

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2010.01.008

葛洲坝水利枢纽工程对宜昌河段水文水力特性的影响

李 帆^{1,2} 夏自强^{1,2} 王跃奎³

(1.河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室 江苏 南京 210098 ;

2.河海大学水文水资源学院 江苏 南京 210098 ;3.太湖流域管理局水文水资源监测局 江苏 无锡 214024)

摘要 : 根据葛洲坝水库蓄水前后宜昌水文站水文实测资料 , 分析了葛洲坝水利枢纽工程对宜昌河段水位-流量关系、断面形状和水位变化规律的影响 . 结果表明 , 葛洲坝水库蓄水后 , 宜昌河段水文水力特征变化符合惯性区理论 , 洪水波运动形式发生变化 , 坝前水流流速降低 , 水流挟沙能力和推移力下降 , 水库淤积现象加重 , 下泄水流中的含沙量下降 , 宜昌河段推移质输入减少 , 下泄水流对河道的冲刷能力增强 , 原有的冲淤平衡被打破 , 河床质变粗 , 断面形状不断变化 , 宜昌河段河床下切、水流能量增大、流速增大 , 同流量情况下的水位较天然河道有所下降 .

关键词 : 葛洲坝水利枢纽 ; 宜昌河段 ; 水文水力特性 ; 惯性区特征 ; 水位-流量关系

中图分类号 : TV12 文献标识码 : A 文章编号 : 1000-1980(2010)01-0036-05

水库蓄水后 , 将改变河流原有的水文水力特性 , 进而改变整个系统的物质场和能量场^[1] , 改变河流原有的水量平衡和能量平衡状态 . 宜昌水文站 (以下简称宜昌站) 位于长江上游与中游的衔接处 (图 1) , 它可以为长江中下游防洪预报、三峡区间水利工程设计和建设提供翔实的水文资料 . 宜昌站上游 5.9 km 处为葛洲坝水利枢纽工程 . 葛洲坝水库位于湖北省宜昌市三峡出口南津关下游约 3 km 处 , 是三峡水利枢纽工程的航运梯级水库 , 担负着渠化三峡大坝至宜昌间天然河道 , 对三峡电站日调节非恒定流进行反调节和利用河段落差发电的任务^[2] . 葛洲坝水利枢纽工程于 1970 年 12 月动工兴建 , 1981 年 1 月 4 日完成大江截流 , 5 月开始蓄水 , 6 月 5 日坝前水位达到初期试运用高程 60 m . 该水利枢纽工程 1986 年 5 月投入正式运行 , 6 月初坝前水位蓄至 65 m 高程 , 1987 年 7 月坝前水位达设计最大高程 66 m . 当运行水位为 66 m 时 , 相应总库容为 15.8 亿 m³ , 约为宜昌站多年平均年径流总量 4511 亿 m³ 的 0.35% . 本文根据葛洲坝水库蓄水前后宜昌站水文实测资料 , 分析葛洲坝水利枢纽工程对宜昌河段水文水力特性的影响 .

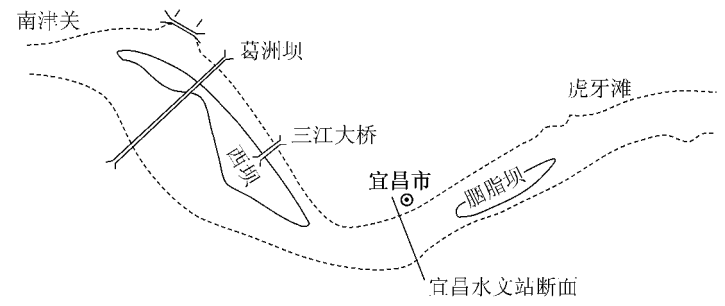


图 1 宜昌水文站断面位置

Fig. 1 Position of Yichang section

1 水力过渡区划分及惯性区特征变化规律

根据河流功能^[3]、大坝对河流水文水力特性的影响和生态系统的胁迫作用^[4] , 可以把水力过渡区划分为回水区、库区、坝区、消能区和惯性区^[5] , 如图 2 所示 .

