

# 三峡水库蓄水后长江中游水沙时空变化的定量评估

班璇<sup>1</sup>, 姜刘志<sup>1</sup>, 曾小辉<sup>2</sup>, 杜耘<sup>1</sup>, 肖飞<sup>1</sup>, 凌峰<sup>1</sup>

(1. 中国科学院测量与地球物理研究所环境与灾害监测评估湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430077;

2. 中交第二航务工程勘察设计院有限公司, 湖北 武汉 430071)

**摘要:** 定量评价三峡蓄水后长江中游流域水文情势的时空变化, 为长江中游生态保护和区域水资源管理提供科学依据。采用变化范围法分析了长江干流5个水文站的流量、含沙量日均数据, 定量评估了三峡工程蓄水后, 长江中游水沙变化度最大的江段和水文指标类别, 及其对应的生态影响。研究表明三峡蓄水后, 下游河道含沙量的变化度远大于流量, 除城陵矶站外, 含沙量较蓄水前有了大幅度下降, 宜昌站的含沙量下降幅度达到了一个数量级, 洞庭湖对长江干流含沙量有明显的调蓄作用。流量的变化度随着与大坝距离的增加而减小, 且在7~11月流量下降幅度明显。这些水文节律的变化将影响下游鱼类产卵栖息地以及滞洪区水生生物与周边植被的生长。

**关键词:** 变化范围法; 三峡蓄水; 水沙时空变化; 水文特征指标

**中图分类号:** TV213.9      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-6791(2014)05-0650-08

河流建坝是一项颇有争议的重大人类活动。一方面为充分利用水资源、防洪减灾、改善航运和水力发电等做出重要贡献, 另一方面又带来大空间尺度(从流域到海洋)和长时间尺度(从年代到世纪)的环境问题<sup>[1-2]</sup>。为了更好地吸取河流建坝的经验和教训, 越来越多的科学家致力于建坝后环境变化的监测和研究。中国的三峡大坝是迄今为止世界上最大的河流水利枢纽工程, 对长江下游河段的环境、气候和水文情势等影响受到国内外高度关注<sup>[3]</sup>。三峡工程2003年按135 m蓄水, 2007年蓄水至156 m, 2009年抬高至175 m正常蓄水位<sup>[4]</sup>。三峡工程蓄水运用后, 下泄水量时空分布发生变化, 运用初期的下泄沙量大幅度减少, 导致坝下游河道发生长期、长距离的河床冲刷, 引起河型变异和河势调整等问题<sup>[5]</sup>。进而引起荆江三口分流分沙、长江中游干流和洞庭湖区防洪情势的变化, 改变了洪水时空分布和洪水行进规律, 原有的上下游各主要站之间的水文相关关系乃至江湖关系也将发生变化<sup>[6]</sup>。定量评估长江中下游主要控制站水文要素的变化, 探讨三峡大坝对下游水文情势的影响, 可为三峡大坝蓄水的环境效应研究提供理论基础, 为政府决策提供科技支撑。

水文情势的定量分析, 经历了只注重平均量, 到开始关注极大、极小量, 再到建立全面描述水文过程的指标体系这样一个发展历程<sup>[7]</sup>。自20世纪80年代, 国外学者提出了多种量化水文情势的生态水文指标体系<sup>[8]</sup>, 为了从众多指标中寻找一种简单且各指标间相互独立的水文指标体系, Olden和Poff<sup>[9]</sup>从13篇文献中共总结出33个水文指标。三峡工程蓄水后, 中国诸多学者采用Range of Variability Approach (RVA)变化范围法对长江中下游的水位和流量进行分析和评价<sup>[10-11]</sup>。研究表明, 三峡大坝的拦沙效应显著, 影响的空间尺度巨大, 在不同的空间位置其影响的性质和程度不同<sup>[12]</sup>。但是目前大多数研究主要对宜昌、汉口和大通站分析, 缺乏对下游多个水文站数据的系统分析和空间比较, 而且都是针对单个水文指标进行分析, 不能全面反映三峡蓄水对下游水文情势空间变化以及水文参数之间的相互影响。此外, 用来分析的数据比较陈旧, 只分析到2008年, 而三峡水库从2009年正式蓄水<sup>[11]</sup>。多数对于水沙的变化研究都是使用传统方法, 如相关

**收稿日期:** 2014-01-14; **网络出版时间:** 2014-08-06

**网络出版地址:** <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20140806.0836.006.html>

**基金项目:** 国家重点基础研究发展计划(973计划)资助项目(2012CB417001); 国家自然科学基金资助项目(51109195)

**作者简介:** 班璇(1981—), 女, 湖北武汉人, 副研究员, 博士, 主要从事生态水文方面的研究。

**E-mail:** banxuan@whigg.ac.cn

**通信作者:** 杜耘, Email: duyun@asch.whigg.ac.cn

性分析等, 所用指标单一, 如月流量、年流量的变化(均值、最大值、最小值), 无法定量反映三峡蓄水对长江中游水沙时空变化的影响。

本研究将采用变化范围法定量分析长江中游沿程 5 个水文测站流量、含沙量的 32 个具有生态学意义的水文指标, 定量评价三峡蓄水后长江中游流域水文情势的时空变化, 评价影响最大的江段和影响最大的水文指标类别, 为长江中游生态保护和区域水资源管理提供科学依据。

