

三峡水库排沙比与水沙因子响应关系

张倩倩^{1a,1b}, 童思陈^{1a,1b}, 龙孝平², 蒋聘凤^{1a,1b}

(1. 重庆交通大学 a. 河海学院; b. 国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074;
2. 长江生态环保集团有限公司, 湖北 武汉 430062)

摘要: 为研究实际水沙条件下排沙比与影响因素间的响应关系, 基于三峡水库 2003~2018 年实测水沙资料, 在分析水库来水来沙特性的基础上探讨了排沙比与各影响因子的响应关系, 并建立了主汛期排沙比关系式。结果表明, 排沙比与单因子影响因素的相关性不高, 说明排沙比受多因子综合影响。从水库的运行调度角度出发, 排沙比与滞洪时间呈负相关, 应通过缩短滞洪时间来提高排沙效率; 从来水来沙角度分析, 入库沙量越大, 细颗粒泥沙的排沙比越大, 粗颗粒泥沙则呈多来少排的特点。在主汛期, 排沙比与提出的表达式关系较好, 可为三峡水库调度提供参考。

关键词: 三峡水库; 泥沙淤积; 排沙比; 影响因子

中图分类号: TV145

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)08-0101-04

1 引言

长江上游水库的修建使三峡水库来水来沙特性发生了新的变化^[1], 目前库区实际泥沙淤积情况与论证阶段已有很大偏差^[2]。水库排沙比为一定时段内出库泥沙量和入库泥沙量的比值, 排沙比越大, 表明水库排沙效果越好, 泥沙淤积程度越小^[3], 因此可通过分析水库排沙比变化规律合理规划水库调度。三峡水库运行以来, 对三峡水库排沙效率及调控措施已进行了一系列研究, 如董占地等^[4]通过分析实测资料得出排沙比的主要影响因素是坝前水位和入库、出库流量; 黄仁勇等^[5]建立了汛期洪水排沙比公式, 可供实时调度决策使用。在增大排沙比的措施方面, 董炳江等^[6]基于三峡入库洪峰、沙峰传播的时间差异性, 提出沙峰调度策略; 王玉璇等^[7]将库区分段进行输沙比与影响因素的相关性分析, 并分别建立输沙比回归公式, 提出了提高水库排沙效率的调度思路。但目前对排沙比的研究存在实测资料年限较老或对排沙比影响因素的考虑不全面等问题, 尤其缺少排沙比与组合因子的响应关系分析。鉴于此, 本文以 2003~2018 年实测资料为基础, 分析排沙比

与单因子相关关系, 并针对入库水沙和水库调度两方面研究排沙比与组合因子的响应规律, 提出增大排沙比的可行措施, 为三峡水库制定更高效的排沙措施提供参考。

2 三峡水库来水来沙特性

三峡水库不同蓄水阶段回水位置不同, 因此各阶段入库控制站亦不同(表 1), 出库控制站选为黄陵庙水文站, 其位置见图 1。

表 1 三峡水库入库出库控制站

Tab. 1 Three Gorges Reservoir(TGR) inbound and outbound control station

阶段	时间	回水 末端	控制站	
			入库	出库
围堰蓄水期	2003-06~2006-08	涪陵	清溪场	黄陵庙
初期蓄水期	2006-09~2008-09	铜锣峡	寸滩+武隆	黄陵庙
试验性蓄水期	2008-10~2018-12	江津	朱沱+北碚+武隆	黄陵庙

注: 各阶段基础数据为日均流量、日均含沙量、泥沙级配、水位。

基于三峡水库 2003~2018 年实测资料, 首先对水库来水来沙特性进行简要分析。图 2 为 2009~2018 年三峡水库入库水量及沙量变化。由图 2 可知, 三峡水库试验性蓄水运行以来入库水量变化不大, 但入库沙量大幅减小, 尤其是在

收稿日期: 2022-10-14, **修回日期:** 2022-11-05

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB1600400); 重庆市基础研究与前沿探索项目(cstc2018jcyjAX0534)

