

# 大型水利工程对长江中下游水沙变化特征的影响分析

韩博闻, 李娜, 曾春芬, 王腊春

(南京大学 地理与海洋科学学院, 江苏 南京 210046)

**摘要:** 三峡大坝蓄水运用以后,直接影响中下游的径流量和输沙量。根据1988-2012年宜昌站、大通站的水文数据,运用相关分析法和Mann-Kendall非参数检验法,对比分析长江流域宜昌站和大通站的径流量和输沙量特性及其在时间和空间上的变化规律。结果表明:宜昌站、大通站年际径流量由于三峡大坝的蓄水存在波动,但未出现明显的趋势性变化;而输沙量从20世纪80年代就开始减少,在2003年三峡大坝建成之后减少的趋势更为明显,三峡大坝对下游水文站点的水沙影响随着与三峡大坝距离的增加而减少,上游宜昌站的水沙变化较下游大通站更为显著。

**关键词:** 径流量; 输沙量; 水沙关系; 长江; 三峡工程

中图分类号:TV121

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2015)02-0139-06

## Analysis of influence of large-scale water conservancy project on variation characteristics of water and sediment in middle and lower reaches of Yangtze River

HAN Bowen, LI Na, ZENG Chunfen, WANG Lachun

(School of Geographic and Oceanographic Science, Nanjing University, Nanjing 210046, China)

**Abstract:** After impoundment of the Three Gorges Dam, the runoff and sediment discharge of downstream are directly affected. According to the hydrological data in Datong and Yichang station for 1988 to 2012 year, the paper used correlation analysis method and non-parametric Mann-Kendall test to comparatively analyzed runoff and sediment discharge characteristics and its variation rule in time and space in Datong and Yichang station of Yangtze River Basin. It was found that due to the water storage fluctuations, the annual runoff in Yichang and Datong stations of Three Gorges Dam reservoir, but there do not appear significant trend change; and sediment began to decline from 1980s, the decrease trend of sediment discharge is clear in 2003 after completion of the Three Gorges Dam. The impact of the Three Gorges dam downstream on water and sediment of downstream hydrological stations decreases with the increase of distance away from Three Gorges Dam, the change of water and sand in the upstream of Yichang station is more significant than that in the downstream of Datong station.

**Key words:** runoff; sediment discharge; relationship between water and sediment; the Yangtze River; the Three Gorges Dam

## 1 研究背景

长江发源于青藏高原唐古拉山主峰的各拉丹东雪山,整个流域经历了我国的三级阶梯,共11个省

市,自西向东最后注入东海。长江也是我国的第一大河,全长约6300 km,长江的径流量在全国的河流中位居首位,而下游的三角洲河口地区更是资源丰富,人口众多,经济发达。长江流域水资源特性十分

收稿日期:2014-12-01; 修回日期:2014-12-16

基金项目:国家重点基础研究发展计划项目(973计划)(2013CB956503)

作者简介:韩博闻(1991-),男,江苏南京人,在读硕士研究生,研究方向为水资源与水环境。

通讯作者:王腊春(1963-),男,江苏金坛人,教授,博士生导师,主要从事水资源水环境方面研究。

突出:多年平均降水量 1 070 mm,降水充沛且汛期长,水量大,但时空分布不均匀;长江水量巨大,占全国径流总量的 35%,是黄河水量的 20 倍,且径流年内变化不大,但水资源地区分布不均匀,年内分布不均匀<sup>[1]</sup>。

近年来,围绕长江实施了三峡大坝,南水北调等一系列重点工程。这些水利工程能有效的防洪,同时也使北方许多缺水地区饮上了长江水。但是这些重大工程也给长江的水文带来了一些变化,最为显著的就是上游三峡大坝的蓄水导致长江中下游来水来沙量的变化,因为流域的水沙变化对于河流的地形地貌会产生十分重大的影响。例如在三峡工程蓄水以后,水库的调度和库区的淤积改变了长江中下游的来水来沙属性,使得进入长江中下游的泥沙大幅度减少<sup>[2]</sup>。

长江流域内人类活动频繁发生,人们修建水库、河道采砂、砍伐树木、保持水土都造成了长江河道的水沙态势发生变化,多年来,许多专家学着围绕长江的水沙变化展开了研究。方娟娟等<sup>[3]</sup>综合采用 Mann-Kendall 趋势检验、Pettitt 变点检验、Morlet 小波分析及径流年内分配量化等研究方法分析了长江大通站 1946-2009 年径流的变化趋势、突变点、周期和年内分配特征,为以后流域水资源的合理开发利用提供