## 1 研究方法

### 1.1 研究区域

研究区域为三峡大坝以下的长江中游流域, 典型水文站为长江干流的宜昌、监利、螺山、城陵矶和汉口 5 个水文测站, 如图 1 所示。监测水文数据为 1980—2012 年流量、1987—2009 年含沙量的日均值。选择三峡工程起始蓄水年份(2003 年)作为水文变化突变年, 则三峡水库蓄水前(1980—2002 年)23 年资料代表人工干扰前的水文情势, 蓄水后(2003—2012 年)10 年资料代表人工干扰后的水文情势。长江中下游水文观测站的详细信息如表 1 所示。

表 1 长江中下游水文观测站的详细信息

Table 1 Detailed information on the gauge stations on the middle and lower Yangtze River

编号	站点	地理位置		流域面积/km <sup>2</sup>	时间序列		特征描述
		东经	北纬		流量	含沙量	
1	宜昌	111°17'	30°42'	1 005 501	1980—2012	1987—2009	距离三峡大坝最近的水文控制站
2	监利	112°53'	29°49'	—	1980—2012	1987—2009	四大家鱼产卵河段
3	城陵矶	113°08'	29°25'	—	1987—2012	1987—2009	洞庭湖水系出口控制站
4	螺山	113°22'	29°40'	1 294 911	1980—2012	1987—2009	白鱘豚自然保护区所在江段
5	汉口	114°17'	30°35'	1 488 036	1980—2012	1987—2009	汉江汇入长江的重要控制站

### 1.2 研究方法

河流的水文变化过程相当复杂, 涉及大量的信息和数据, 通过建立指标体系来研究复杂的水文过程, 是一种有效的分析手段。水文指标体系主要通过 5 组水文指标描绘河流水文变量年内的变化特征, 组 1: 月平均值变化; 组 2: 年均极值变化; 组 3: 年极值出现时间; 组 4: 高低值频率与持续时间; 组 5: 值变化幅度与逆转次数, 各组水文指标对应的指标含义参见文献[13-14]。变化范围法建立在 IHA(Indicators of Hydrologic Alteration)水文指标变化度的基础上, 其核心是将未受到或很少受到人工干扰, 基本上处于自然状态下的长期水文资料(≥20 年)作为定义水文变量变化范围的基础, 并以平均值±Δ(标准差)或 25%~75% 区间范围作为 IHA 指标的生态目标; 计算受人工干扰河流的 IHA 各指标特征, 并看其是否落在生态目标区间, 衡量水文状况变化对自然状态的偏离程度, 以确定水利工程对河流状态的改变程度, 来确定对河流生态环境的影响程度。人工干扰前后河流水文变量偏离度( $D_r$ )的计算公式:

$$D_r = (V_{post} - V_{pre}) / V_{pre} \times 100\% \tag{1}$$

式中  $D_r$  指 IHA 指标在人工干扰前后的偏离度;  $V_{pre}$  和  $V_{post}$  分别指人工干扰前后的水文变量值。

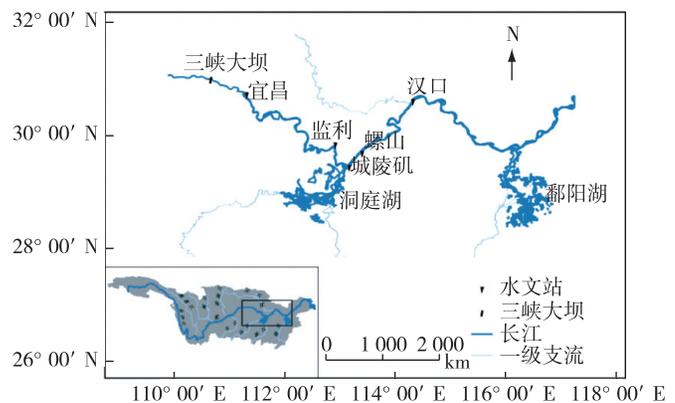


图 1 各水文站地理位置

Fig. 1 Locations of the gauges in the middle and lower Yangtze River

人工干扰前后河流水文变量的变化程度,可通过水文变化度  $D$  表示,其计算公式如下:

$$D = (N_o - N_e) / N_e \times 100\%; \quad N_e = rN_T \quad (2)$$

式中  $D$  为 IHA 指标的水文变化度;  $N_o$  和  $N_e$  分别为影响后水文系列 IHA 指标值落入 RVA 目标范围内的实际年数和期望年数;  $r$  为影响前 IHA 指标落入目标范围内年数的比例, 25%~75% 频率区间的目标范围,  $r = 50\%$ ;  $N_T$  为影响后水文系列的总年数。正偏差表示 IHA 指标值落入 RVA 范围内的年数比期望的多, 负偏差表示 IHA 指标值落入 RVA 范围内的次数比期望的少。 $D$  的绝对值处于 0~33%、33%~67%、67%~100% 区间时分别表示低变化度(L)、中变化度(M)、高变化度(H)<sup>[15]</sup>。