作者简介: 张倩倩(1999-), 女, 博士研究生, 研究方向为水力学与河流动力学, E-mail: 1765053384@qq.com

通讯作者: 童思陈(1973-), 男, 博士、教授、硕导, 研究方向为水力学与河流动力学, E-mail: tongtsichen@163.com



图1 三峡水库入库出库控制站概位示意图

Fig. 1 Map of TGR inbound and outbound control stations

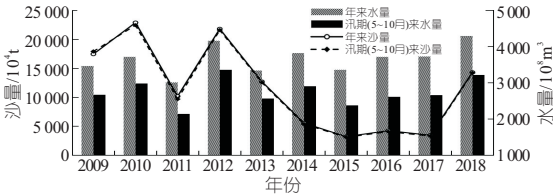


图2 三峡水库入库水量及沙量变化(2009~2018年)

Fig. 2 Water inflow and sediment change of TGR (2009-2018)

2012~2013年后。这是由于2012、2013年向家坝、溪洛渡相继运行,在其蓄水拦沙的影响下库区的来沙量大幅减少。来水来沙具有明显的季节性,75%左右的水量及98%左右的沙量集中在汛期。

3 水库排沙比与水沙影响因子响应关系

3.1 排沙比与单因子的响应关系

排沙比的影响因素大致分为入库水沙、水库调度方式、河道地形条件、人为因素四类。从可控工程运用角度出发,主要分析入库水沙变化和水库调度两方面对排沙比的影响,具体而言,入库水沙方面的基础数据主要包括入库流量 Q_{in} 、含沙量 S (或来沙量)、泥沙粒径 d ,水库调度方面主要包括出库流量 Q_{out} 和坝前水位 Z 。由于来水来沙集中于汛期,主要统计分析汛期排沙比的影响因素。

3.1.1 入库水沙变化对排沙比的影响

(1)入库流量。2008年10月三峡水库进入试验性蓄水阶段,2012、2013年向家坝电站、溪洛渡电站蓄水运行后三峡水库入库沙量明显减小,因此根据这两个重要的时间节点将数据分为2003~2008、2009~2012、2013~2018年三个阶段进行分析。图3(a)为三峡水库汛期排沙比与入库流量响应关系。由图3(a)可知,相同流量下,第一阶段(2003~2008年)排沙比最大,第二阶段(2009~2012年)最小,第三阶段(2013~2018年)又有所增大,这是由于2003~2008年三峡水库蓄水水位较低,流量一定的情况下,流速较

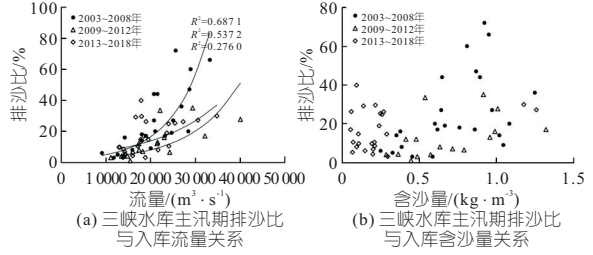


图3 三峡水库主汛期排沙比与入库流量、含沙量关系

Fig. 3 Relationship of SDR vs. inflow and sediment concentration of TGR in main flood season

大,水流挟沙力较强,因此排沙比较大;2009~2012年由于防洪需求水库蓄水,水位升高,水流挟沙力降低,排沙比也随之降低;2013~2018年主汛期水位较低,流速增大,排沙比也相应增大。可见,排沙比与入库流量大致呈正比关系,但相关性较差。尤其在入库流量大于 $15\ 000\ m^3/s$ 后,随着流量的增大,点群的分布越来越散乱,排沙比对入库流量变化的敏感性下降,这表明随着流量的增大,排沙比的影响因素越来越复杂。

(2)含沙量。图3(b)为三峡水库汛期排沙比与入库含沙量响应关系。由图3(b)可知,2003~2008、2009~2012年排沙比与入库含沙量关系较散乱,两阶段的来沙量也并无太大差别,且相同含沙量下排沙比的变化范围很大,此时排沙比主要受坝前水位的影响;2013~2018年月入库含沙量明显下降,几乎均小于 $0.5\ kg/m^3$,这是由于向家坝、溪洛渡水电站的相继运行,拦截了大部分泥沙。整体来看,含沙量的大小与排沙比并无直接对应关系,说明排沙比还受到其他因素的影响。

(3)泥沙粒径。由三峡水库入库泥沙粒径的级配变化可看出,2013年后上游溪洛渡、向家坝电站蓄水拦沙不仅大幅减小了三峡水库来沙量,也使其入库泥沙进一步细化。

由于未收集到年内泥沙粒径资料,本文分析了年际间排沙比与泥沙粒径响应关系,见图4。由图4可知,除2003、2004、2007年泥沙粒径大于 $0.125\ mm$ 的排沙比较大外,整体上2003~2018年泥沙粒径越细排沙比越大,说明考虑到水流强度,粗泥沙在水库沉积的概率高于细泥沙,体现了