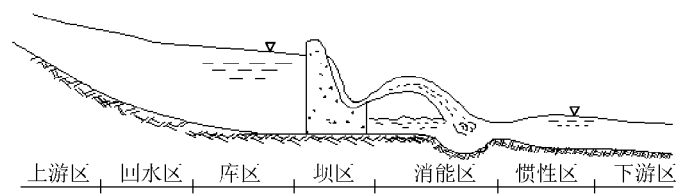


图 2 水利工程水力过渡区的划分

Fig. 2 Division of hydraulic transitional regions under influence of hydraulic projects

收稿日期 : 2008-11-12

基金项目 : 国家自然科学基金 (30490235)

作者简介 : 李帆 (1982—) , 男 , 辽宁营口人 , 硕士研究生 , 主要从事水文水资源和生态环境研究 . E-mail : simon1257@hhu.edu.cn

与天然河道相比,该水力过渡区发生了如下变化 (a)水位、流量和断面形状的变化.受水库下泄水量的影响,水文水力学要素主要受到水流的惯性作用,流量时段均一化,水位、流量随水库调度而变化.流速增大,水流挟沙能力增强,加剧了对河岸的冲刷,使河床粗化.水库的清水下泄使得河床被刷深.(b)能量场的变化.因为消能工并不能把水流所有的多余动能消耗掉,所以水流还具有很大的动能.水流所具有的能量中流速水头项起决定性作用,水流动量中惯性力起主要作用.(c)物质结构的空问变化.水流的含沙量、有机质含量、矿物质含量和营养盐分含量等降低,洪水涨落幅度变小,河道、河岸和湿地之间的物质交换受阻.由于水库泥沙淤积及营养物质被截流,大坝下游河流廊道的营养物质输移扩散规律也发生变化.

2 水库蓄水前后洪水期水位-流量关系

由于洪水期水流为非恒定流,其运动规律可用圣维南方程组来描述:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \tag{1}$$

$$v \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial t} + g \frac{\partial y}{\partial x} = g(i_0 - \frac{v^2}{C^2 R}) \tag{2}$$

式中:Q——流量;A——过水断面面积;v——过水断面平均流速;i₀——河底坡度;C——谢才系数;R——水力半径;g——重力加速度;x——流程;y——水深;t——时间.

由式(2)可得

$$Q = AC\sqrt{R}\sqrt{i_0 - \left(\frac{v}{g}\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{1}{g}\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial y}{\partial x}\right)} \tag{3}$$

式(2)和式(3)反映了洪水波运动过程中各种作用力的平衡关系.

通常可按动力方程式(3)中各项力的对比关系,把洪水波分成4类:运动波、扩散波、惯性波和动力波.

对于扩散波,惯性项的影响可忽略,则式(3)可简化为

$$Q = K\sqrt{i_0 - \frac{\partial y}{\partial x}} = Q_0\sqrt{1 - \frac{1}{i_0}\frac{\partial y}{\partial x}} \tag{4}$$

式中:K——流量系数;Q₀——按均匀流计算的流量.

式(4)表示的水位-流量关系不是单值的线性关系,而是一条绳套曲线.当以横坐标表示流量,纵坐标表示水位时,该绳套曲线为逆时针绳套曲线.

动力方程中每一项都不能忽略时的波称为动力波.动力波是所有波动中最复杂的一种波,只能用完全的圣维南方程组来描述^[6],水位-流量关系曲线也不再具有绳套形式.因此,动力波是一种普通的波动现象,而运动波、惯性波和扩散波只不过是动力波的特殊情况.

葛洲坝水库蓄水后,天然河道的水流特性发生变化,这必然导致宜昌河段水流的各种作用力的对比关系发生变化,并导致洪水波的传播形式有所改变.本文选取蓄水前(1974年和1981年)及蓄水后(1987年和2004年)4个最大洪峰流量超过6000m³/s且为非复式洪水过程的典型年进行次洪过程(图3)的比较,并分析葛洲坝水利枢纽工程对该过程的影响.

从图3(a)(b)可以看出,1974年和1981年的水位-流量关系曲线呈现光滑的绳套形状.葛洲坝水库蓄水前,宜昌河段流态接近于天然流态,较少受人为因素的影响,上游来水的能量沿河均匀分布,惯性项 $\frac{v}{g}\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{1}{g}\frac{\partial v}{\partial t}$ 对流量的影响效果不明显,水流主要受到河底比降、附加比降和阻力项的控制,此时惯性项的作用可以忽略不计^[7],按照洪水波的分类标准,这种洪水波应属于扩散波.