本文将应用 RVA 法对长江中游 5 个水文测站的流量、含沙量数据进行定量分析, 计算步骤包括: ① 确定水文基准年。通过已知的建库时间点来确定, 本研究选择三峡水库开始蓄水的时间点 2003 年; ② 计算建库前后各水文参数的 32 个水文指标, 由于零流量在长江干流不存在, 因而不予考虑零流量指标; ③ 计算水文指标的变化度, 比较高变化度水文指标在各水文站和每组指标中所占比例; ④ 分析受影响程度较大的水文站的水文指标在三峡大坝蓄水前后偏移度的变化趋势。⑤ 蓄水前后水文变量年内变化趋势的改变。

## 2 结果与讨论

### 2.1 蓄水前后水文指标变化度比较

计算各水文站在三峡大坝蓄水前后流量、含沙量的 32 个水文指标的数值和变化度值。绘制不同等级变化度在各水文站和每组所占比例(图 2)。图 2 柱体中的数字表示各等级变化度所占总指标数的百分比;  $R_1 = (N_1/32) \times 100\%$ ,  $R_1$  指各水文站不同等级的水文指标所占的比例,  $N_1$  指各水文站不同等级的水文指标个数;  $R_2 = (N_2/N \times 100)\%$ ,  $R_2$  指各组水文指标中不同等级的水文指标所占的比例,  $N_2$  指各组不同等级水文指标的个数,  $N$  指各组水文指标的总个数。

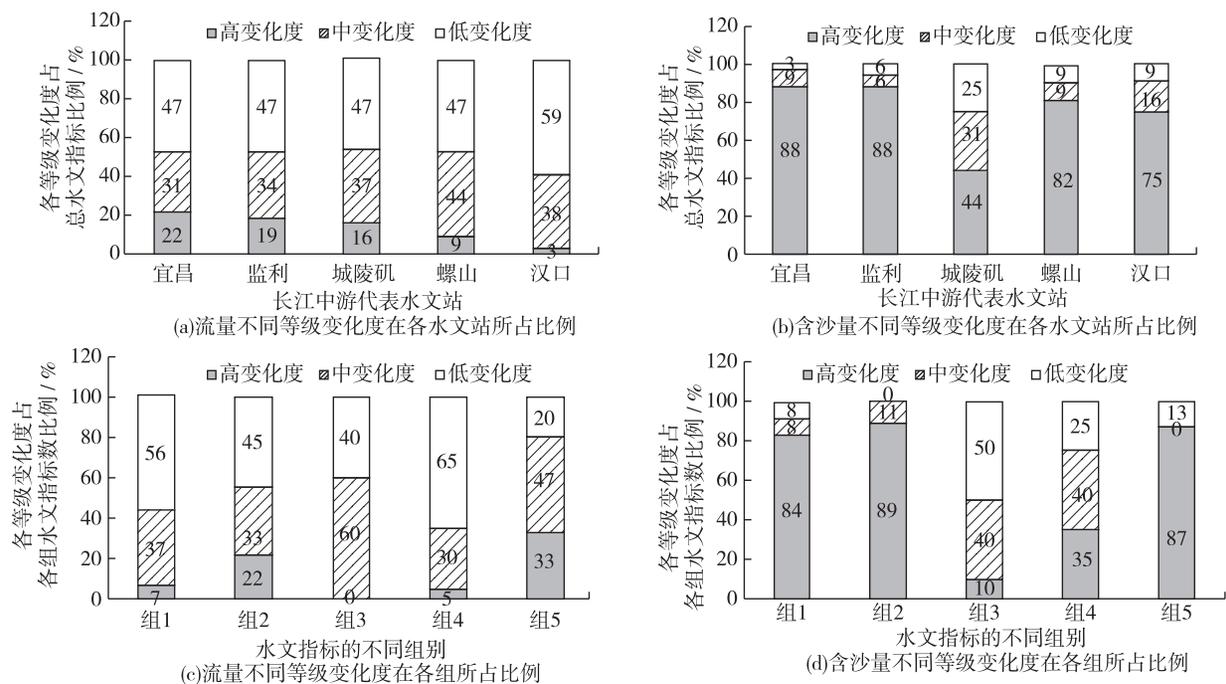


图 2 不同等级变化度在各水文站和每组所占比例

Fig. 2 Proportion of alteration degrees in different ranks in each hydrological station and indicator group

如图 2(a) 所示, 流量在变化度等级统计的总比例中低变化度占有的比例最大, 在各水文站的比例范围为 47%~59%; 中变化度占有的比例次之, 其比例范围为 31%~44%; 高变化度占有的比例最低, 其比例范

