈分选性淤积。异重流就地淤积是由于水流后续补给能量不足、河道地形条件变化或异重流行进受阻等原因,异重流失去前进的动力而停止运动,泥沙就地沉淀。

2.1 淤积量沿程分布

2002 年 6 月 15 日至 7 月 15 日,小浪底水库自调沙结束,库区干流淤积泥沙 1.35 亿 m³。2002 年 7 月 6 日异重流在距坝 62.49 km 处潜入后,库区沿程发生淤积,直至坝前^[10]。淤积量沉积在 3 个河段较为突出,即距坝 4.55~7.74 km 河段、距坝 37.55~42.96 km 河段、距坝 67.99~72.06 km 河段。调水调沙结束后,库区河段泥沙淤积部位发生了变化,在距坝 44.53~60.13 km 河段泥沙淤积量增大较多,而有些部位发生了冲刷。调水调沙期间在距坝 44.53~60.13 km 河段泥沙淤积 0.192 亿 m³,占泥沙总淤量的 14.2%;至汛期结束,此库段泥沙淤积 0.83 亿 m³,占泥沙总淤量的 55.3%。调水调沙期间在距坝 60.13~85.76 km 河段泥沙淤积了 0.287 亿 m³,

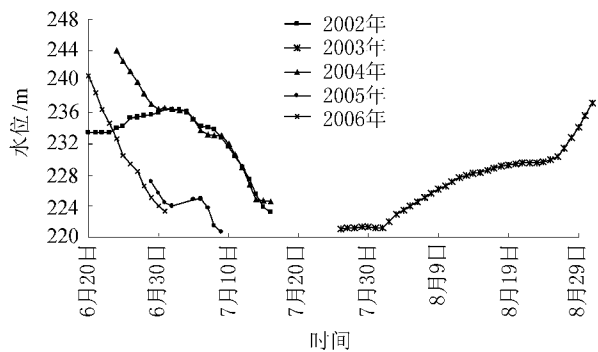


图3 调水调沙期间桐树岭站水位变化过程
Fig. 3 Water level change at Tongshuling station during water and sediment adjustment

占泥沙总淤量的 21.3% ;至汛期结束 ,此库段反而冲刷了 0.147 亿 m³ ,总冲刷量为 0.434 亿 m³ .冲刷的泥沙主要堆积在下段距坝 44.53 ~ 60.13 km 河段 ,见表 1.因此 ,异重流发生期间 ,库区沿程淤积 ,调水调沙结束后 ,随库水位的变化 ,库区又发生冲淤变化 .

图 4 为小浪底水库主槽平均河底高程变化曲线 .由图 4 可见 :距坝 0 ~

60.13 km 河段一般为常年回水段 ,常年受回水影响 ,异重流泥沙的推进和上游泥沙的冲刷在此段持续发生泥沙淤积 ,距坝 60.13 ~ 88.54 km 河段水库蓄水后受变动回水的影响 ,易发生大强度、间歇性的冲淤变化 ,时冲时淤 ,沿程淤积不均匀 ,距坝 88.54 km 以上河段属自然河道 ,冲淤变化很小 .

2.2 异重流就地淤积分布

2005 年 6 月 27 日在距坝 41.1 km 河段发生异重流后 ,由于距坝相对较近 ,近坝段坡降相对较陡 ,异重流很容易来到坝前 .29 日异重流到达坝前后 ,浑水停滞在坝前 ,未能及时排出 ,排沙比仅为 5% ,大量泥沙在坝前淤积下来 ,坝前漏斗淤积厚度达 9 m ,床面高程至 184.5 m ,超过排沙洞顶高 4.5 m ,见图 5.2005 年第 2 次人造清水拉沙时 ,排沙比达到 44.4% ,坝前低水位运行 ,使得坝前前期尚未密实的淤积泥沙被大量冲刷 ,排出库外 .至 10 月底 ,坝前河床床面已恢复至 2002 ~ 2005 年汛前平衡高程 177.5 m 左右 ,坝前漏斗平均冲刷厚度达 7.0 m ,见图 6.

表 1 2000 年小浪底水库实测断面法区段分时段冲淤量统计
Table 1 Statistical amount of measured deposition or erosion in Xiaolangdi Reservoir

时段	冲淤量/亿 m ³					合计
	距坝 1.32 ~ 11.42 km	距坝 11.42 ~ 44.53 km	距坝 44.53 ~ 60.13 km	距坝 60.13 ~ 85.76 km	距坝 85.76 ~ 123.41 km	
6 ~ 7 月	0.272	0.542	0.192	0.287	0.060	1.35
6 ~ 10 月	0.039	0.721	0.830	- 0.147	0.053	1.50

注 :正值表示淤积量 ,负值表示冲刷量 .

