

# 三峡水库对坝下河流水文情势影响研究

王鸿翔, 陈鼎新, 李越, 查胡飞, 郭文献

(华北水利水电大学, 河南 郑州 450045)

**摘要:**选取三峡水库下游宜昌水文站 1950-2016 年近 70 年的流量资料, 采用 Mann-Kendall 法, 分析宜昌水文站流量变化趋势。基于水文改变指标法(IHA)和变化范围法(RVA)评价三峡工程蓄水前后宜昌水文站 32 个 IHA 指标的水文改变程度, 分析高度改变的水文指标, 并基于 32 个 IHA 指标计算的水文改变度( $D_0$ )和 DHRAM, 分析三峡水库蓄水前后宜昌水文站整体水文情势变化, 对宜昌站的水文改变程度进行定量评价。结果表明, 在研究期间内, 宜昌站年均流量呈减少趋势, 在 Mann-Kendall 趋势检验中通过了 95% 的显著性检验, 表明年均流量减少趋势显著; 非汛期流量增加, 汛期流量减少; 年均最小流量和年均最大流量分别表现为增大和减少的趋势, 年最小流量出现时间提前; 低脉冲发生频率消失, 高脉冲发生次数和历时略有下降; 上升率和下降率均有减少趋势, 逆转次数的水文改变度达到 100%。通过 DHRAM 和  $D_0$  计算后, 水文情势整体为中度改变。

**关键词:**三峡水库; 水文情势; IHA 参数; 水文改变度

**中图分类号:** X143 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-3075(2018)05-0001-06

近几十年来, 长江流域水资源的开发利用程度不断加大, 在河流上进行筑坝拦截水量用于防洪、发电和灌溉, 使得河流生态环境遭到破坏(郭文献等, 2009)。尤其是三峡水库的修建, 该工程运行为社会带来巨大经济效益的同时, 也改变了长江流域的天然水文情势, 直接或间接影响了该流域重要生物资源的栖息地环境和生活习性, 改变了生物群落的结构组成与分布特征, 从而对长江中下游一定范围内的生态环境产生深远影响(王学雷和姜刘志, 2015)。为此, 国内外学者进行了大量的关于筑坝对河流水文情势影响的研究, 经历了由开始仅注重分析平均值和极大、极小值到建立水文指标体系全面分析水文情势的发展过程(班璇等, 2014); 其中, 变化范围法(RVA)是基于水文改变指标法(IHA)来研究生态水文情势的改变, 能够有效评价筑坝对河流生态水文情势的影响, 该法已广泛应用于河流水文情势评价研究中(陈栋为等, 2011)。

本研究选取三峡水库下游宜昌水文站 1950-2016 年的历史流量数据, 采用 Mann-Kendall 法分析宜昌水文站流量趋势变化, 基于水文改变指标法(IHA)和变化范围法(RVA)评价宜昌水文站在三峡工程蓄水前后 32 个 IHA 指标的水文改变程度, 分析高度改变的水文指标, 并基于 32 个 IHA 指标计算的  $D_0$  和 DHRAM 分析三峡水库蓄水前后宜昌站生态水文情势变化情况, 进而对宜昌站的水文改变程度进行定量评价, 旨在为长江中下游生态保护和区域水资源管理提供科学依据。

## 1 研究区概况

三峡工程是世界上最大的水利枢纽工程, 具有防洪、发电、航运、旅游等综合效益的功能。坝址位于湖北省宜昌县三斗坪镇, 控制流域面积 100 万  $\text{km}^2$ , 是治理和开发长江的一项关键性骨干工程(卞俊杰和陈峰, 2006)。三峡水库于 2006 年 6 月初次蓄水, 11 月蓄水至 139 m 高程, 2006 年第二次蓄水达到 156 m 高程; 2008 年全面蓄水, 水位达 172 m, 使该工程的防洪潜力最大化; 2010 年达到历史最高水位 175 m(Zhang et al, 2016)。

宜昌站位于三峡水库下游 44 km 处, 处于长江上游与中游的交界处, 是三峡水库流出控制站, 能够较好的反映三峡水库蓄水前后的水文情势变化(郭文献等, 2009)。因此, 本研究采用宜昌水文站历史流量进行分析。

**收稿日期:** 2018-05-02

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51679090, 51609085, 51779094); 2016 年度河南省高校科技创新人才支持计划(16HASTIT024); 2016 年河南省科技攻关项目(162102110015); 2015 年度河南省基础与前沿技术研究计划(152300410113)。