围为 3%~22%。如图 2(b) 所示, 含沙量在变化度等级统计的总比例中高变化度占有的比例最大, 在各水文站的比例范围为 44%~88%; 中变化度占有的比例次之, 其比例范围为 6%~31%; 低变化度占有的比例最低, 其比例范围为 3%~25%。流量高变化度占有比例在各水文站显示出非常明显的变化趋势, 离三峡大坝越远, 其高变化度所占比例越小, 从宜昌到汉口站依次为 22%、19%、16%、9%和 3%(平均为 14%)。含沙量高变化度的比例在各水文站整体趋势是随着离三峡大坝距离的增加而逐渐降低, 依次为 88%、88%、44%、81%和 75%(平均为 75%)。但是城陵矶站是一个特例, 含沙量高变化度的比例为 44%, 远小于其上下游的监利站和螺山站。

该结果显示三峡蓄水后, 下游河道流量的变化程度是低变化度的占主导, 含沙量的变化程度是高变化度的占主导; 说明三峡蓄水后流量的变化程度远小于含沙量。流量和含沙量变化度总体趋势随着与大坝距离的增加而逐渐减小。但含沙量高变化度的比例在城陵矶站出现了一个突变, 高变化度水文指标所占比例远小于其上下游的两个测站。推测由于城陵矶站处于长江与洞庭湖汇合处, 由于洞庭湖的调蓄作用使含沙量的变化程度远没有其它主干流水文站的剧烈<sup>[16]</sup>。

如图 2(c) 所示, 流量高变化度的比例在第 5 组中最大(33%), 其次是第 2 组(22%); 如图 2(d) 所示, 含沙量高变化度的比例在第 2 组中最大(89%), 其次是第 5 组(87%), 再次是第 1 组(83%)。高变化度所占比例区间为 0~33%、33%~67%、67%~100%时, 定义为影响程度较小、较大、极大。该结果说明三峡蓄水对流量的变化幅度与逆转次数影响较大; 对含沙量的年均极值、变化幅度与逆转次数、月均值等水文指标影响极大。

## 2.2 蓄水前后水文指标偏移度比较

选择高变化度比例最大的宜昌站, 高变化度比例出现突变点的城陵矶站以及城陵矶下游离它最近的螺山站, 进行三峡大坝蓄水前后流量和含沙量 32 个水文指标的偏移度分析, 正偏移表示水文指标较蓄水前量值变大, 负偏移表示水文指标较蓄水前量值变小(表 2)。

表 2 三峡蓄水后流量/含沙量 32 个水文指标的偏移度  
Table 2 Deviation ratio of 32 indicators of flow and sediment concentration after the impoundment of Three Gorges

水文指标	流量			含沙量			水文指标	流量			含沙量		
	宜昌	城陵矶	螺山	宜昌	城陵矶	螺山		宜昌	城陵矶	螺山	宜昌	城陵矶	螺山
1 月平均值	8	5	18	-77	-39	-47	年均 90 日最小值	20	-19	11	-76	-30	-52
2 月平均值	17	-18	8	-70	-34	-36	年均 1 日最大值	-12	-23	-14	-70	-22	-57
3 月平均值	24	1	3	-69	-31	-39	年均 3 日最大值	-13	-23	-13	-68	-20	-56
4 月平均值	4	-9	-6	-81	-31	-43	年均 7 日最大流量	-15	-26	-13	-70	-25	-56
5 月平均值	5	12	6	-96	-16	-60	年均 30 日最大值	-10	-20	-12	-79	-25	-63
6 月平均值	-11	-10	-4	-98*	-29	-67	年均 90 日最大值	-10	-15	-9	-85	-26	-68
7 月平均值	-17	-33	-24	-90	-28	-70*	基流指数	46	32	25	112*	33	55
8 月平均值	-7	-17	1	-91	-34	-76	年最小值出现时间	-47*	-15	-98*	-91	-16	-61
9 月平均值	-16	-14	-7	-84	-32	-67	年最大值出现时间	7	0	6	12	28	14
10 月平均值	-31	-34	-18	-97	-44	-76*	低值脉冲个数	63*	117*	50	11	40	-7
11 月平均值	-11	-45*	-19	-96	-41	-65	低值脉冲持续时间	-56*	-58*	-63*	127*	78*	65
12 月平均值	-6	-10	-1	-76	-25	-53	高值脉冲个数	0	-14	-33	-88	-46*	-86*
年均 1 日最小值	25	-17	15	-73	0	-40	高值脉冲持续时间	-38	-18	82*	-7	0	-14
年均 3 日最小值	21	7	12	-75	-4	-42	上升幅度	-28	-28	-20	-88	-50*	-76
年均 7 日最小值	22	11	12	-78	-21	-45	下降幅度	-7	-30	-25	-82	-33	-68
年均 30 日最小值	18	7	21	-74	-22	-47	逆转次数	28	3	1	-30	-3	6

注: \* 表示偏移度绝对值排序前 3 位的数值。

流量的 32 个水文指标正负偏移度所占比例相当, 除 6 个水文指标外(2、4、8 月平均流量, 年均 1 日最小流量, 年均 90 日最小流量, 高流量脉冲持续时间), 其余 26 个水文指标的偏移度方向在 3 个水文站保持一致。含沙量的 32 个水文指标负偏移度所占比例较大, 除 2 个水文指标外(低含沙量脉冲个数, 逆转次数),