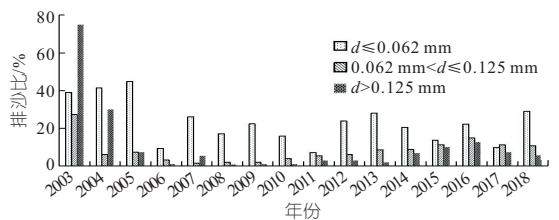


图4 三峡水库历年不同粒径泥沙排沙比变化

Fig. 4 Variation of SDR of different particle sizes in TGR over the years

水库“拦粗排细”的调控作用^[8]。

3.1.2 水库调度对排沙比的影响

(1) 出库流量。三峡水库为河道型水库,2003~2018 年汛期入库流量和出库流量呈线性相关,月入库流量和出库流量间相关系数高达 0.89,表明排沙比与入库流量响应关系的分析结果也适用于出库流量,因此只分析排沙比与入库流量的响应关系即可。

(2) 坝前水位。图 5 为三峡水库汛期坝前水位与排沙比关系。由图 5 可看出,坝前水位一定时,排沙比的变化范围较大,但总体来看,汛期坝前平均水位越高,排沙比越低。当汛期坝前水位高于 145 m 后月排沙比低于 40%;高于 155 m 后,排沙比几乎低于 20%。这是由于水库蓄水初期汛期平均水位较低,河道接近天然河道,当入库流量大时,库区流速大,携带的泥沙相对容易排出水库;汛期水位逐渐上升时,流速减慢,水库河道与天然河道的差别逐渐增大,泥沙容易淤积,因此排沙比下降。

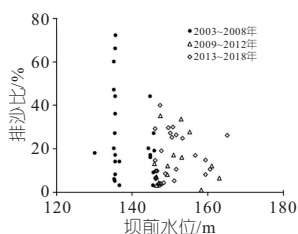


图 5 三峡水库汛期排沙比与平均坝前水位关系

Fig. 5 Relationship between SDR and average water level of TGR in flood season

通过排沙比与来水来沙及水库调度的单因子分析结果可看出,排沙比与单因子影响因素的相关性关系不明确,因此不能只分析单一因素对其的影响,需探讨排沙比与组合因子间的响应关系,分析多因素控制下排沙比的变化规律。

3.2 排沙比与多因子的响应关系

3.2.1 排沙比与入库流量及坝前水位响应关系

针对水库调度方面,主要研究出库流量与坝前水位对排沙比的综合影响,已知排沙比对出库流量与入库流量的响应具有一致性,因此用入库流量来代替。汛期坝前水位升高对排沙比的影响体现在两个方面:①水位高。库区水动力条件减弱,水流挟沙力下降,泥沙容易在库区沉积;②水位偏高时间长。即水流在库区停留的时间较长,泥沙在库区沉积的概率增大^[9]。水流在库区停留的时间可用滞洪时间 V/Q_{in} 来表示(V 为水库库容; Q_{in} 为入库流量)。不同坝前水位 Z 对应不同水库库容 V ,库容既可反映水库坝前水位的高低,又直接对库区流速产生影响,且平均坝前水位

可由三峡水库水位库容曲线^[10]查得,所以可利用滞洪时间建立排沙比与 Q_{in} 、 Z 的响应关系。

三峡水库汛期排沙比与滞洪时间关系见图 6。总体来看排沙比与滞洪时间呈反比。由图 6(a)、(b)可知,以年为单位统计的主汛期排沙比与滞洪时间关系较好,汛期则相关性稍差,排沙比与滞洪时间 V/Q_{in} 呈反比关系。当滞洪时间大于 10 d 时,排沙比小于 30%,因此要使排沙比增大,应缩短滞洪时间。滞洪时间又由入库流量和坝前水位控制,当入库流量一定时,坝前水位越高,滞洪库容则越大,洪水的滞留时间就越长,不利于水库排沙;当坝前水位一定时,滞洪库容也相应不变,此时流量越大,流速越大,滞洪时间就越短,有利于水库排沙^[5]。