葛洲坝水库蓄水后,河道中各作用力的比例关系发生了变化,如图3(c)(d)所示,河流的水位-流量关系曲线呈现不规则的形状.坝前水位壅高,河流连续性被打破,能量的沿河均匀分布形态发生了根本性变化,坝区内能量转化过程剧烈.坝前河水势能增加,水流下泄过程中,势能部分转化成电能,部分在消能区内损耗,剩余的机械能则以动能的形式向下游继续传播,水流流速增加,此时的惯性项影响增大,式(3)中的 $\frac{v}{g}\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{1}{g}\frac{\partial v}{\partial t}$ 已不能忽略,洪水期水位-流量关系曲线的光滑绳套形状被破坏.但从杂乱的水位-流量关系曲线中

仍然可以看出绳套曲线的影子,表明河底比降和附加比降的作用依然存在且不可忽略.此时的洪水波已经不能简单地用扩散波来描述了,按照洪水波的分类标准,这种洪水波应属于动力波.

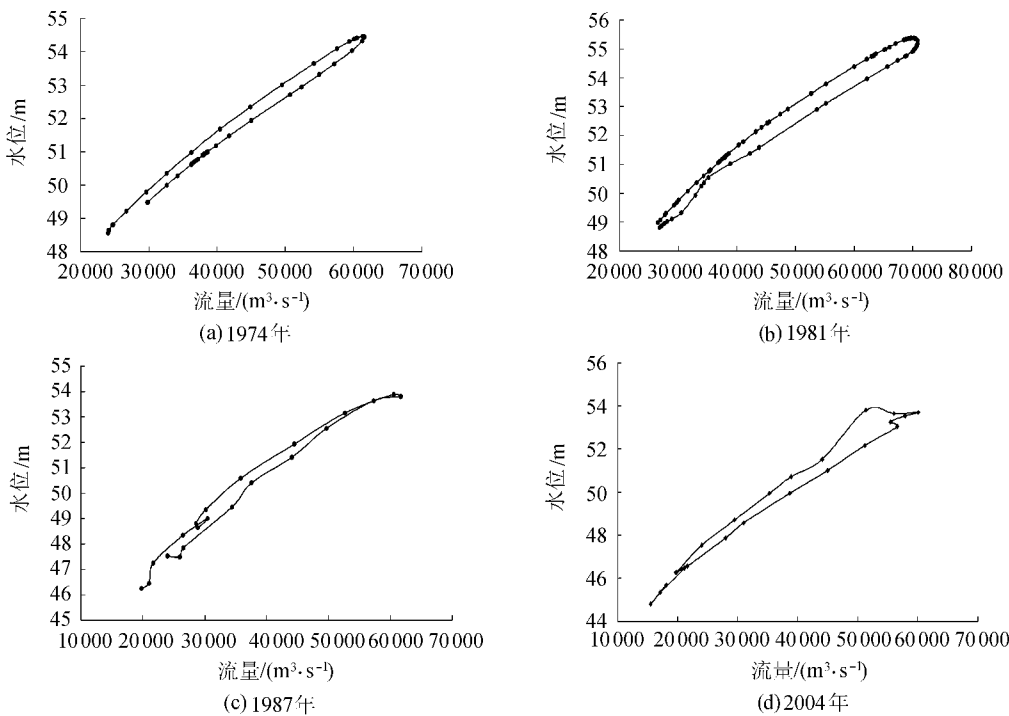


图3 宜昌站次洪过程线
Fig. 3 Hydrographs for historical floods at Yichang Station

3 水库蓄水前后宜昌站断面形状

宜昌河段为三峡江段与平原河流间的过渡河段,河道两岸受堤防和山丘的控制,河道演变主要是受上游来水来沙影响的河槽冲淤变化.该河段自第四纪晚期已稳定成型,天然状态下河床冲淤变化基本平衡,河段地貌的变化主要受到人类活动的影响^[8].

图4显示了蓄水前后各2年的实测断面形状.从图4可以看出:蓄水前的断面受水文年的随机影响,形状稍有变化,处于冲淤平衡状态;蓄水后,左岸明显下切,断面形状变化明显,并形成了新的冲淤平衡.