其余 30 个水文指标的偏移度方向在 3 个水文站保持一致。各水文站间水文指标的不同步性反映了区域气候背景, 以及湖泊和河道支流汇流的影响, 且对流量影响的水文指标个数大于对含沙量的。

宜昌站作为三峡出库控制断面, 其受三峡水库运行影响的水文改变最具代表性, 因而以宜昌站为例, 分析流量的 32 个水文指标在三峡大坝蓄水后偏移度的变化(表 2)。宜昌站流量的月平均值, 1~5 月份偏移度为正值, 6~12 月份偏移度为负值, 说明三峡蓄水后宜昌站 1~5 月份的流量较蓄水前增大, 且在 3 月份流量增值最大; 6~12 月份的流量较蓄水前减少, 且在 10 月份降值最大。流量年内节律的变化与三峡水库的调度规则一致。该变化对葛洲坝下游中华鲟产卵栖息地的可获得性和适宜性产生较大影响, 中华鲟的主要产卵时间是 10~11 月, 受流量减少的影响, 中华鲟产卵的适宜栖息地面积将会减小<sup>[17]</sup>。

宜昌站年均最小流量均为正值, 说明其较蓄水前增大, 年均最大流量均为负值, 说明其较蓄水前减小。流量的基流指数(年均 7 日最小流量除以年均流量值)较蓄水前增加了 46%。由于三峡水库蓄丰补枯, 削减洪峰的调度规则, 流量的极值变化幅度在蓄水后被削弱了。极大值的变小, 会使河道和滞洪区之间的养分运输不畅, 严重影响滞洪区水生生物与周边植被的生长。

年最小流量出现的时间较蓄水前提前了 47%, 蓄水前最小值出现在儒略日为 47(2 月份)时, 蓄水后则为 25(1 月份), 年最大流量出现的时间推后了 7%(蓄水前为第 202 d, 蓄水后为第 216 d)。三峡水库蓄水后, 在非汛期(11~4 月份), 由于汛前泄水腾空防洪库容, 使最小流量发生的时间从 2 月份提前到 1 月份; 在汛期(5~10 月份), 三峡水库只是调节洪峰流量, 基本上不改变洪峰的出现时间, 故对最大流量发生时间改变较小。极值出现时间可作为生物体迁徙与繁殖活动的信号, 极小流量出现时间的提前会严重影响生物繁殖期内的行为过程和栖息环境。

低流量脉冲次数较蓄水前增加了 63%(蓄水前为 4 次, 蓄水后为 7 次), 但持续时间却减少了 56%(蓄水前为 5 d, 蓄水后为 2 d)。高流量脉冲个数不变, 但持续时间减少 38%(蓄水前为 8 d, 蓄水后为 5 d)。该结果显示三峡水库对低流量年内节律的影响大于对高流量的, 说明三峡水库运行对非汛期径流调节作用更大; 非汛期低流量的变化会影响河道的自然发展, 以及河流挟带营养物质的扩散和吸收, 影响河道生物的生长, 尤其是生活在河岸边的动植物。高流量持续时间的减少将对四大家鱼繁殖和产卵造成不利影响。

年内水流上升幅度减少了 28%, 下降幅度减少了 7%, 水文逆转次数增加了 28%。流量的变换频率与河流生态环境的变化周期有着紧密的联系, 频繁流量逆转会对河流低流速生物和河岸植物产生较大的影响, 破坏生物栖息环境的稳定性, 不利于生物生长。

城陵矶站流量的偏移度在月均值、年最大极值、低流量脉冲个数和下降幅度等水文指标上要大于宜昌站, 特别是低流量脉冲次数远高于其他两个水文站, 较蓄水前增加了 117%(蓄水前为 3 次, 蓄水后为 7 次), 持续时间减少了 58%(蓄水前为 13 d, 蓄水后为 6 d), 11 月份的流量减少了 45%。城陵矶站水文指标变化与宜昌站的不一致, 反映出湖泊调蓄对干流流量的影响。

螺山站流量的偏移度除高流量脉冲持续时间外, 其他水文指标的变化方向与宜昌站一致, 最小值出现的时间较蓄水前提前了一个月(蓄水前为 31 d, 蓄水后为 1 d), 低流量脉冲持续时间较蓄水前减少了 63%(蓄水前为 40 d, 蓄水后为 15 d), 高流量脉冲持续时间较蓄水前增加了 82%(蓄水前为 17 d, 蓄水后为 31 d)。螺山站水文指标变化与宜昌站的不一致, 反映出区域气候与支流汇入对干流流量的影响。

含沙量的 32 个水文指标的偏移度在三峡大坝蓄水后的变化规律非常明显, 各水文站的月均值、年均极大极小值都较蓄水前有了较大幅度的降低(表 2)。且各水文指标均是宜昌站的偏移度最大, 螺山站次之, 城陵矶站最小。含沙量的基流指数较蓄水前增加; 年最小含沙量出现时间推迟, 年最大含沙量出现时间提前; 低含沙量个数和持续时间增加, 高含沙量个数和持续时间减少; 上升和下降速率以及反转次数都较蓄水前降低。