**作者简介:** 王鸿翔, 1981 年生, 博士, 副教授, 主要从事河流生态水文与生态水力学研究。E-mail: whxzju@163.com

**通信作者:** 郭文献, 1979 年生, 博士, 副教授, 主要从事水文学水资源及生态水利研究。E-mail: guowenxian163@163.com

## 2 数据与方法

### 2.1 数据选取

研究区域为三峡以下的长江中游流域,典型水文站为长江干流的宜昌站。监测数据为1950-2016年的流量数据,选择三峡工程起始蓄水年份(2003年)作为水文变化的起始年;则三峡水库蓄水前(1950-2002年)53年资料代表人工干扰前的水文情势,选择蓄水后(2003-2016年)14年资料代表人工干扰后的水文情势。

### 2.2 研究方法

本文采取应用广泛的Mann-Kendall趋势性非参数统计检验方法(Burn & Hag Elnur, 2002; Kahya & Kalayc, 2004);此外,Richter等(1998)提出水文改变指标法(IHA),该法将水文情势分为5组33个参数,分别从流量、时间、频率、延时和改变率等方面分析河流水文情势变化(薛联青等,2017)。由于研究期间宜昌水文站并未出现零流量日,本文采用了32项IHA参数进行分析,其中包括月均流量(12项)、年极值流量大小(11项)、年极值流量发生时间(2项)、高低流量的频率及延时(4项)和流量改变率(3项)。Richter等(1997)提出变化范围法,该法以32个IHA指标为基础,通过分析水利工程建设前后的日流量数据,探究水文指标的改变程度。一般情况下,各指标的平均值加减标准差或以频率为75%和25%作为IHA指标的上下限,成为RVA目标。

为定量描述32个IHA指标中单个水文指标受影响后的改变程度,Richter等(1997)建议通过水文改变度来评估,各指标的具体水文变异度可由公式量化得到:

$$D_i = \frac{N_{0,i} - N_e}{N_e} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $D_i$ 为第*i*个指标的水文改变度; $N_{0,i}$ 为改变后的径流序列IHA值在25%~75%分类范围内的年数; $N_e$ 为相应的期望年数( $N_e = P \times N_T$ ,  $P$ 为50%, $N_T$ 为改变后径流序列的总年数)。

基于每个指标的改变程度 $D_i$ ,改变后序列总的水文改变度 $D_0$ 计算如下:

$$D_0 = \sqrt{\frac{1}{32} \sum_{i=1}^{32} D_i^2} \quad (2)$$

为了客观反映水文改变度的严重性,Richter等(1997)认为可以将水文改变度划分为3个不同等级的严重性,一般定义 $|D_i|$ 值在0~33%属于低度改

变或不发生改变;34%~66%属于中度改变;67%~100%属于高度改变;以此对河流水文情势进行量化判断(Richter et al, 1997; 姜刘志, 2014; 张宗娇等, 2016)。

Black等(2010)提出另一个广义的水文改变指标DHRAM来衡量人类活动对水文机制改变的程度和范围,该法适用于20年或以上的水文数据且干扰前后时间序列足够长,本研究时间序列满足要求。DHRAM基于IHA调整后32个参数,将每组参数的均值和离差系数的变化程度划分为3类:1表示改变程度最低,2表示改变程度中等,3表示改变程度最高)。DHRAM最终计算出一个分值,按分值评定出5个等级的影响程度(表1),分数值越大,表示河流的水文情势变化越大,生态系统遭受破坏的可能性越大。 $D_0$ 和DHRAM共同作为总水文改变度评估河流水文情势变化(顾西辉等,2016)。

表1 DHRAM等级分类

Tab.1 Classification of DHRAM

等级	分数范围	描述
1	0	未受影响
2	1~4	低度影响
3	5~10	中度影响
4	11~20	高度影响
5	21~30	严重影响

## 3 结果与分析

### 3.1 年均流量趋势性检验

趋势变化主要反映样本序列随着时间推移而表现出增加(减少或不变)的倾向。为探究三峡水库修建前后宜昌水文站年均流量的变化趋势,点绘出1950-2016年的年均流量变化过程曲线(图1)。由图1可知,在研究期间,宜昌水文站除1954年(特大洪水年)、1998年(特大洪水年)和2006年(特枯年)的年均流量有较大波动外,总体呈减少趋势。