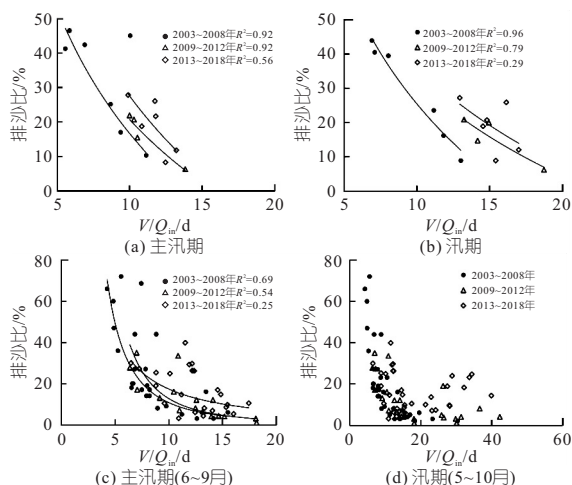


图 6 三峡水库不同阶段汛期排沙比与滞洪时间关系

Fig. 6 Relationship between SDR and detention time in flood season of TGR at different stages

以月为单位进行数据统计时,由图 6(c)可知,主汛期排沙比与滞洪时间呈反比,滞洪时间一般在 20 d 以内;由图 6(d)可知,汛期排沙比与滞洪时间的关系较离散,说明 5、10 月排沙比还受到其他影响因素的作用,而主汛期影响排沙比的关键因素为 V/Q_{in} 。

3.2.2 排沙比与入库沙量及泥沙粒径响应关系

不同粒径的泥沙和入库沙量与其排沙比间关系见图 7。由图 7 可知,随着泥沙粒径减小,排沙

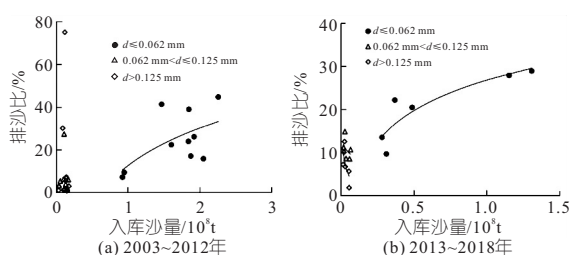


图 7 三峡水库不同粒径和入库沙量与其排沙比关系

Fig. 7 Relationship of SDR vs. different grain size and sediment inflow of TGR

比呈增大趋势。自 2012、2013 年上游溪洛渡电站、向家坝电站相继投入运行后,来沙量大幅减小,粒径小于 0.062 mm 的细沙 2003~2012 年入库沙量在 $0.8 \times 10^8 \sim 2.5 \times 10^8 \text{ t}$ 的范围内,2013~2018 年减至 $0.2 \times 10^8 \sim 1.5 \times 10^8 \text{ t}$ 之间,可见细颗粒泥沙来沙量与排沙比为正相关关系,随其入库沙量的增大排沙比有增大趋势,这是由于通常情况下来沙量大时伴有较大来流量,水流紊动作用越强,泥沙越细,越容易被挟带向下游。

对于粒径大于 0.062 mm 的粗颗粒泥沙,随着入库沙量的增加,排沙比呈降低趋势,虽然粗颗粒泥沙在入库沙量中占比不大,但由于其来的越多淤积越多,会一定程度上侵占有效库容,对水库长期使用产生不利影响,且粗沙是水轮机磨损的重要影响因素,因此粗颗粒泥沙对水库效益的影响亦不能忽视。

4 排沙比多因子关系表达式

根据排沙比与来水来沙、水库调度两方面的多因子影响规律,建立排沙比多因子关系表达式。由于出库流量与入库流量对排沙比的影响整体上呈一致性,但月度入库流量与出库流量值不一定相等,因此用出入库流量系数 Q_{out}/Q_{in} 来反映当月水库的调控能力, Q_{out}/Q_{in} 越接近 1,对水库排沙效率的影响就越小。从便于实际工程运用的角度出发,入库流量和坝前水位的变化体现在滞洪时间上,入库沙量变化可体现在含沙量上,因此采用出入库流量系数、滞洪时间、含沙量来反映月度主汛期排沙比的变化规律,建立关系式为:

$$\eta = a (V/Q_{in})^b (Q_{out}/Q_{in})^c S^d \quad (1)$$

式中, η 为主汛期排沙比,%; V/Q_{in} 为滞洪时间, d; Q_{out}/Q_{in} 为出入库流量系数; S 为入库含沙量, kg/m^3 ; a, b, c, d 均为系数。

