

三峡库区泥沙分布规律初探

毛红梅¹, 刘少华¹, 周海燕²

(1. 长江水利委员会水文局, 湖北 武汉 430010; 2. 湖北省水利厅, 湖北 武汉 430071)

摘要: 为了探究三峡库区泥沙运动及其分布规律, 长江水利委员会水文局实地勘测收集了三峡库区代表站临底泥沙资料. 采用该实测资料与常规泥沙观测资料, 运用非线性回归技术, 分析了不同水力条件和泥沙粒径组成等情况下三峡库区悬移质泥沙的横向、垂向分布情况, 认为库区水体在大水深小含沙量情况下, 泥沙横向分布趋于均匀; 垂向底部区域泥沙输移占比较大, 发现库区控制站 I、II 型两种泥沙垂线分布类型均普遍存在, 垂线底部 0.2h 以下区域泥沙输移总量约占垂线输移总量的 10% 以上, 并根据三峡库区泥沙特性对目前泥沙观测方式提出了建议.

关 键 词: 三峡库区; 含沙量; 分布规律

中图分类号: TV145

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2012)05-0067-05

三峡水库蓄水后, 库区水深增加, 最大可达 200 m 左右, 水流流速较小, 水流的紊动扩散作用减弱, 重力作用相对增强. 水流入库后携带的中粗颗粒泥沙沿程沉积, 细颗粒泥沙的含量沿程增加, 含沙量沿横向和垂向分布的规律有可能发生较大变化. 传统的含沙量垂线沿河宽分布、测点沿垂线分布的测验方式不能完全反映库区泥沙输移变化. 而作为泥沙动力学最基本理论研究, 泥沙浓度分布先后出现了泥沙的扩散理论、能量理论、混合理论、相似理论及随机理论^[1-5]等. 倪晋仁^[6]通过对掺混长度及紊流特性的研究提出的泥沙浓度分布公式的统一模式, 使得著名的 Rouse, Velikanov, Laursen, Hunt, Tanaka 和 Lane-Kalinske 等公式都成为特例. 倪晋仁与王光谦^[7-8]提出浓度分布的两种类型, 并推导出新的 I 型浓度分布计算式, 预测其最大浓度位置出现在泥沙颗粒重力与升力相等之处. 这些新发现尚未在天然河道观测中得到有效验证. 因此, 开展库区大水深、小含沙量下泥沙空间分布的研究, 对指导泥沙测验、进行泥沙基本理论研究和利用三峡工程合理排沙有重要意义.

1 三峡库区蓄水概况

2003 年到 2006 年 9 月间的汛期, 三峡水库坝前水位保持 135 m, 汛后保持 139 m, 2006 年 9 月到 2007 年底非汛期保持 156 m, 汛期保持 145 m. 2003 年 6 月到 2007 年底水库代表站万县均处于库区, 清溪场站则从 2006 年 9 月后处于变动回水区, 而寸滩站作为水库入库代表站则一直不受水库回水影响.

据近 10 余年观测记录, 三峡水库入库水量在蓄水前后变化不大, 但悬移质输沙量减小趋势明显; 入库卵石推移质总量也大幅度减小; 入库悬移质代表粒径尚无显著变化趋势; 随着坝前水位逐渐抬升, 库区水流挟沙能力减小, 含沙量处于超饱和状态, 有少量入库泥沙淤积在清溪场以上河段, 近 1/3 泥沙淤积在清溪场至万县之间, 多于 1/3 的泥沙淤积在万县至大坝之间.

收稿日期: 2012-03-28

作者简介: 毛红梅(1971-), 女, 湖北武汉人, 高级工程师, 硕士, 主要从事河流动力学、水文水资源计算、水环境模拟研究. E-mail: maohm@cjh.com.cn

2 泥沙分布

2.1 泥沙横向分布

对比分析水库代表站蓄水前后的泥沙观测资料发现,库区万县站垂线平均含沙量的横向变化在蓄水后趋于均匀,各垂线平均含沙量的均值也较蓄水前小,目前观测到垂线均值一般在 1.8 kg/m^3 以下;清溪场站的垂线平均含沙量的横向变化幅度在蓄水后有所减小,而寸滩站垂线平均含沙量的横向分布在蓄水前后无明显变化。