图5显示了蓄水前后同水位下的断面面积.从图5可以看出,蓄水后,水位-面积关系曲线明显向右移动,表明河床形状改变,来水的冲刷作用使得同水位下的断面面积变大.

蓄水后,库区水位壅高,坝上河段流速变小,水流的挟沙能力和推移力下降,导致下泄水流悬移质输沙量减少^[9].由于大坝的阻隔作用及库区水流流速降低的影响,天然状态下可以随水流向下输送的粗沙便开始淤积,说明水库对泥沙起到了“淤粗排细”的作用^[10].宜昌河段悬移质泥沙中值粒径,蓄水前(1956~1980年)为0.029mm,蓄水后(1981~1991年)为0.016mm.由于大坝的阻隔作用,推移质的传播也受到了阻碍,出库卵石推移数量显著减少,蓄水前的多年平

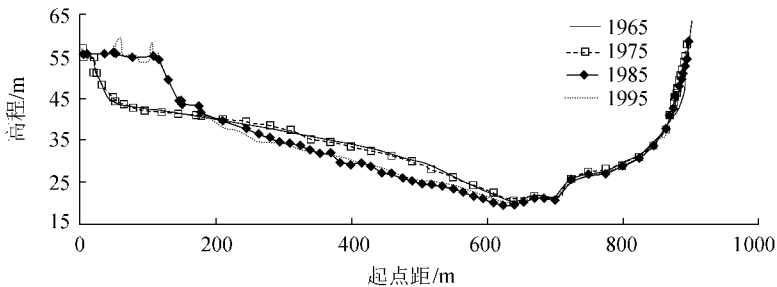


图4 宜昌站断面形状
Fig. 4 Cross section at Yichang Station

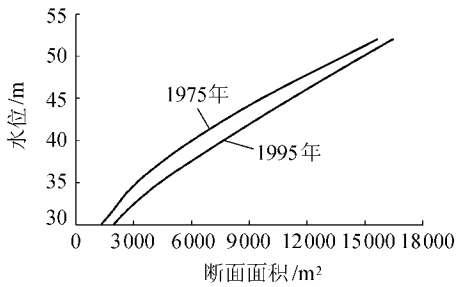


图5 宜昌站断面水位-面积关系曲线
Fig. 5 Relationship between stage and sectional area at Yichang Station

均推移质输沙量为 863 万 t,蓄水后则减少到了 118 万 t^[11]。

蓄水后,宜昌河段的上游来水在水库的作用下机械能增大,增速的水流对宜昌河段造成了冲刷,河底被刷深。同时,水流的挟沙能力和推移力也得到增强,原本无法带走的泥沙也被冲刷走了,宜昌河段床沙中值粒径,蓄水前为 0.205 mm,蓄水后的 1981~1985 年平均粒径为 0.264 mm,其中 1983 年和 1984 年分别为 0.31 mm 和 0.29 mm,河床质粗化现象明显,增速的水流进一步改变了该处的河床组成及断面形状。

4 水库蓄水前后宜昌站断面水位

在宜昌站断面 5 000 m³/s 流量条件下,水流变化平缓,能量较小,受惯性力和附加比降影响较小,水位变化主要受河底比降和断面形状控制,水位-流量关系曲线呈现单值化特点。因此,本文根据 1950 年以来的宜昌站 5 000 m³/s 流量条件下的实测数据,分析断面形状变化对水位-流量关系的影响。

从图 6 可以看出,蓄水前 5 000 m³/s 流量条件下的水位系统偏高,从 1981 年水库蓄水开始,同流量下的水位明显呈下降趋势,这表明宜昌河段受到冲刷,同水位下的过水断面面积变大,枯季相同流量下的水位会降低。

为了分析中高水位的变化特征,本文选取 3 次方多项式对蓄水前后 4 个来水过程相似的典型年全年的水位-流量关系进行曲线拟合,建立了水位-流量关系,如图 7 所示。