将 2003~2018 年作为整体按式(1)进行排沙比计算,通过 SPSS 回归分析,得到主汛期排沙比系数取值,关系式为:

$$\eta = 887.26 (V/Q_{in})^{-1.89} (Q_{out}/Q_{in})^{2.17} S^{-0.26} \quad (2)$$

将主汛期排沙比计算值与排沙比实测值进行对比(图 8),发现拟合曲线的 $R^2 = 0.88$,表明公式的拟合度较好,排沙比的计算值偏小,是实测值的 0.88 倍。图 8 中绝大多数散点均分布在 45° 线及其附近,但在排沙比大于 40% 的情况下稍有偏差,说明主汛期排沙比除受到滞洪时间、出入库流量系数、含沙量的影响外,也受其他因素综合影响。

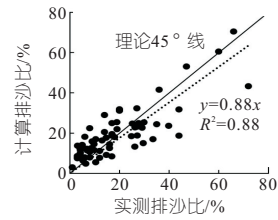


图 8 三峡水库主汛期排沙比实测值与计算值对比

Fig. 8 Comparison between measured and calculated SDR of TGR in main flood season

5 结论

a. 主汛期排沙比与单因素的响应关系并不理想,分析其与组合因子的响应关系更合理。其中在水库调度方面,主汛期排沙比与滞洪时间呈反比,应采取降低坝前水位,增大流量的调度措施;在来水来沙方面,三峡水库以细沙排沙为主,粗沙来的越多淤积越多。

b. 主汛期排沙比关系式的计算值与实测值吻合较好,但由于缺乏泥沙粒径资料,关系式适用于汛期较短时间内进出库流量不等且不考虑泥沙粒径等因素影响的情况,有一定的局限性。未来应着重研究泥沙粒径等其他因素与排沙比的响应关系,使表达式更准确地反映排沙比变化规律。

参考文献:

- [1] 韩闪闪. 三峡水库蓄水运用后进出库水沙变化分析[J]. 水电能源科学, 2014, 32(11):146-149, 175.
- [2] 李文杰. 三峡库区细颗粒泥沙淤积及一维数值模拟研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2021, 29(2): 251-260.
- [3] 李旺, 祖波, 李嘉雯. 三峡库区泥沙淤积特性研究[J]. 中国农村水利水电, 2021(8):18-22.
- [4] 董占地, 胡海华, 吉祖稳, 等. 三峡水库排沙比对来水来沙的响应[J]. 泥沙研究, 2017, 42(6):16-21.
- [5] 黄仁勇, 谈广鸣, 范北林. 三峡水库蓄水运用后汛期洪水排沙比初步研究[J]. 水力发电学报, 2013, 32(5):129-133, 152.
- [6] 董炳江, 乔伟, 许全喜. 三峡水库汛期沙峰排沙调度研究与初步实践[J]. 人民长江, 2014, 45(3):7-11.
- [7] 王玉璇, 金中武, 陈鹏. 三峡水库汛期排沙效率研究[J]. 人民长江, 2022, 53(5):14-19.
- [8] 郑珊, 张晓丽, 吴保生, 等. 小浪底水库水沙异步运动与排沙比[J]. 泥沙研究, 2021, 46(6):1-8.
- [9] 朱玲玲, 许全喜, 董炳江, 等. 金沙江下游溪洛渡水库排沙效果及影响因素[J]. 水科学进展, 2021, 32(4):544-555.
- [10] 周建军, 程根伟, 袁杰, 等. 三峡水库动库容特征及其在防洪调度上的应用:1. 库水位调度控制的灵敏性[J]. 水力发电学报, 2013, 32(1):163-167.

律,即坝顶峰值响应加速度随坝高增加呈现逐渐衰减的规律;远场地震动对坝体的加速度有很大的放大效应,对坝体加速度反应有长持时的影响。

参考文献:

[1] 战吉艳,陈国兴,刘建达,等.远场大地震作用下大尺度深软场地的非线性地震效应分析[J].岩土力学,2013,34(11):3229-3238.

[2] 胡聿贤.地震工程学(第2版)[M].北京:地震出版社,2006.

[3] DAVOODI M, JAFARI M K, HADIANI N. Seismic response of embankment dams under near-fault and far-field ground motion excitation[J]. Engineering geology,2013,158:66-76.