蓄水后万县站由于库区水流动力减小,泥沙含沙量较小,各垂线代表粒径(d_{90})在横向分布上基本是均匀的(见图1);清溪场作为 156 m 蓄水的变动回水区代表站(蓄水后开始泥沙颗粒分析,测次较少),泥沙代表粒径在该站所在断面由左岸至右岸呈减小的趋势,基本与横断面形态保持一致;寸滩站在水库蓄水前后泥沙的垂线含沙量值、代表粒径沿河宽分布没有明显的变化趋势。

由此,水深较大时天然河道各垂线含沙量、代表粒径的横向分布可能与断面形态或水力因素有关。而蓄水后库区站各垂线平均含沙量基本相等,其代表粒径横向分布则趋于均匀。

2.2 泥沙垂线分布

2.2.1 分析方法 将垂线含沙量的实测样本按照蓄水前后、不同来沙粒径组成、不同来水流速等情况分类,利用曲线拟合方法进行比较,探寻三峡库区含沙量垂线分布规律,并判断不同垂线分布类型出现频率及可能影响因素。

采用最小二乘法中麦夸特法(Levenberg-Marquardt)结合通用全局优化法,对不同情况下含沙量沿垂线分布数据点进行曲线拟合;并根据不同情况下拟合曲线的比较,初探蓄水、来沙组成、水力因子、沿程变化如何影响泥沙垂线分布规律。不同情况分类下各拟合曲线的相关系数在 0.27 ~ 0.77,确定系数在 0.08 ~ 0.59 之间。

2.2.2 不同影响因素下的泥沙垂线分布

(1) 三峡水库蓄水对含沙量垂线分布的影响。万县站汛期具有较大水深时,选取蓄水前天然河道常规观测、2003—2006 年蓄水期间常规观测、2006 年临底观测等不同资料情况下进行曲线拟合,对比分析分别代表天然情况下汛期、2003—2006 年汛期、2006 年汛期实测数据样本的拟合曲线(见图2),结果表明:蓄水前后常规观测的泥沙垂线分布拟合曲线在水流层 $0.2h \sim 0.8h$ (距河底的相对水深距离,下同)处基本一致,而 2006 年汛期临底悬沙资料的拟合曲线 3,显示底部泥沙所占比例较大,水面泥沙所占比例明显减少(图中相对含沙量是测点含沙量与垂线平均含沙量的比值,采用含沙量相对值进行垂线分布模式分析来规避不同来沙情况下由于含沙量量级不同而造成差异,下同)。分析认为这种差异可能是由于临底悬沙观测较精密地测量到了河床底部区域存在较大泥沙输移。

(2) 来沙组成对含沙量垂线分布的影响。按 2006 年临底悬沙测验资料垂线泥沙代表粒径大于 0.25 mm , $0.10 \sim 0.25 \text{ mm}$, $0.05 \sim 0.10 \text{ mm}$, $0.025 \sim 0.050 \text{ mm}$, $0.010 \sim 0.025 \text{ mm}$ 分别讨论不同来沙组成时含沙量的垂线分布。

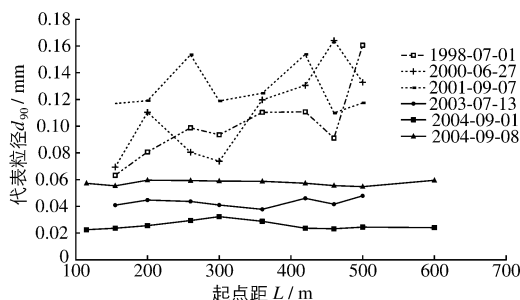


图1 万县站泥沙代表粒径横向分布

Fig.1 Lateral distribution of characteristic size of sediment at Wanxian station

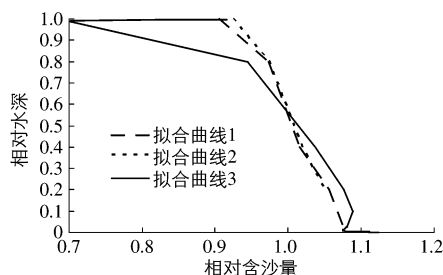


图2 万县站泥沙垂线分布拟合曲线

Fig.2 Fitting curves at Wanxian station

通过对比分析含沙量垂线分布拟合曲线(见图3),结果表明:泥沙垂线代表粒径值越小,其沿垂线分布越不均匀;而且泥沙垂线代表粒径越小,临底处相对含沙量所占比例越大.其原因可能是泥沙絮凝作用的影响,因为一般认为粒径小于 0.032 mm 的泥沙颗粒容易发生絮凝,因此当库区垂线代表粒径值越小,在垂线底部由于流速较小,絮凝作用可能更明显,从而泥沙垂线分布越不均匀.