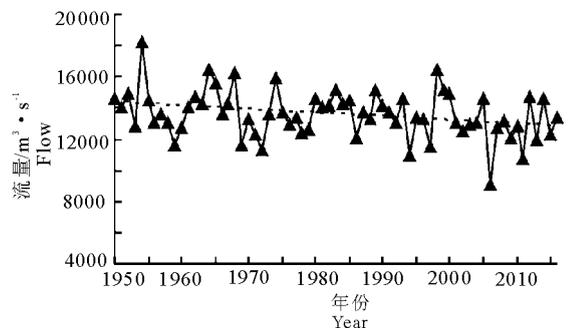


图1 宜昌水文站1950-2016年的年均流量变化

Fig.1 Mean annual flow from 1950 to 2016 of Yichang gauging station

通过 Mann-Kendall 检验宜昌水文站年均流量变化的趋势性, 可知宜昌水文站年均流量序列的 Mann-Kendall 趋势检验统计量值为 -2.07, 其绝对值大于 1.96, 表示在研究期间内宜昌水文站年均流量减少趋势在 Mann-Kendall 趋势检验中通过了 95% 的显著性检验, 年均流量减少趋势显著。

### 3.2 建库前后水文情势变化

为了揭示三峡水库蓄水后宜昌水文站水文情势

的变化程度, 将三峡水库起始蓄水年份(2003 年)作为分界点, 则 1950 - 2002 年的流量过程作为人工干扰前的水文情势, 2003 - 2016 年的流量过程作为人工干扰后的水文情势。在此基础上, 通过 IHA 和 RVA 法计算三峡水库蓄水前后对宜昌水文站流量序列的改变程度。

三峡水库蓄水后各流量指标参数的计算结果如表 2 所示。

表 2 三峡水库蓄水前后 IHA 参数计算结果

Tab.2 IHA values before and after Three Gorges Reservoir impoundment

IHA 指标	蓄水前		蓄水后		绝对变化率		水文改变度	
	均值	变异系数	均值	变异系数	均值	变异系数		
第 1 组	1 月均值	4 273	10.06	5 594	20.13	30.93	100.10	-54.11
	2 月均值	3 836	10.91	5 432	20.15	41.58	84.63	-89.48
	3 月均值	4 314	18.71	5 947	19.15	37.87	2.33	-77.06
	4 月均值	6 608	25.73	7 869	26.18	19.08	1.74	-5.36
	5 月均值	11 600	23.12	12 260	19.22	5.65	-16.85	18.98
	6 月均值	17 920	18.63	17 090	13.24	-4.61	-28.91	22.48
	7 月均值	30 020	19.82	26 770	22.09	-10.81	11.47	-28.38
	8 月均值	27 410	26.77	23 170	27.96	-15.47	4.46	-10.34
	9 月均值	25 340	25.78	20 940	32.65	-17.36	26.64	-5.36
	10 月均值	18 040	18.70	12 050	25.70	-33.23	37.48	-70.11
	11 月均值	10 020	15.91	8 996	23.91	-10.23	50.27	-35.10
	12 月均值	5 872	11.79	6 064	14.34	3.27	21.61	0.20
第 2 组	年均 1 日最小值	3 403	9.59	4 673	19.68	37.30	105.30	-89.48
	年均 3 日最小值	3 431	9.44	4914	21.78	43.24	130.70	-89.18
	年均 7 日最小值	3 485	9.60	4969	21.58	42.59	124.80	-89.18
	年均 30 日最小值	3 667	10.26	5214	20.10	42.17	95.93	-89.18
	年均 90 日最小值	4 118	11.41	5655	18.83	37.30	65.10	-77.06
	年均 1 日最大值	50 410	16.55	40660	21.31	-19.33	28.79	-33.19
	年均 3 日最大值	48 560	16.21	39800	20.98	-18.03	29.46	-22.06
	年均 7 日最大值	43 970	16.17	37190	19.57	-15.43	21.02	-18.15
	年均 30 日最大值	34 850	16.82	30300	20.44	-13.06	21.52	-14.82
	年均 90 日最大值	28360	16.33	24500	18.12	-13.63	10.93	-16.90
基流指数	0.25	12.96	0.40	23.31	55.46	79.83	-78.97	
第 3 组	年最小值出现时间	57.23	5.01	9	9.01	26.35	78.30	-57.94
	年最大值出现时间	214	6.87	216.40	7.61	1.32	10.66	-26.39
第 4 组	低脉冲次数	0.04	509.80	0	0	-100	-100	3.92
	低脉冲历时	10	113.10					-100
	高脉冲次数	5.02	41.44	4.14	45.26	-17.45	9.22	-11.96
	高脉冲历时	13.60	58.21	11.21	70.21	-17.60	20.61	-24.29
第 5 组	上升率	1 217	17.90	850	0.27	-30.18	48.93	-38.94
	下降率	-784.80	-15.39	-766.90	-0.21	-2.27	36.42	-33.19
	逆转次数	91.58	17.86	141.90	0.12	54.97	-34.98	-100