### 2.3 蓄水前后水文变量的月均值变化趋势

分析蓄水前后水文变量的月均值变化趋势可以看出三峡大坝蓄水对年内水文情势的影响程度(图 3, 图 4)。3 个水文站的年内流量都是从 7 月份开始降低, 降低幅度随着月份的推移逐渐减小, 到 12 月份基本和蓄水前的流量一样。三峡蓄水造成了 7~11 月份流量的减少, 且 7 月份减少的幅度最大, 对其他月份的流量

基本没有影响。3 个水文站的含沙量下降幅度不一致, 宜昌站含沙量下降幅度最大, 达到了一个数量级; 螺山站次之; 城陵矶站最小, 几乎和蓄水前一样。蓄水后, 宜昌站和螺山站含沙量的变化趋势一致, 都在 7~9 月份达到较大值, 螺山站的含沙量大于宜昌站。蓄水前宜昌站含沙量的峰值出现在 7 月份(1.0 的数量级), 螺山站出现在 8 月份。蓄水后宜昌站峰值被大幅度削弱, 含沙量仅仅在 7~9 月份较大(0.1 的数量级), 其他月份几乎为 0(0.01 的数量级)。

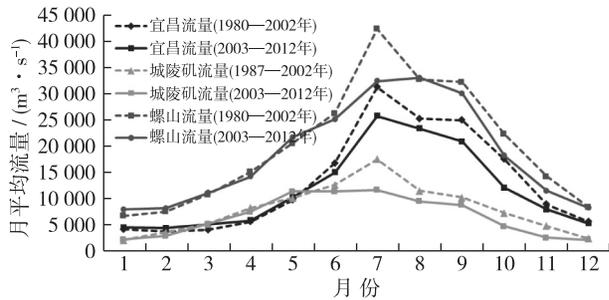


图 3 三峡蓄水前后各水文站月平均流量变化

Fig. 3 Monthly average flow changes in three hydrological stations response to the impoundment of Three Gorges

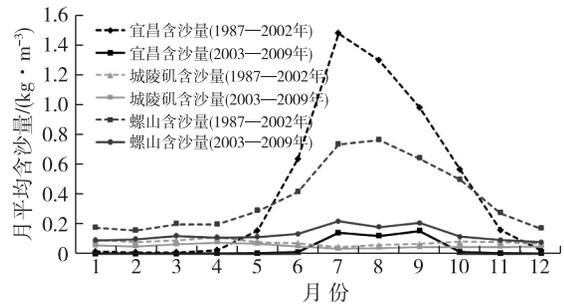


图 4 三峡蓄水前后各水文站月平均含沙量变化

Fig. 4 Monthly average sediment concentration changes in three hydrological stations response to the impoundment of Three Gorges

为了进一步探究湖泊调蓄作用对长江干流所造成的影响, 对比监利、城陵矶、螺山 3 个站含沙量变化度(图 5) 绝对值的差别。

如图 5 所示, 如果不考虑湖泊调蓄和区域气候以及汇流的影响, 推测含沙量的变化规律应该是随着与大坝距离的增大, 变化度依次减小。但是含沙量的 32 个水文指标中, 有 19 个水文指标显示出城陵矶站变化度要远小于监利和螺山站(图中红色柱体所示), 含沙量的变化度在月均值、年极值和水文逆转次数等水文指标上远没有其上下游长江干流其他水文站的变化程度剧烈。由图 4 所示, 观察宜昌、城陵矶和螺山站含沙量月均值的变化规律, 发现城陵矶的含沙量在三峡蓄水前就远小于宜昌和螺山站, 因而由于其本底值原本就很低, 三峡蓄水后即使流入洞庭湖的泥沙量减小了, 但是位于洞庭湖出口的城陵矶站含沙量的减小幅度并不明显, 充分显示了湖泊调蓄作用使得三峡蓄水对城陵矶站含沙量的影响没有其他干流站剧烈。