(3)水流速度对含沙量垂线分布的影响.按照2006年临底悬沙资料,将垂线平均流速分为大于 1.5 m/s , $1.0\sim 1.5\text{ m/s}$, $0.5\sim 1.0\text{ m/s}$ 和小于 0.5 m/s 等4种情况,初步分析水力因子对含沙量垂线分布的影响.

清溪场站在流速大于 1.5 m/s 时,泥沙在中下部运移,临底泥沙含量相对较小.当流速为 $1.0\sim 1.5\text{ m/s}$ 时,临底部含沙量变幅较大,相对含沙量最大可达 2.8 (见图4(a)).万县站垂线平均流速在 $1.0\sim 1.5\text{ m/s}$ 时,河底以上 $0.4h$ 的含沙量所占比例最大,随着垂线平均流速减小,含沙量比例最大位置逐渐向下移.当万县站垂线平均流速小于 0.5 m/s 时,临底的泥沙含量所占比例最大(见图4(b)).

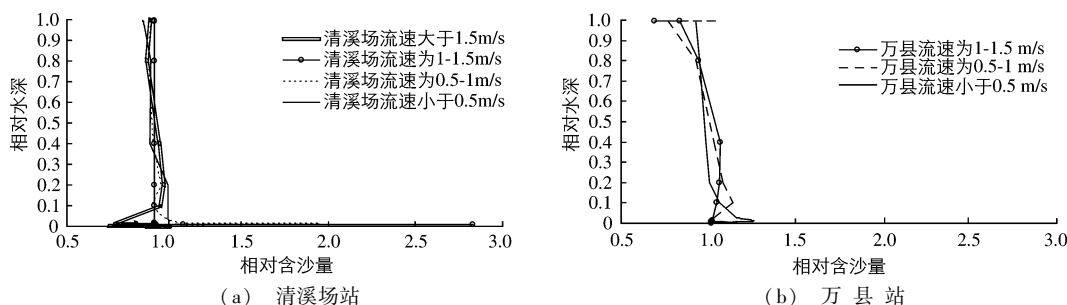


图4 不同流速下清溪场站和万县站泥沙垂线分布

Fig.4 Sediment vertical distributions under different velocities measured at Qingxichang and Wanxian stations

(4)悬移质含沙量垂线分布的影响.悬移质含沙量的垂线分布形式一般是上小下大,根据最大含沙量所处的垂线位置,泥沙的垂线分布类型主要有I和II型^[6-8].从三峡水库蓄水后实际观测资料中可发现,I,II型两种泥沙沿垂线分布类型均普遍存在,I型垂线分布的最大值出现在河床以上一定距离(通常在 $0.1h$ 处附近).这是倪晋仁与王光谦^[7-8]提出I型浓度分布在天然河道观测中得到的有效验证.

通过对清溪场、万县站实测资料进行不同情况分类分析,含沙量I型、II型垂线分布(见图5)的出现,不仅与床面的光滑度^[9-10]有关,还与泥沙浓度、泥沙颗粒均匀程度、流速的垂向分布是否接近于抛物线型等有关.