科学依据。王延贵等<sup>[4]</sup>为探讨水库建设对水沙变化态势的影响,引入来沙系数、输沙模数和流域水库调控系数,深入分析了长江水库拦沙对水沙态势变异的作用,表明水库蓄水拦沙是长江水沙态势变异的主要因素。黄莉等<sup>[5]</sup>认为在河流上修建水库大坝工程以后,原有河道的水文特性改变,洪水及下泄流量减少,给工程上下游河道带来一定的影响,而清水下泄造成下游河道冲刷,河势重新调整。

本文依据长江宜昌站和大通站 1988-2012 年径流量和输沙量的水文资料,对长江中下游水沙变化的基本特征及变化趋势进行分析,探究水沙变化的原因,并对未来的水沙变化趋势进行探讨。

## 2 研究范围与方法

### 2.1 研究区概况及数据来源

长江宜昌站(111°17'E,30°42'N)位于长江上游和中游的交接处,距离三峡大坝 37 km,受三峡大坝的影响最为显著。长江大通站(117°37'E,30°46'N)地处长江中下游平原区,是亚热带湿润气候区,冬冷夏热,四季分明,且雨热同期,湿润多雨,长江下游的多数年份都有春雨、梅雨和秋雨<sup>[6]</sup>,因而大通站的径流量具有明显雨热同期的特点。长江流域重要水文站的分布图见图 1。



图 1 长江流域水文站分布图

大通站的流量常用来表示长江的入海流量,因为大通站以下到徐六泾站点的这段河段又被认为是感潮河段,在大通站以上,长江水位与流量之间有良好的相关性,而在大通以下,河流会同时受到径流和潮汐动力作用的影响,流量也会随着潮位的不同发生变化,传统水文站也不能很有效地检测断面的流量<sup>[7]</sup>。因此大通站的径流量和输沙量变化对于长江三角洲的河流地貌领域的研究十分重要。

本文所用的宜昌站和大通站 1988-2012 年的输沙量和径流量数据都来源于长江水利委员会水文局实测数据。

### 2.2 研究方法

(1)相关分析法。地理要素之间的相关性分析,可以揭示要素之间相互关系的密切程度。而要素之间相互关系密切程度的测定,主要是通过对相关系数的计算和检验来完成。

对于两个要素  $x$  和  $y$ , 如果它们的样本值分别为  $x_i$  与  $y_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ), 则它们之间的相关系数被定义为:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

式中:  $\bar{x}$  和  $\bar{y}$  分别表示两个要素样本值的平均值, 即

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$$

$r_{xy}$  为要素  $x$  与  $y$  之间的相关系数, 即表示两要素之间的相关程度的统计指标, 其值介于  $[-1, 1]$  区间。 $r_{xy} > 0$ , 表示正相关, 即两要素同向相关;  $r_{xy} < 0$ , 表示负相关, 即两要素异向相关。 $r_{xy}$  的绝对值越接近于 1, 表示两要素的关系越密切; 越接近于 0, 表示两要素的关系越不密切。

(2) Mann - Kendall 非参数检验法。Mann - Kendall 非参数检验法是判断时间序列趋势性的一种常用计算方法, 许多学者都采用 Mann - Kendall 非参数检验法来分析径流、输沙等要素时间序列的趋势变化, 因为 Mann - Kendall 检验不需要样本遵从一定的分布, 也不受少数异常值的干扰, 适用于水文等非正态分布的数据, 且计算简便<sup>[8]</sup>。通过计算不但可以看出变化趋势, 同时可以对变化趋势进行显著性分析<sup>[9]</sup>。方法如下:

统计量  $S$  的计算公式:

$$S = \sum_{k=1}^n \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k) \quad (2)$$

$$\text{sgn}(x_j - x_k) = \begin{cases} +1 & (x_j - x_k) > 0 \\ 0 & (x_j - x_k) = 0 \\ -1 & (x_j - x_k) < 0 \end{cases}$$

式中:  $x_j$  和  $x_k$  分别为第  $j$  年和第  $k$  年的数值,  $j > k$ ,  $n$  为序列的个数。

$E(S)$ ,  $\text{Var}(S)$  是累计数  $S$  的均值和方差, 因为  $S$  为正态分布, 所以其均值  $E(S)$  为 0, 方差  $\text{Var}(S)$  计算公式如下:

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (3)$$

标准正态分布的统计变量通过下式计算:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S < 0 \end{cases} \quad (4)$$

利用统计量  $Z$  的值进行趋势统计的显著性检验, 对于给定的显著水平  $\alpha$ , 查询双尾检验的正态分布表, 若统计量  $|Z| < Z_{\frac{\alpha}{2}}$ , 系列趋势并不显著, 否则趋势显著, 而且  $Z > 0$  表示该数据系列呈增加的趋势,  $Z < 0$  表示该数据系列呈减少的趋势<sup>[10]</sup>。

### 3 研究结果及分析

径流、输沙量的逐月变化是流域内水文气象因素、下垫面因素和人类活动因素综合作用的反映, 表示了径流量和输沙量随时间变化的规律<sup>[11]</sup>。年际变化系数的  $C_v$  值不仅反映总体的相对离散程度, 还可以反映该河流的径流量和输沙量的年际变化规律。三峡大坝蓄水前后宜昌站和大通站的多年平均径流量、输沙量的变化统计见表 1。

#### 3.1 径流量的年内分配变化

三峡大坝蓄水前后宜昌站和大通站的逐月平均径流量的对比见图 2。从图 2 看, 宜昌站和大通站径流量的年内分配都有不均衡的特点, 洪水季的径流量要大于枯水季, 宜昌站洪水季的径流量要占到全年径流量的 49.02%。三峡水库按正常蓄水位 175 m - 145 m - 155 m 的方式运行, 在水库调度的影响下, 枯水季宜昌站还出现了“削峰补枯”的现象, 2004 - 2012 年 1 - 5 月的平均径流量要大于三峡大坝蓄水前平均径流量。

在三峡大坝开始蓄水以后, 宜昌站和大通站洪水季也就是 7、8、9 三个月的径流量有了明显减少, 峰值变小, 趋势线变化的坡度也开始变缓, 尽管大通站径流量的峰值都出现在 7 月份, 但是三峡大坝蓄水以后大通站 7 月份的径流量从之前的 1 484.47 亿  $\text{m}^3$  下降到了 1 153.42 亿  $\text{m}^3$ , 下降了大约 22.3%。

表 1 三峡工程蓄水前后宜昌站、大通站径流量、输沙量统计

站名	径流量/亿 $\text{m}^3$			输沙量/亿 kg		
	1988 - 2003	2004 - 2012	距平比/%	1988 - 2003	2004 - 2012	距平比/%
宜昌站	4312.43	3964.78	-8.06	3871.08	427.40	-88.96
大通站	9414.39	8278.78	-12.06	3297.12	1383.02	-58.05

通过对宜昌站和大通站三峡大坝蓄水前后的径流量进行相关性分析,1988-2003年宜昌站和大通站径流量的相关性系数为0.96,说明宜昌站的径流量变化与大通站的径流量变化有良好的相关性。2004-2012年宜昌站和大通站径流量的相关性系数为0.96,仍然有良好的相关性,长江上游的大型水利工程对长江下游年内径流量的分配变化影响并

不大。2004年三峡工程开始采用蓄水、削洪峰、增补枯期水量的运行方式以来<sup>[12]</sup>,下游河道洪水季水量比三峡蓄水前略有减少,而枯季水量有较大的增加,平水季水量的变化并不明显。宜昌站年径流量只占到大通站的47%左右,这是由于长江宜昌站下部的中游段有湘江、汉江、洞庭湖和鄱阳湖水系的汇入。

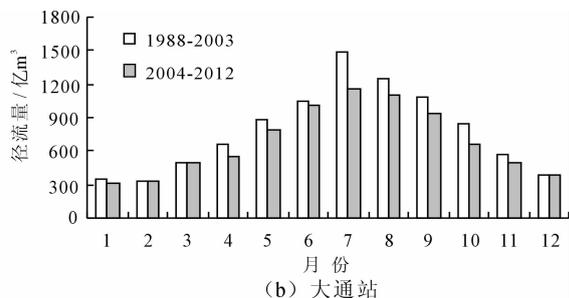
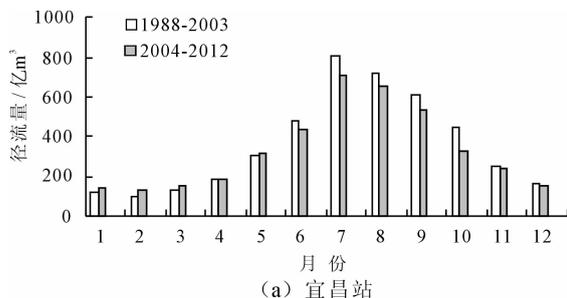