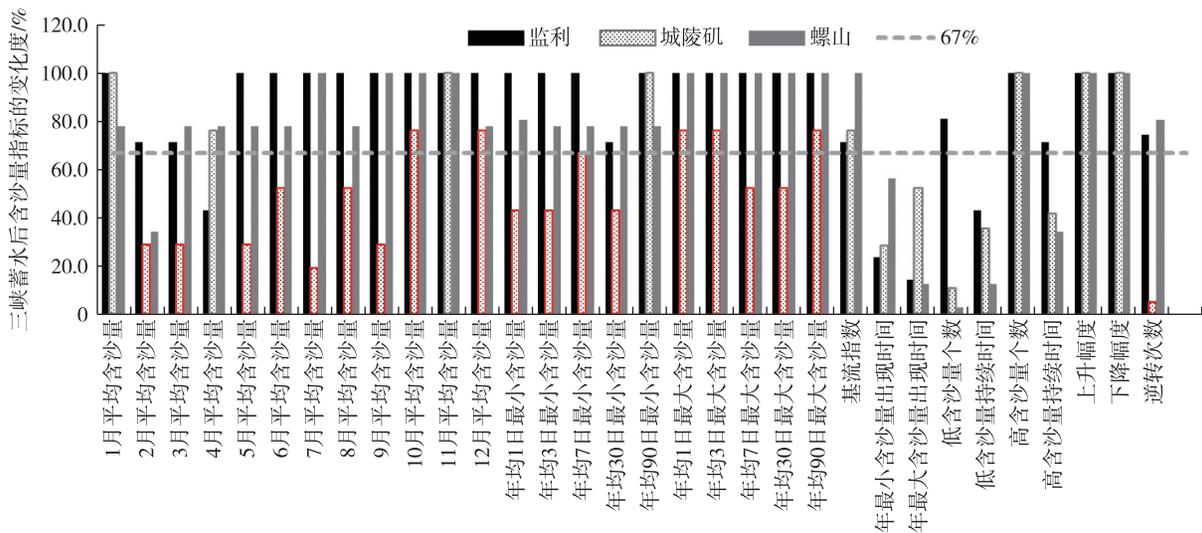


图 5 三峡蓄水后监利、城陵矶和螺山站含沙量的 32 个水文指标的变化度

Fig. 5 Degrees of hydrologic alteration of 32 IHAs in Jianli, Chenglingji and Luoshan stations response to the impoundment of Three Gorges

### 3 结 论

(1) 三峡蓄水后含沙量的变化度远大于流量,两者总体趋势随着与大坝距离的增加而逐渐减小。但含沙量高变化度的比例在城陵矶站出现了一个突变,高变化度水文指标所占比例远小于其上下游的两个测站。三峡蓄水对流量的变化幅度与逆转次数影响较大;对含沙量的年均极值、变化幅度与逆转次数、月均值等水文指标影响极大。

(2) 三峡水库对低流量年内节律的影响大于对高流量的,流量的极值变化幅度在蓄水后被削弱了;最小流量发生的时间提前,高流量持续时间的减少。由于湖泊调蓄以及区域气候与支流汇入对干流流量的影响,使得各测站流量水文指标变化趋势不一致,但含沙量的水文指标在各测站表现出高度的一致性,基本都是较蓄水前有了较大幅度的下降。这些水文节律的变化将影响葛洲坝下游中华鲟产卵栖息地,四大家鱼繁殖和产卵,以及滞洪区水生生物与周边植被的生长。

(3) 三峡蓄水后,长江干流 7~11 月份流量减少了,且 7 月份减少的幅度最大;宜昌站含沙量的下降幅度最大,达到了一个数量级;城陵矶站含沙量的变化幅度最小。蓄水后,宜昌站和螺山站含沙量的峰值被大幅度削弱,含沙量仅仅在 7~9 月份较大,且两者变化趋势一致;蓄水后,螺山站的含沙量大于宜昌站。城陵矶站由于受洞庭湖调蓄影响,蓄水前含沙量就远小于其上下游干流站,因而三峡蓄水后虽然流入洞庭湖的泥沙量减小了,但是位于洞庭湖出口的城陵矶站含沙量变化程度不明显。

#### 参考文献:

- [1] RITA B D, ANA B B, ULRICH S, et al. Phytoplankton composition, growth and production in the Guadiana estuary (SW Iberia): Unraveling changes induced after dam construction [J]. *Science of the Total Environment*, 2012, 416:300-313.
- [2] HUANG G W. Time lag between reduction of sediment supply and coastal erosion [J]. *International Journal of Sediment Research*, 2011, 26:27-35.
- [3] TENA A, KSIAZEK L, VERICAT D, et al. Assessing the geomorphic effects of a flushing flow in a large regulated river [J]. *River Research and Applications*, 2013, 29(7):876-890.
- [4] 水利部长江水利委员会,中国长江三峡工程开发总公司,国务院三峡工程建设委员会. 三峡(初期运行期)-葛洲坝水利枢纽梯级调度规程[R].2006: 10-16.(Yangtze River Water Resources Commission, Ministry of Water Resources, China, Three Gorges Project Corporation, Three Gorges Project Construction Committee, State Council of the People's Republic of China. Cascaded dispatching regulation of the Three Gorges-Gezhouba Water Conservancy Project (during the initial period) [R].2006: 10-16. (in Chinese))
- [5] 毛继新,韩其为. 三峡水库下游河道冲淤计算研究.三峡工程泥沙问题研究(1996—2000),第七卷[M]. 北京:知识产权出版社,2002: 26-66. (MAO Jixin, HAN Qiwei. Research on the channel scouring and deposition in the downstream of the Three Gorges reservoir. Study on the sediment of the Three Gorges Project (1996—2000), Vol. 7 [M]. Beijing: Intellectual Property Press, 2002: 26-66. (in Chinese))
- [6] 施勇,栾震宇,陈炼钢,等. 长江中下游江湖关系演变趋势数值模拟[J]. 水科学进展, 2010,21(6): 832-839.(SHI Yong, LU-AN Zhenyu, CHEN Liangang, et al. Numerical study of the evolution trend in the river-lake relationship in the middle and lower reaches of the Yangtze River[J].*Advances in Water Science*, 2010, 21(6): 832-839. (in Chinese))
- [7] 王俊娜,李翀,廖文根. 三峡-葛洲坝梯级水库调度对坝下河流的生态水文影响[J].水力发电学报,2011,3(2): 84-95. (WANG Junna, LI Chong, LIAO Wengen. Impacts of the regulation of Three Gorges-Gezhouba cascaded reservoirs on downstream eco-hydrology [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2011,3(2):84-95.(in Chinese))
- [8] SANDERSON J S, ROWAN N, WILDING T, et al. Getting to scale with environmental flow assessment: The watershed flow evaluation tool [J]. *River Research and Applications*, 2012, 28(9):1369-1377.
- [9] OLDEN J D,POFF N L. Redundancy and the choice of hydrologic indices for characterizing flow regimes [J]. *River Research and Applications*,2003(19):101-121.
- [10] ZHANG Qiang, CHONG Yuxu, SINGH V P, et al. Multiscale variability of sediment load and flow of the lower Yangtze River ba-