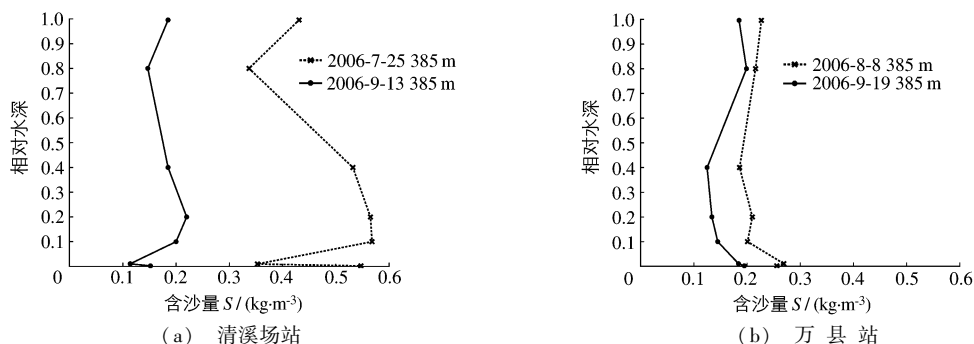


图5 清溪场站含沙量I型、II型垂线分布

Fig.5 Types I, II of sediment vertical distributions at Qingxichang station

2.3 沿程变化

通过拟合 156 m 蓄水前后临底悬沙实测样本,分析水库泥沙垂线分布规律在水库内沿程变化.初步分析表明含沙量垂线分布模式因其在水库中所处位置不同而异.156 m 蓄水前的 2006 年汛期清溪场处于变动回水区附近,泥沙垂线分布较均匀.而作为库区站的万县含沙量垂线分布较不均匀,从水面到河底含沙量比例迅速增大,近底部含沙量相对值较大.

156 m 蓄水后万县与清溪场均处于库区,其泥沙垂线分布的差异较小.尽管 156 m 蓄水初期实测样本数较少,拟合效果相对较差,但仍可看出万县站中泓区近底部泥沙所占比例大于清溪场站,万县的泥沙垂线分布不均匀性明显强于清溪场.

3 库区底部悬沙输移量占比分析

大水深下的泥沙常规观测一般采用多线 5 点法,本文利用在垂线底部测点较多的专项观测资料初步分析大水深小含沙量下底沙输移比例.本次临底悬沙测验采取 N 线 7 点法,各垂线在距床面以上 0.1 m, 0.5 m, 0.1 h, 0.2 h, 0.4 h, 0.8 h 和 1.0 h 的位置取样.其中清溪场断面平均含沙量在 $0.01 \sim 1.00 \text{ kg/m}^3$,断面平均水深为 23.7 ~ 31.2 m 之间,悬沙中值粒径为 0.003 ~ 0.010 mm 的细粉沙;万县站断面平均含沙量在 $0.004 \sim 1.470 \text{ kg/m}^3$,断面平均水深 35.8 ~ 49.9 m.通过对清溪场站、万县站临底悬沙测验河底底层 0.1 h, 0.2 h 以下区域底部泥沙输移量占整个垂线单位宽度区域泥沙输移的比例进行统计计算,结果表明,清溪场 0.1 h 以下到床面区域的泥沙输移量平均约占总量的 4%,有 81% 测次的垂线底部区域泥沙输移比例在整体垂线的 5% 以内.清溪场 0.2 h 以下到床面区域的泥沙输移占整体垂线比例一般为 12%,有 83% 测次的垂线底部比例在整体垂线的 15% 以内.

根据以上实测分析,库区控制站底部 0.2 h 以下区域泥沙输移量约占 10% 以上,建议今后观测含沙量时可酌情调整垂向上测点分布,加密底部区域泥沙监测.

4 结 语

(1)库区控制站底部 0.2 h 以下区域泥沙输移量约占 10% 以上,建议调整目前库区站垂线泥沙测点分布.

(2)库区控制站含沙量的垂线分布类型均有 2 种,其中 I 型垂线分布的最大值出现在河床以上一定距离(通常在 0.1 h 处附近),I 型的出现可能与床面光滑度、泥沙浓度大小、粒径、流速垂线分布等有关.

(3)建议下一步开展入库站临底部泥沙观测,以便分析来沙较粗时底部输移情况及水库回水区附近泥沙淤积强度.

(4)泥沙问题本身很复杂,原型观测具有较大不确定性.另外,选点观测测次相对较少,并且多数不含测点颗分资料或水力要素,尤其是缺乏临底部(特别是 0.1 h ~ 0.2 h 相对水深以下)泥沙观测,这些均限制了本文分析结论的代表性.因此,有必要进一步加强观测分析工作.

致谢

感谢长江水利委员会上游水文水资源勘测局、中游水文水资源勘测局为本项目研究提供大力支持.长江水利委员会水文局黄双喜、周波、姚丽娟、许全喜提供部分观测数据和宝贵帮助.