3.2.1 月均流量变化 三峡水库蓄水后, 宜昌水文站在非汛期 11 月到次年 5 月呈增加趋势, 而在汛期 6 - 11 月呈减少趋势, 到 12 月蓄水后的月均流量与蓄水前持平(图 2)。其主要原因是三峡水库丰水期蓄水与枯水期补水, 导致月均流量在非汛期和汛期分别呈增大和减少的趋势。

月均流量发生低度改变度居多, 发生高度改变的有 2、3、10 月, 其中 2 月的月均流量变化最为剧

烈, 水文改变度达到 89.48%。建库后宜昌水文站 2 月的月均流量处于 RVA 范围内的年数较少, 绝大部分高于 RVA 阈值, 说明建库后在枯水期为下游补水, 调节河流流量, 具有一定的抗旱能力, 但流量的高度改变可能影响水库下游河道生物的生态健康。

3.2.2 年极端流量变化及发生时间 由表 2 可以看出, 宜昌水文站年均最小流量在三峡蓄水后都有

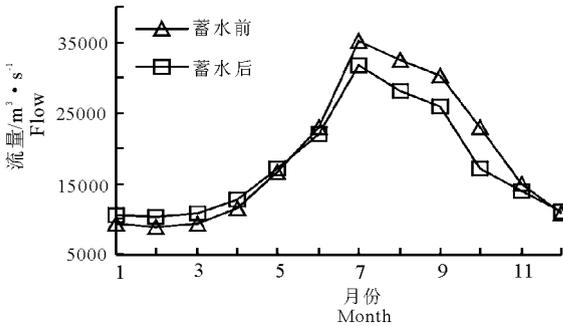


图2 三峡水库蓄水前后宜昌水文站月均流量变化

Fig.2 Comparison of mean monthly flow before and after Three Gorges Reservoir impoundment

### Three Gorges Reservoir impoundment

不同程度的增加,而年均最大流量在三峡水库蓄水后均有不同程度的减少,说明建库后由于水库蓄丰补枯、削减洪峰导致最大流量减少,最小流量增加。

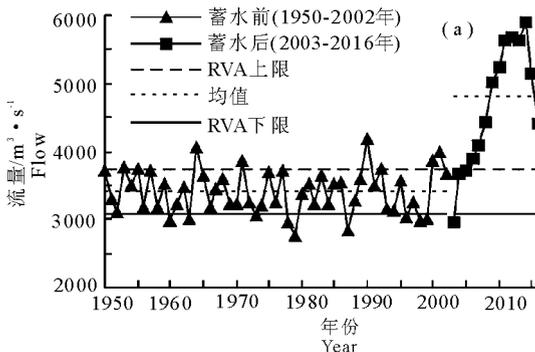


图3 宜昌站最小1日(a)和最大90日(b)流量变化

Fig.3 1-day minimum (a) and 90-day maximum flow (b) at the Yichang gauging station

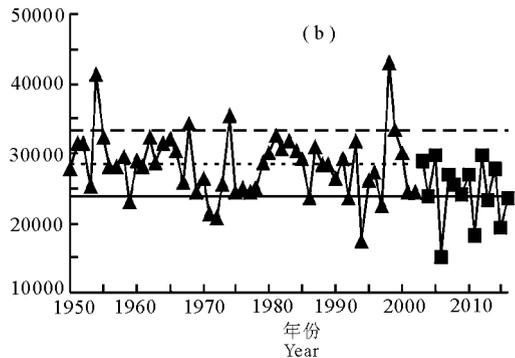
3.2.3 年极端流量发生时间 由表2可以看出,三峡水库蓄水后,宜昌水文站年最大值出现时间变化不大,相较于蓄水前只提前2 d,仍然集中在7月的汛期;最小值相较于蓄水前虽然仍在1-2月枯水期,但与蓄水前的差异较大,由蓄水前的2月下旬提前至1月上旬。总之,三峡水库蓄水后对最小值出现时间影响较大,破坏了河流生态系统的稳定。