图2 径流量逐月过程线

### 3.2 输沙量的年内分配变化

三峡大坝蓄水前后宜昌站和大通站的逐月平均输沙量的对比见图3。如图3,长江中下游的输沙量有明显的季节性变化,洪季输沙量明显高于枯季,径流量和输沙量的峰值都出现在7月,但是输沙量的峰值占全年的比重更大,1988-2003年中,7月份宜昌站的输沙量占全年输沙量的33.59%,而大通站7月输沙量占全年输沙量的24.58%。长江流域中泥沙的主要来源区是四川盆地,包括陕南、鄂西、黔西、黔北和滇西等广大地区,该区域暴雨发生时间多为7-8月<sup>[13]</sup>,暴雨会给中下游带来大量泥沙,直接影响长江下游大通站的输沙量。另外6-7月也是长江中下游的梅雨期,梅雨期降雨频繁,两次降雨间隔时间短,若前期雨量大,土壤中的水分基本饱和,这时连续降雨会产生大量的地表径流,从而引起严重

的水土流失<sup>[14]</sup>,导致夏季大通站输沙量的增大。

通过图3对比看出,三峡大坝蓄水之后,宜昌站各个月份的输沙量都有明显的下降。宜昌站输沙量的减少与上游来沙减少和三峡水库、葛洲坝水库的拦沙作用等密切相关,除此之外还与尺度效应有关<sup>[15]</sup>。通过对比,三峡大坝开始蓄水以后大通站的输沙量也有了明显的减少,整个洪水季的输沙量都大大减少,其中,7月份的月输沙量由之前的810.57亿kg下降到了243.49亿kg,下降了大约70%。通过对大通站径流量和输沙量的相关性分析,1988-2003年大通站径流量和输沙量的相关系数为0.95,2004-2012年径流量和输沙量的相关系数为0.97。大通站径流量和输沙量在三峡大坝蓄水前后都存在良好的相关性,且这种相关性在2004-2012年更为显著。

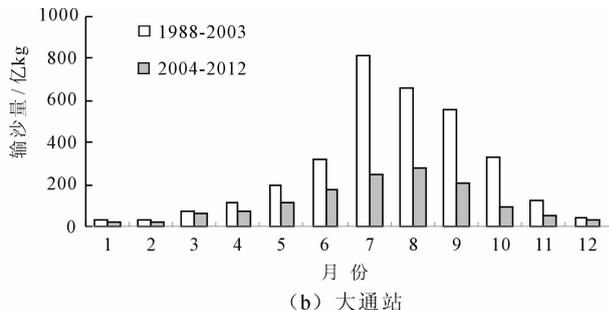
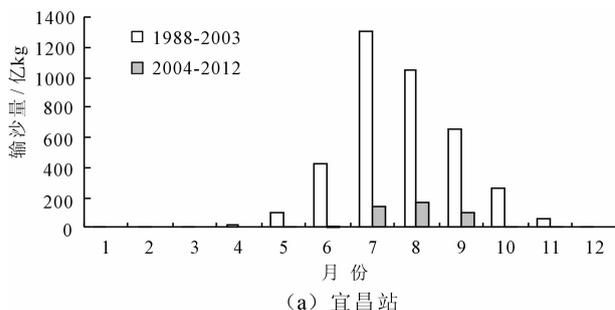