- sin: Possible causes and implications [J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 368:96-104.
- [11] ZHANG Qiang, SINGH V P, CHEN Xiaohong. Influence of Three Gorges Dam on flow and sediment load of the middle Yangtze River, China [J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2012, 26(4): 569-579.
- [12] 施勇, 栾震宇, 陈炼钢, 等. 长江中下游江湖水沙调控数值模拟[J]. *水科学进展*, 2010, 21(6): 823-831. (SHI Yong, LUAN Zhenyu, CHEN Liangang, et al. Numerical simulation of flow-sediment transport on the river-lake in the middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. *Advances in Water Science*, 2010, 21(6): 823-831. (in Chinese))
- [13] RICHTER B D, BAUMGARTNER J V, POWELL J, et al. A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems[J]. *Conservation Biology*, 1996, 10(4): 1163-1174.
- [14] RICHTER B D, JEFFREY V, BAUMGARTNER D P, et al. A spatial assessment of hydrologic alteration within a river network [J]. *Regulated Rivers: Research & Management*, 1998, 4(14): 329-340.
- [15] BRIAN D R, JEFFREY V B, JENNIFER P, et al. A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems [J]. *Conservation Biology*, 1996, 10(4): 1163-1174.
- [16] 姚仕明, 卢金友. 三峡水库蓄水运用前后坝下游水沙输移特性研究[J]. *水力发电学报*, 2011, 30(3): 118-123. (YAO Shiming, LU Jinyou. Research on water and sediment transport characteristics downstream the Three Gorges Reservoir before and after its impoundment [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2011, 30(3): 118-123. (in Chinese))
- [17] BAN Xuan, DU Yun, LIU Huanzhang, et al. Applying instream flow incremental method for the spawning habitat protection of Chinese Sturgeon [J]. *River Research and Applications*, 2011, 27(1): 87-98.

## Quantifying the spatio-temporal variation of flow and sediment in the middle Yangtze River after the impoundment of the Three Gorges\*

BAN Xuan<sup>1</sup>, JIANG Liuzhi<sup>1</sup>, ZENG Xiaohui<sup>2</sup>, DU Yun<sup>1</sup>, XIAO Fei<sup>1</sup>, LING Feng<sup>1</sup>

(1. *Key Laboratory for Environment and Disaster Monitoring and Evaluation, Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077, China*; 2. *CCCC Second Harbor Consultants Co. Ltd, Wuhan 430071, China*)

**Abstract:** In the present work, spatial and temporal changes of hydrological regime in the middle reaches of the Yangtze River after the impoundment of the Three Gorges Project were quantitatively evaluated, which provides a scientific evidence for the ecological protection of the middle reaches of the Yangtze River and regional water resources management. The range of variability approach was used to analyze average daily data for discharge and sediment concentration from five hydrological stations on the stem stream of the Yangtze River. Thus, river sections with the maximum water and sediment variation degree in the middle reach of Yangtze River and hydrological index categories and their corresponding ecological effects after the impounding of Three Gorges Project were quantitatively evaluated. The results showed that the changes of sediment concentration downstream were far greater than that of discharge after the impounding of the Three Gorges Project, which had a large scale decline compared with that of before the impounding except for Chenglingji station. Decrease range of sediment concentrations in Yichang station attained to one order of magnitude. The regulations of Dongting Lake on sediment concentration were obvious. Variation of discharge decreased with the increase of the distance from the dam, with a decrease of flow obvious between July and November. These changes in hydrological regime will affect both the fish-spawning habitat downstream and the growth of the aquatic organisms in the retarding area and the surrounding vegetation.

**Key words:** range of variability approach; the impoundment of the Three Gorges; spatio-temporal variation of flow and sediment concentration; indicators of hydrological characteristics

\* The study is financially supported by the National Basic Research Program of China (No. 2012CB417001) and the National Natural Science Foundation of China (No. 51109195).