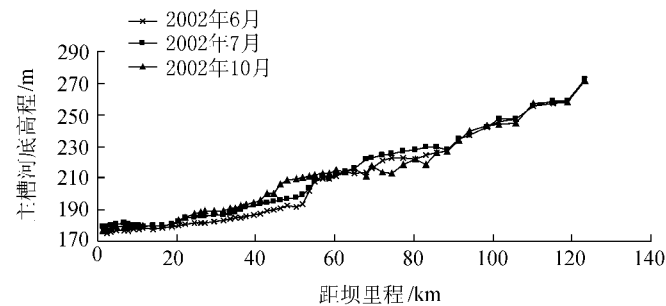


图 4 小浪底水库主槽平均河底高程变化曲线
Fig. 4 Variation curves of average bottom elevation of main channel in Xiaolangdi Reservoir

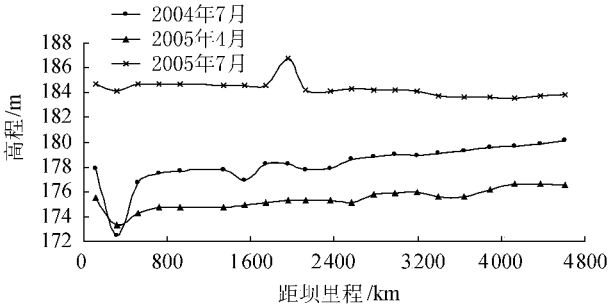


图 5 小浪底水库坝前漏斗深泓线变化
Fig. 5 Variation curves of talweg of funnel before dam in Xiaolangdi Reservoir

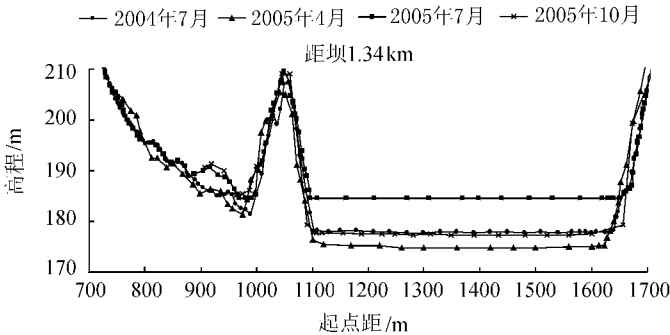


图 6 小浪底水库坝前漏斗淤积横断面变化
Fig. 6 Variation curves of cross-section of deposition of funnel in front of dam in Xiaolangdi Reservoir

3 结 语

黄河小浪底水库泥沙淤积主要集中在汛期 ,汛期的高含沙量和异重流排沙是造成河床变化的主要原因 .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.其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.而水位降低,又使得河床发生冲刷.2001~2006年坝前比降的逐年变陡,对异重流排沙是有利的,小浪底水库异重流排沙对近坝段淤积影响不大.

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] 张俊华,陈书奎,王严平,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,2000,22(8):36-37.
[5] 窦国仁,王国兵.黄河小浪底枢纽泥沙研究[R].南京:南京水利科学研究院,1993.
[6] 范家骅,吴德一,沈受白,等.浑水异重流实验研究及其应用[C]//第一届河流泥沙国际学术讨论会论文集.北京:水利电力出版社,1980:253-262.
[7] 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.
[8] 钱宁,张仁,周志德.河床演变学[M].北京:科学出版社,1989:415-451.
[9] 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.
[10] 水利部黄河水利委员会.黄河首次调水调沙试验[M].郑州:黄河水利出版社,2003:181-215.

Effect of density currents in Xiaolangdi Reservoir on
riverbed erosion and deposition

GAO Ya-jun , LU Yong-jun , XU Hui

(*River and Harbour Engineering Department of Nanjing Hydraulic Research Institute , Nanjing 210029 , China*)

Abstract : The density currents in Xiaolangdi Reservoir , the topographical gradient , the upstream water level as well as the change of riverbed topography in the reservoir area were analyzed. The results indicate that the occurrence , and disappearance of the density currents are dependant on the changes in topography and the amount of sediment and water. The topography of the reservoir area has effect on the release of sediment by the density currents , and the density currents also have an effect on the topography. The advancing of the deposition delta vertex of the Xiaolangdi Reservoir and the steep slope near the dam aid the release of sediment by the density currents and the reduction of sediment deposition in the reservoir area.

Key words : Xiaolangdi Reservoir ; density current ; topographical gradient ; upstream water level ; longitudinal deposition ; local deposition