图3 输沙量逐月过程线

### 3.3 径流量的年际变化

1988-2012年宜昌站和大通站的径流量变化趋势图见图4。

通过 Mann-Kendall 检验法进行计算,结果见表2和表3。

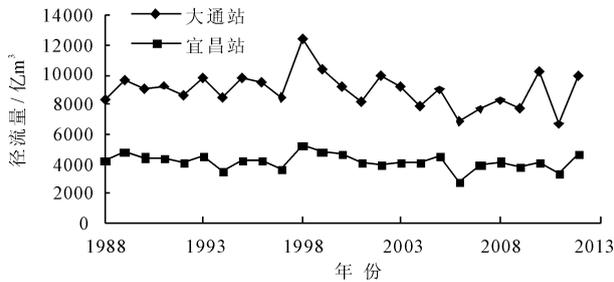


图4 年径流量变化趋势

表2 水文时间序列的 Mann-Kendall 检验

显著水平	$Z_{0.05/2}$	$Z_{0.01/2}$	$Z_{0.001/2}$
临界值	2.06	2.78	3.72

表3 Mann-kendall 秩次相关分析 MK 值结果

站点	径流量 $U_Q$	输沙量 $U_S$
宜昌站	-1.85	-4.65
大通站	-1.33	-4.69

从图4径流量的年际变化来看,宜昌站的年际变化并不大,年径流量基本都保持在4000亿 $m^3$ 左右。宜昌站径流量的MK值 $U_Q = -1.85$ ,并未通过临界值 $\alpha = 0.05$ 的检验,三峡大坝建立以后,观察年际变化,1988-2003年宜昌站和大通站的年径流量分别为4312.43亿和9414.39亿 $m^3$ 。而2004-2012年宜昌站和大通站的年径流量分别为3964.78亿和8278.78亿 $m^3$ 。宜昌站和大通站径流总量的趋势性变化不大,多年径流量虽然呈现波动性变化,但变化趋势并不显著。

通过表3的分析结果对比表2的Mann-Kendall检验值可以看出,大通站径流量的MK值 $U_Q = -1.33$ ,也未通过 $\alpha = 0.05$ 的检验,长江大通站的多年径流量虽然呈现波动,但仍未出现明显的趋势性变化。大通站径流量的年际分配比较平均,1988-2003年的年际变化的变异系数的 $C_V$ 值为0.11,而2004-2012年的年际变化的变异系数的 $C_V$ 值为0.14,表明三峡大坝蓄水后径流量的年际变化的离散程度变小,径流量更为集中。究其原因,长江流域建立了不少大型水库,这些水库大都在汛后蓄水,在大坝蓄水时,来水会被大坝拦截,直接导致中下游的径流量减少,同时,当汛期遇到一些较大洪水的时候,三峡大坝会采用削峰防洪调度,以减少下游的径流量。

### 3.4 输沙量的年际变化

1988-2012年宜昌站和大通站的输沙量变化趋势图见图5。

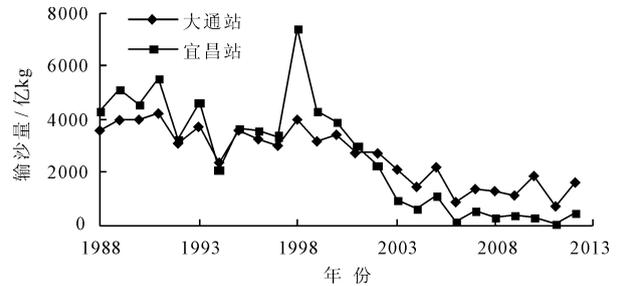


图5 年输沙量变化趋势

从图5输沙量的年际变化趋势看,宜昌站的年输沙量的MK值 $U_S = -4.65$ ,通过了临界值 $\alpha = 0.001$ 的检验,呈现出十分明显的下降趋势。大通站输沙量的MK值 $U_S = -4.69$ ,通过了临界值 $\alpha = 0.001$ 的检验,下降趋势十分明显。三峡大坝蓄水之后对下游站点的输沙量影响十分显著,在1988-2003年宜昌站和大通站的年输沙量分别为3871.08亿和3297.12亿kg,而2004-2012年宜昌站和大通站的年输沙量分别为427.40亿kg和1383.03亿kg,输沙量减少十分明显。随着长江中下游的泥沙减少,长江入海口的泥沙也会持续减少,加剧海水入侵的范围。

1988-2003年,宜昌站的年输沙量为大通站年输沙量的1.17倍,宜昌站的年输沙量要大于大通站,由于长江上游山区面积大,河流的比降大,悬浮质泥沙难于堆积,而到了中下游,平原比重大,河流比降小,部分泥沙都堆积起来,输沙量则呈现出沿程减小趋势。1988-2003年大通站输沙量的年际变化系数的 $C_V$ 值仅为0.18,由于影响输沙量变化的因素众多,例如人类不合理的开山,采掘造成的水土流失,使得该年份的输沙量增大,造成大通站输沙量的年际变化波动变大。