3.2.4 高低脉冲出现的时间及历时 蓄水后,低脉冲消失;其原因为三峡水库在枯水期补水,增加枯水期的低流量,导致低脉冲于建库后消失。高脉冲次数和历时略有下降,水文改变度为低度改变,高低脉冲的改变对于河流生境具有重要影响。高脉冲的减少,低脉冲的消失,一方面可以削减洪峰、调节低流量,防止洪水、干旱的发生;另外一方面也会影响水生植物和周边植物对水分的要求。

3.2.5 流量变化改变率及频率 宜昌水文站上升率和下降率均有不同程度的减少,水文改变度为中度改变;逆转次数较蓄水前变化显著(图4),水文改变度高达100%。由图4可以看出,建库后逆转次

其中,年均最小流量都处于高度改变,而年均最大流量除年均最大90日流量处于高度改变外,其他均属于中度改变,说明三峡水库的修建对宜昌水文站年均最小流量影响更为显著。

图3是三峡水库蓄水后宜昌水文站水文改变度变化最为显著的最大与最小流量。可以明显看出,三峡蓄水后的年均最小1日流量绝大部分高于RVA阈值;年最大90日流量小于RVA阈值的年限明显增多,位于RVA阈值内的流量也明显降低。三峡水库蓄水前后极端流量的高度改变直接影响河流生态系统的稳定性、河流纵横断面以及自然栖息地的构建,且年最大流量变小,必定会对河道和滞洪区之间的养分交换造成影响,从而影响植物群落的分布(张飒等,2016)。



数明显增加,且全部超过RVA阈值上限。流量的频繁逆转,会破坏鱼类等水生生物的生长周期,对水生生物造成不利影响。

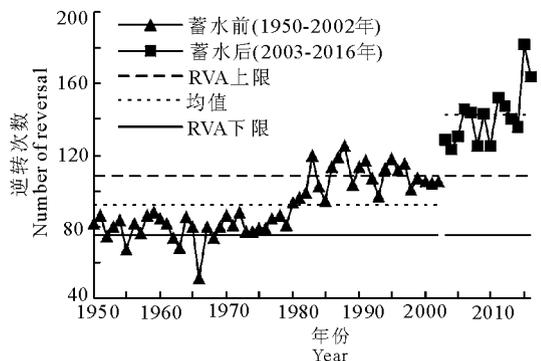


图4 宜昌站逆转次数变化

Fig.4 Variation of flow reversals at the Yichang gauging station

### 3.3 整体水文改变度

$D_0$ 和DHRAM的水文改变计算结果如表3。从DHRAM的打分情况和 $D_0$ 来看,宜昌水文站DHRAM总得分为5分,改变等级为3级, $D_0$ 为

56%。结果表明, 三峡水库蓄水后, 宜昌水文站通过 DHRAM 和  $D_0$  计算后, 水文情势整体为中度改变。

表 3 宜昌站整体水文改变度

Tab.3 Overall hydrological alteration degree of the Yangtze River at the Yichang gauging station

IHA 分组	变化比例/%		影响程度		总 分数	改变 等级	$D_0$ / %
	均值	离差系数	均值	离差系数			
1	19.20	32.20	0	1			
2	30.70	64.90	0	0			
3	13.80	44.50	1	1	5	3	56
4	45.00	43.30	1	1			
5	29.10	40.10	0	0			

## 4 结论

(1) 宜昌水文站年均流量呈下降趋势, Mann-Kendall 检验通过 95% 置信度检验, 表明年均流量下降趋势显著。

(2) 三峡水库蓄水后, 非汛期月均流量增加, 汛期流量减少, 2 月份变化最为显著; 年均最小流量和年均最大流量分别表现为增大和减少的趋势; 年最小流量出现时间提前; 低脉冲发生频率消失, 高脉冲发生次数和历时略有下降; 上升率和下降率均有减少趋势, 逆转次数水文改变度达到 100%。