[4] 邹德高,韩慧超,孔宪京,等.近断层脉冲型地震动作用下面板堆石坝的动力响应[J].水利学报,2017,48(1):78-85.

[5] 李雪红,王文科,吴迪,等.长周期地震动的特性分析及界定方法研究[J].振动工程学报,2014,27(5):685-692.

[6] 温群昊.远场长周期地震动特性研究[D].上海:华东交通大学,2014.

[7] LIAO W I, LOH C H, WAN S. Earthquake responses of RC moment frames subjected to near-fault ground motions[J]. The structural design of tall buildings,2001,10(2):219-229.

[8] Peer strong motion database, <https://ngawest2.berkeley.edu/site>

[9] XU B, ZHOU Y, ZOU D. Numerical simulation on slabs dislocation of Zipingpu concrete faced rockfill dam during the Wenchuan earthquake based on a generalized plasticity model[J]. The scientific world journal,2014,7(1):1-5.

[10] 周扬.汶川地震紫坪铺面板堆石坝震害分析及面板抗震对策研究[D].大连:大连理工大学,2012.

Long-period Seismic Dynamic Response of High Face Rockfill Dam with Deep Overburden

LI Hui-min^{1,2,3,4}, ZHAI Ning-huan¹, ZHAO Meng-die^{1,2,3,4}, CHEN Shou-kai^{1,2,3,4}, WANG Lun-yan^{1,2,3,4}

(1. School of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China; 2. Henan Water Valley Innovation Technology Research Institute Co., Zhengzhou 450000, China; 3. Henan Key Laboratory of Water Resources Conservation and Intensive Utilization in the Yellow River Basin, Zhengzhou 450000, China; 4. Key Laboratory of Water Environment Simulation and Management in Henan Province, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: With many hydropower resources, Southwest China is a crucial area for current and future hydropower construction. However, most southwestern regions have deep overburden problems and high seismic intensity. The impact of these problems on the regular operation of high-face rockfill dams cannot be ignored. This paper established two-dimensional finite element models of 100 m, 200 m, and 300 m high-face rockfill dams on 100 m-deep overburden. Under the action of long-period ground motion and conventional ground motion, the elastic-plastic constitutive model was used to study the dynamic response characteristics of face rockfill dams with different heights on the same deep overburden. Compared with conventional ground motions, the results show that long-period ground motions significantly influence the acceleration of deep overburdened high-face rockfill dams. As the height of the dam body increases, the peak acceleration of the dynamic response of the dam body gradually decreases. Moreover, under the action of long-period ground motion, the higher the dam body is, the greater the displacement increment of the dam body in a short time. In this way, the resulting deformation is also more significant, which is not conducive to the seismic stability of the dam. Therefore, when building panel rockfill dams in areas with deep overburden and frequent long-period earthquakes, the effect of long-period ground shaking should be considered as a part of seismic stability evaluation.

Key words: long period-ground motion; deep overburden; high concrete face rockfill dam; seismic response analysis

(上接第 104 页)

Response Relationship Between Sediment Discharge Ratio with Water Flow and Sediment Factors in Three Gorges Reservoir

ZHANG Qian-qian^{1a,1b}, TONG Si-chen^{1a,1b}, LONG Xiao-ping², JIANG Pin-feng^{1a,1b}

(1a. School of River and Ocean Engineering; 1b. National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. Yangtze Ecology and Environment Co., Ltd., Wuhan 430062, China)

Abstract: In order to study the response relationship between sediment discharge ratio (SDR) and influencing factors under actual water and sediment conditions, based on the measured water and sediment data of the Three Gorges Reservoir (TGR) from 2003 to 2018, this paper discussed the response relationship between SDR and various influencing factors on the basis of analyzing the characteristics of water and sediment from the reservoir, and established the formula of SDR in the main flood season. The results show that the correlation between SDR and single factor is not obvious, indicating that the SDR is affected by multiple factors. From the perspective of reservoir operation and regulation, the SDR is negatively related to the flood detention time, and the sediment discharge efficiency should be improved by shortening the flood detention time; From the perspective of incoming water and sediment, the greater the amount of sediment entering the reservoir, the greater the sediment discharge ratio of fine sediment is; Coarse sediment, on the contrary, is characterized by more coming and less discharging. In the main flood season, the relationship between the SDR and the proposed expression is good. This study can provide reference for the operation of TGR.

Key words: Three Gorges Reservoir; sediment deposition; sediment discharge ratio; influencing factors