2004-2012年宜昌站和大通站的年输沙量都有了明显减少,但并非等比例下降,宜昌站年输沙量只占大通站年输沙量的31%,大通站输沙量的年际变化系数的 $C_V$ 值为0.39,输沙量的年际变化已经大大放缓,并且趋于平稳,这是由于大型水利工程的蓄水,会拦截部分泥沙,而上游的水土保持也有了一定成效,使下游泥沙的来源发生改变,大通站泥沙由之前的大部分来源于宜昌站变为了大部分来自于区间来沙和河床冲刷<sup>[16]</sup>,原有的泥沙平衡发生改变,下游泥沙对上游泥沙的依赖性已经大大降低了。

## 4 结语

(1)三峡大坝开始蓄水以后,宜昌站和大通站

的月径流量有了明显变化,洪水季月径流量较蓄水以前有了明显减少,年际变化的变异系数从0.11上升到了0.14,蓄水以后年径流量的离散程度变小。虽然年际径流量的变化不大,但由于三峡大坝削峰补枯的作用,使得年内流量的分布边幅有所变小。

(2)2004-2012年宜昌站和大通站的输沙量变化较径流量更为明显。除了枯水季,其余月份的输沙量较蓄水前都有了明显减少,季节性变化明显,大坝蓄水以后大通站的年输沙量和蓄水之前的年输沙量相比,减少了58.05%,而宜昌站更是下降了88.96%,下降趋势十分明显。

(3)在三峡大坝蓄水之后,虽然宜昌站和大通站的输沙量都有明显的下降,但宜昌站输沙量减少的幅度更为显著。表明宜昌站输沙量显著减少以后,大通站的泥沙更多来源于河岸冲刷和支流泥沙的汇入,长江中下游泥沙来源发生了显著变化,原有的泥沙平衡发生改变,另一方面也说明,大型水库的建立对下游泥沙的影响随着距离的增加而减少,原有的泥沙平衡破坏以后水沙变化还会去寻找新的平衡,这方面还有待于进一步细化、深入研究。

#### 参考文献:

- [1] 长江流域水资源保护立法研究课题组. 长江流域水资源保护立法问题研究[J]. 中国法学, 1999(2): 39-47.
- [2] 胡向阳,张细兵,黄悦. 三峡工程蓄水后长江中下游来水来沙变化规律研究[J]. 长江科学院院报, 2010, 27(6): 4-9.
- [3] 方娟娟,李义天,孙昭华,等. 长江大通站径流量变化特征分析[J]. 水电能源科学, 2011, 29(5): 9-12+193.

- [4] 王延贵,刘茜,史红玲. 长江中下游水沙态势变异及主要影响因素[J]. 泥沙研究, 2014(5): 38-47.
- [5] 黄莉,蔺秋生. 长江中游荆江监利河段水沙特性分析[J]. 中国农村水利水电, 2009(2): 26-29.
- [6] 王政祥. 长江大通以下地区的水资源研究[J]. 水利水电快报, 2008, 29(Z1): 22-26.
- [7] 张二凤,陈西庆. 长江大通-河口段枯季的径流量变化[J]. 地理学报, 2003, 58(2): 231-238.
- [8] 曹洁萍,迟道才,武立强,等. Mann-Kendall检验方法在降水趋势分析中的应用研究[J]. 农业科技与装备, 2008(5): 35-37+40.
- [9] 锥东宁,陈凯. 白龙江中上游水沙变化特性分析[J]. 甘肃水利水电技术, 2012, 48(1): 14-16.
- [10] 段琪彩. 怒江道街坝站径流量特征及变化趋势[J]. 云南地理环境研究, 2007, 19(3): 21-25.
- [11] 李文洪,马东恒,周长河. 七星河保安水文站悬移质输沙量变化规律分析[J]. 黑龙江水利科技, 2000(1): 28-29.
- [12] 王一斌,李九发,赵军凯,等. 长江上中下游河道水沙特征和水沙关系[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2014(1): 90-98.
- [13] 贺松林,王盼成. 长江大通站水沙过程的基本特征 ii. 输沙过程分析[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2004(2): 81-86+109.
- [14] 周素萍,张兴奇. 汀江上游水沙变化特征分析[J]. 水文, 2010, 30(2): 89-92.
- [15] 魏丽,卢金友,刘长波. 三峡水库蓄水后长江上游水沙变化分析[J]. 中国农村水利水电, 2010(6): 1-4+8.
- [16] 许全喜,童辉. 近50年来长江水沙变化规律研究[J]. 水文, 2012, 32(5): 38-47+76.