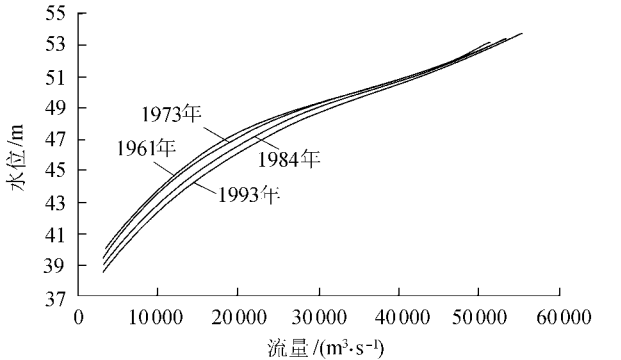
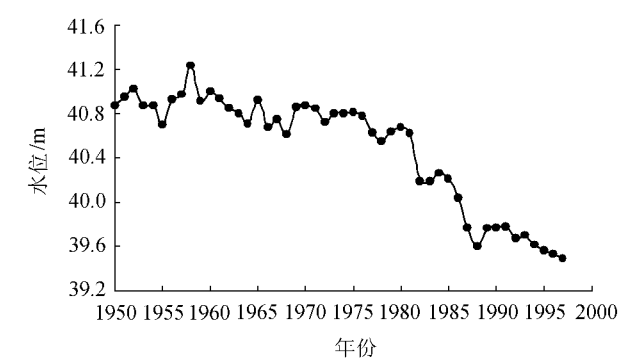


图 6 宜昌站断面 5 000 m³/s 流量条件下水位变化过程
Fig. 6 Variation of water levels at Yichang Station with discharge of 5 000 m³/s

图 7 宜昌站断面水位-流量关系曲线
Fig. 7 Relationship between stage and discharge at Yichang Station

从图 7 可以看出:与蓄水前相比,同流量下,蓄水后的水位普遍降低,中水位处下降幅度最大,之后,该变化幅度逐渐减小,到达高水位处时,水位-流量关系已没有明显变化。低水位时,流量小,水流平缓,上游来水的能量较低,水位的变幅基本上受断面变化控制,刷深的河床使得同流量下的水位降低。中水位时,上游来水增多,能量变大,受大坝壅水抬高的影响,下泄河水惯性力变大,对水位变化的影响增大,加上断面形状对水位的影响,水位下降幅度最大。高水位时,来水能量最大,水头高,葛洲坝电站属低水头径流式电站,抬高坝前水位所增加的能量,在总能量中所占比例下降,惯性力影响较中水位时小,河道冲刷扩大的过水面积占整个断面过水面积的比例较小,水位下降幅度较小;由于河床组成粗化,糙率增大,流速减小,使得同流量下建坝后的过水面积大于建坝前的过水面积,削弱了因河床冲刷扩大过水断面对水位的下降作用。因此,蓄水前后高水位时水位-流量关系变化不大。

另外,建坝时在下游江口以上河段大量开采砂石料^[11],也在一定程度上使得宜昌站断面的水位有所下降。

5 结 论

- a. 葛洲坝水库蓄水前后,宜昌河段水文水力特性变化符合惯性区理论,具有惯性区的一般特点。
- b. 葛洲坝水库蓄水前宜昌河段洪水波是一种扩散波,蓄水后宜昌河段洪水波运动形式发生变化。
- c. 葛洲坝水库蓄水后,坝前水流流速降低,水流的挟沙能力和推移力下降,泥沙在水库内淤积,下泄水流中的含沙量降低,宜昌河段推移质输入减少,加上下泄水流对河道的冲刷能力增强,原有的冲淤平衡被打破,河床质变粗,断面形状不断改变。
- d. 葛洲坝水库蓄水后,宜昌河段河床下切,水流能量增大,流速增大,同流量情况下水位较天然河道有所下降。

参考文献:

- [1] 邹振华,李琼芳,夏自强,等.人类活动对长江径流量特性的影响[J].河海大学学报:自然科学版,2007,35(6):622-626.
(ZOU Zhen-hua, LI Qiong-fang, XIA Zi-qiang, et al. Human-induced alterations in runoff of the Yangtze River[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2007, 35(6): 622-626. (in Chinese))
- [2] 吴国栋,王儒述.万里长江第一坝:葛洲坝水利枢纽[J].自然杂志,1981(10):723-741.(WU Guo-dong, WANG Ru-shu. The first dam on Yangtze River: Gezhouba Hydrojunction[J]. Nature Magazine, 1981(10): 723-741. (in Chinese))
- [3] 夏自强,李琼芳,姜翠玲,等.河流自然功能的利用及保护研究[C]//水利部国际合作与科技司.河流生态修复技术研讨会论文集.北京:中国水利水电出版社,2005:52-59.
- [4] 董哲仁.水利工程对生态系统的胁迫[J].水利水电技术,2003(7):1-5.(DONG Ze-ren. Stress of water project on ecosystem[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2003(7): 1-5. (in Chinese))
- [5] 于国荣,夏自强,蔡玉鹏,等.河道大型水库水力过渡区及其生态影响研究[J].河海大学学报:自然科学版,2006,34(6):618-621.(YU Guo-rong, XIA Zi-qiang, CAI Yu-peng, et al. Hydraulic transitional region and ecological effects of river-type large-scale reservoir[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2006, 34(6): 618-621. (in Chinese))
- [6] 李记泽.河道洪水波波型识别[J].水利学报,1994(8):27-34.(LI Ji-ze. Identification of river flood wave types[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1994(8): 27-34. (in Chinese))
- [7] 黄景祥,钟秋友.单一水文站洪水波计算方法[J].武汉大学学报:工学版,1988(6):14-22.(HUANG Jing-xiang, ZHONG Qiu-you. Flood wave computation method by using the data of single hydrometric[J]. Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering, 1988(6): 14-22. (in Chinese))
- [8] 李琼芳,邹振华,郭瑾,等.人类活动对长江泥沙特征的影响[J].河海大学学报:自然科学版,2007,35(4):364-368.(LI Qiong-fang, ZOU Zhen-hua, GUO Jin, et al. Human-induced alteration in the sediment load of Yangtze River[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2007, 35(4): 364-368. (in Chinese))
- [9] 李香萍,杨吉山,陈中原.长江流域水沙输移特性[J].华东师范大学学报:自然科学版,2001(4):88-95.(LI Xiang-ping, YANG Ji-shan, CHEN Zhong-yuan. Characteristics of discharge and sediment transportation in Yangtze River[J]. Journal of East China Normal University: Natural Science, 2001(4): 88-95. (in Chinese))
- [10] 陈时若,黄光华.葛洲坝水利枢纽蓄水后宜昌站水位变化的探讨[J].人民长江,1990(1):30-37.(CHEN Shi-ruo, HUANG Guang-hua. Deep discussion of change of Yichang water level after the construction of Gezhouba Hydrojunction[J]. Yangtze River, 1990(1): 30-37. (in Chinese))
- [11] 卢金友.水利枢纽下游河道水位-流量关系的变化[J].水利水运科学研究,1994(增刊1):109-117.(LU Jin-you. Variation of stage-discharge relationship of downstream of hydro-junction[J]. Journal of Nanjing Hydraulic Research Institute, 1994(S1): 109-117. (in Chinese))

Influence of Gezhouba Project on hydrological and hydraulic characteristics of Yichang river reach

LI Fan^{1,2}, XIA Zi-qiang^{1,2}, WANG Yue-kui³

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. Hydrology and Waters Resources Monitoring Bureau, Taihu Basin Authority, Wuxi 214024, China)

Abstract: Based on observed hydrological data from Yichang Station before and after the impoundment of Gezhouba Reservoir, the influence of the Gezhouba Project on the stage-discharge relation, sectional profile and variation of water levels was analyzed. The results indicate that after the impoundment of Gezhouba Reservoir, the variation of hydrological and hydraulic characteristics of the Yichang river reach accord with the theories of inertia regions. The pattern of flood wave motion does not change. The velocity of the flow currents in front of the dam decreases, and the sediment carrying capacity of flow currents decreases, resulting in the increase of sediment deposition in Gezhouba Reservoir. The sediment concentration in the discharge water decreases, and the transport of bed load into the Yichang river reach also decreases. The discharged water has an increasing scour capacity along the waterway. The original erosion-deposition equilibrium changes: the riverbed materials become coarse, the sectional profile continuously changes, and the riverbed of the Yichang river reach cuts downwards. The flow capacity and flow velocity of the Yichang river reach increase, and its water level shows a certain decrease compared with that in a natural waterway with the same discharge.

Key words: Gezhouba Project; Yichang river reach; hydrological and hydraulic characteristics; characteristics of inertia region; stage-discharge relationship