参 考 文 献:

- [1] 韩其为.粗颗粒悬移质测验误差分析[J].水文,2008,28(1):1-6.(HAN Qi-wei. Error analysis of coarse suspended load measuring[J]. Journal of China Hydrology, 2008, 28(1): 1-6. (in Chinese))

- [2] 邓文军, 陈立, 林鹏, 等. 紊动强度沿垂线分布规律的分析[J]. 泥沙研究, 2001(5): 34-36. (DENG Wen-jun, CHEN Li, LING Peng, et al. Analyses on distribution rule of turbulence intensity along depth[J]. Journal of Sediment Research, 2001(5): 34-36. (in Chinese))
- [3] 王志良. 悬移质含沙量的垂线分布规律探讨[J]. 河海大学学报, 1997, 25(3): 29-33. (WANG Zhi-liang. A study on vertical distribution of suspended concentration[J]. Journal of Hohai University, 1997, 25(3): 29-33. (in Chinese))
- [4] 汪富泉, 丁晶, 曹叔尤, 等. 论悬移质含沙量沿垂线的分布[J]. 水利学报, 1998(11): 44-50. (WANG Fu-quan, DING Jing, CAO Shu-you, et al. Exposition on concentration distribution of suspended sediment along depth[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1998(11): 44-50. (in Chinese))
- [5] 李占海, 高抒, 沈焕庭. 大丰潮滩悬沙粒径组成及悬沙浓度的垂向分布特征[J]. 泥沙研究, 2006(1): 62-70. (LI Zhan-hai, GAO Shu, SHEN Huan-ting. Suspended sediment concentration profiles and grain size distribution patterns over the Dafeng tidal flat[J]. Journal of Sediment Research, 2006(1): 62-70. (in Chinese))
- [6] 倪晋仁, 王光谦, 张红武. 固液两相流基本理论及其最新应用[M]. 北京: 科学出版社, 1991: 1-391. (NI Jin-ren, WANG Guang-qian, ZHANG Hong-wu. Solid-liquid flow theory and latest application[M]. Beijing: Science Publish, 1991: 1-391. (in Chinese))
- [7] 王光谦, 倪晋仁. 再论悬移质浓度垂线分布的两种类型及其产生的原因[J]. 水动力学研究与进展, 1991, 6(4): 60-71. (WANG Guang-qian, NI Jin-ren. Further studies on the two patterns of vertical distribution of particle concentrations and their formation cause[J]. Journal of Hydrodynamics, 1991, 6(4): 60-71. (in Chinese))
- [8] 倪晋仁, 王光谦. 论悬移质浓度垂线分布的两种类型及其产生的原因[J]. 水利学报, 1987(7): 60-67. (NI Jin-ren, WANG Guang-qian. Studies on the two patterns of vertical distribution of particle concentrations and their formation cause[J]. Shuili Xuebao, 1987(7): 60-67. (in Chinese))
- [9] 夏建新, 吉祖稳. 湍流中泥沙垂线分布的力学解释[J]. 水利学报, 2003(1): 45-50. (XIA Jian-xin, JI Zu-wen. Mechanical interpret for vertical sediment concentration distribution in turbulent flow[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003(1): 45-50. (in Chinese))
- [10] 张瑞瑾, 谢鉴衡. 河流泥沙动力学[M]. 武汉: 水利电力出版社, 1989: 192. (ZHANG Rui-jing, XIE Jian-heng. River sediment dynamics[M]. Wuhan: China Water Power Press, 1989: 192. (in Chinese))

Preliminary study on sediment concentration distribution in the Three Gorges reservoir

MAO Hong-mei¹, LIU Shao-hua¹, ZHOU Hai-yan²

(1. Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, China; 2. Hubei Provincial Water Resources Bureau, Wuhan 430071, China)

Abstract: To investigate the mechanism and distribution of sediment transport in the Three Gorges reservoir, the Bureau of Hydrology of the Changjiang Water Resources Commission has committed the survey and collected precious sediment data including those in the adjacent area of riverbed. Base on these measured data, the paper has explored the lateral and vertical distribution of sediment in the Three Gorges reservoir by using modern statistics, which classify observations into few groups according to hydraulic conditions and sediment transportation. It is seen that the lateral distribution of sediment is uniform in the reservoir and the adjacent area of riverbed has large weight in the sediment transportation. Two types of sediment vertical distribution are found. Since more than 10% sediment transportation is in the adjacent area of riverbed which is between 0.2 h (0.2 times water depth) under the water, some suggestions on the sediment observation scheme are proposed in the study.

Key words: Three Gorges reservoir; sediment concentration; vertical distribution