(3) 通过  $D_0$  和 DHRAM 计算得出, 宜昌水文站整体水文改变度为中度改变, 表明整体上三峡水库蓄水后对宜昌站水文情势影响较为明显。

## 参考文献

- 班璇, 姜刘志, 曾小辉, 等, 2014. 三峡水库蓄水后长江中游水沙时空变化的定量评估[J]. 水科学进展, 25(5): 650 - 657.
- 卞俊杰, 陈峰, 2006. 三峡水库蓄水后库区水温影响分析[J]. 水利水电快报, 27(19): 7 - 10.
- 陈栋为, 陈晓宏, 李翀, 等, 2011. 基于 RAV 法的水利工程对河流水文情势改变的累积效应研究——以东江流域为例[J]. 水文, 31(2): 54 - 57.
- 顾西辉, 张强, 孔冬冬, 等, 2016. 基于多水文改变指标评价东江流域河流流态变化及其对生物多样性的影响[J]. 生态学报, 36(19): 6079 - 6090.

郭文献, 王鸿翔, 徐建新, 等, 2009. 三峡梯级水库对长江中下游水文情势影响研究[J]. 中国农村水利水电, (12): 7 - 10.

姜刘志, 2014. 三峡蓄水后长江中下游水文情势变化特征及其对鱼类的影响研究[D]. 北京: 中国科学院大学.

王学雷, 姜刘志, 2015. 三峡工程蓄水前后长江中下游环境流特征变化研究[J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 49(5): 797 - 804.

薛联青, 张卉, 张洛晨, 等, 2017. 基于改进 RVA 法的水利工程对塔里木河生态水文情势影响评估[J]. 河海大学学报(自然科学版), 45(3): 189 - 196.

张飒, 班璇, 黄强, 等, 2016. 基于变化范围法的汉江中游水文情势变化规律分析[J]. 水力发电学报, 35(7): 34 - 43.

张宗娇, 张强, 顾西辉, 等, 2016. 水文变异条件下的黄河干流生态径流特征及生态效应[J]. 自然资源学报, 31(12): 2021 - 2033.

Black A R, Rowan J S, Duck R W, et al, 2010. DHRAM: a method for classifying river flow regime alterations for the EC Water Framework Directive[J]. Aquatic Conservation Marine & Freshwater Ecosystems, 15(5): 427 - 446.

Burn D H, Hag Elnur M A, 2002. Detection of hydrologic trends and variability[J]. Journal of Hydrology, 255: 107 - 122.

Kahya E, Kalayc S, 2004. Trend analysis of streamflow in Turkey[J]. Journal of Hydrology, 289: 128 - 144.

Richter B D, Baumgartner J V, Braun D P, et al, 1998. A spatial assessment of hydrologic alteration within a river network[J]. River Research & Applications, 14(4): 329 - 340.

Richter B, Baumgartner J, Wigington R, et al, 1997. How much water does a river need? [J]. Freshwater Biology, 37(1): 231 - 249.

Zhang X, Dong Z, Gupta H, et al, 2016. Impact of the Three Gorges Dam on the Hydrology and Ecology of the Yangtze River[J]. Water, 8(12): 590. DOI: 10.3390/w8120590

(责任编辑 万月华)

## Impact of Three Gorges Reservoir on the Downstream Hydrology of Yangtze River

WANG Hong-xiang, CHEN Ding-xin, LI Yue, CHA Hu-fei, GUO Wen-xian

(North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, P.R.China)

**Abstract:** The Yichang gauging station of the Yangtze River is 44 km downstream of Three Georges Reservoir. In this study, changes in the hydrologic regime resulting from impoundment of Three Georges Reservoir was analyzed based on flow data from the gauging station from 1950 to 2016. Flow trends and hydrologic alteration were analyzed using the Mann-Kendall method with the Range of Variability Approach (RVA) and Indicators of Hydrologic Alteration (IHA). Changes in 32 IHA,  $D_0$  (degree of hydrologic alteration) and the Dundee Hydrological Regime Assessment Method (DHRAM) were employed to assess changes in river hydrology at the Yichang station. Results show that mean annual discharge decreased during the study period at a Mann-Kendall confidence level of 95%. Annual minimum flow increased, annual maximum flow decreased and the minimum flow occurred earlier in the year. The low pulse count was eliminated and the high pulse count and duration decreased slightly. Both rise and fall rates decreased and the number of flow reversals nearly doubled. Impoundment of Three Gorges Reservoir affected the hydrological regime at the Yichang station and, based on values of  $D_0$  and DHRAM, the alteration was moderate.

**Key words:** Three Gorges Reservoir; hydrological regime; Indicators of Hydrologic Alteration (IHA); hydrologic alteration