

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2020.03.002

# 黄河上游青铜峡水利枢纽对河川基流的影响

赵贵章,徐远志,王莉莉,王艳艳,张世英

(华北水利水电大学地球科学与工程学院,河南 郑州 450045)

**摘要:**以黄河上游下河沿、青铜峡和石嘴山3个水文站1951—2000年径流量为基础背景资料,采用Lyne-Holick滤波法研究水利枢纽工程对河川基流量的影响。结果表明:(a)建坝前,3站基流量总体上相差不大,介于184~214亿 $m^3$ 之间;而建坝后青铜峡水文站基流量均呈明显减少的变化趋势,基流量为111~187亿 $m^3$ ,基流衰减量可达24%。(b)M-K非参数检验结果显示,青铜峡站基流量减少幅度最为明显,且突变点出现在1962—1964年青铜峡大坝建设时期。(c)在不同水平年条件下,建坝后,青铜峡基流指数减少幅度最大,其中丰水年中下降幅度达13%,而平水年下降幅度可达20%,表明水利工程对河川基流产生了一定的影响。

**关键词:**青铜峡水利枢纽;水利工程;基流;Lyne-Holick数字滤波技术;基流指数

中图分类号:P333 文献标志码:A 文章编号:1000-1980(2020)03-0195-07

## Effect of Qingtongxia hydraulic project in upstream of Yellow River on river baseflow

ZHAO Guizhang, XU Yuanzhi, WANG Lili, WANG Yanyan, ZHANG Shiying  
(College of Geosciences and Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China)

**Abstract:** This study mainly analyzed the effect of hydraulic project on baseflow by the Lyne-Holick filter method, based on the runoff data that was monitored in three hydrological stations, Xiaheyan, Qingtongxia, and Shizuishan, from 1951 to 2000. Results show that baseflows of three hydrological stations were generally similar before the construction of Qingtongxia hydraulic project, all about  $(184 - 214) \times 10^8 m^3$ . Moreover, baseflow data was decreased to  $(111 - 187) \times 10^8 m^3$  since construction of the project, which indicated that the decrease ratio was nearly 24%. Results by the Mann-Kendall method also shows that, the decrease of baseflow reached its maximum value at the Qingtongxia hydrological station, and the point of abrupt change was observed between 1962 and 1964, which was coincident with the construction of Qingtongxia project. The baseflow index (BFI) of Qingtongxia hydraulic station showed an obvious downtrend in wet years with about 13% and the decrease ratio of BFI was approximately 20% in ordinary years, which provide a valid evidence that the hydraulic projects have strong influence on baseflow.

**Key words:** Qingtongxia hydraulic project; hydraulic project; baseflow; Lyne-Holick digital filter; baseflow index

基流是黄河水资源的重要组成部分,它不仅能够反映流域地下水对河流的补给情况,同时在提高水资源利用率、保护生态环境以及计算生态需水量、河流输沙量等方面具有重要意义。20世纪60年代以来,由于修建水利枢纽等一系列人类活动因素的影响<sup>[1]</sup>,黄河径流量大幅度减少<sup>[2]</sup>,改变了原有的地下水的时空分布规律,黄河基流量呈现明显减少的趋势,导致湖泊萎缩、湿地减少、草场退化、黄河断流等一系列环境问

**基金项目:**国家自然科学基金(41372260,41202178);中国科学院流域地理学重点实验室开放基金(WSG2015004);河南省高校科技创新人才支持计划(13HASTTT035)

**作者简介:**赵贵章(1975—),男,副教授,博士,主要从事包气带水分运移机理及数值仿真模拟研究。E-mail:guizhangzhao@163.com

**引用本文:**赵贵章,徐远志,王莉莉,等.黄河上游青铜峡水利枢纽对河川基流的影响[J].河海大学学报(自然科学版),2020,48(3):195-201.  
ZHAO Guizhang, XU Yuanzhi, WANG Lili, et al. Effect of Qingtongxia hydraulic project in upstream of Yellow River on river baseflow [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(3): 195-201.

题<sup>[3]</sup>,严重影响流域经济发展和生态环境安全<sup>[4]</sup>。因此,研究水利工程的修建对黄河基流的变化量以及变化趋势的影响,有助于进一步研究黄河地下水循环规律以及保护流域生态环境。

基于不同的理论和方法,国内外学者提出了多种基流的分割方法,但由于缺乏试验资料以及涉及气候、水文、地质等多种科学,无法验证其结果的合理性,因此国内外学者尚未找出一种普遍认同的合理的基流分割方法<sup>[5-6]</sup>。图解法是依据流量过程线的几何特征,按照水文地质学者的经验以及流域的水文地质的特征来分割基流的传统基流分割方法。该方法操作简单,但计算结果粗略且只能对完整的波形进行分割。刘昌明等<sup>[7]</sup>进行基流划分时将最小月份的月流量作为基流。水量平衡法通过计算流域各水均衡项的水量得出基流量<sup>[8-10]</sup>,其优点是参数具有明确的物理意义,缺点是操作难度高且参数较多。熊立华等<sup>[11]</sup>通过对牧马河流域进行基流分割发现:非线性水库法与数字滤波法得到的结果相差不大,认为非线性水库法可以客观合理地反映实际退水过程。物理化学法主要应用于圈闭性和单一性的山区流域,具有可操作性和可信度高的优点,是未来基流分割方法研究的方向之一,但成本较高,目前只应用于小流域。陈宗宇等<sup>[12]</sup>利用稳定同位素及化学方法估算出张掖—正义峡河道段地下水向河道平均排泄量占该段河流径流量的69%。数字滤波法<sup>[13-14]</sup>通过计算机自动实现,具有操作性强、可重复、普遍适用,且人为因素干扰等优点,被广泛应用于黄河流域等广大地区。宋小圆等<sup>[5]</sup>运用4种数字滤波方法探究了不同滤波方法滤波次数、滤波参数变化对基流分割结果的影响,结果表明 Lyne-Holick 数字滤波法模拟效果较好,且省时高效。李瑞等<sup>[15]</sup>等通过研究黄河上游药水河流域发现 Lyne-Holick 数字滤波法具有较好的应用效果。党素珍等<sup>[16]</sup>通过数字滤波法研究发现:黑河上游基流量年内变化呈先增后减的趋势,年际变化呈增加的趋势。王雁林等<sup>[17]</sup>在探讨黄河河川基流量演化规律及驱动因子时指出,水库修建对河川基流量衰减影响不大。白乐等<sup>[18]</sup>在研究降水和人类活动对秃尾河流域基流的影响时发现,水利工程的建设在一定程度上削减了地下水对径流的补给。王蕊等<sup>[19]</sup>分析了近40a黄河中游径流情势变化,指出1970年以来黄河中游岔沟流域淤地坝的大量修建造成河流年径流减少30%以上。林学钰等<sup>[20]</sup>认为在修建有大型水利工程的黄河干、支流的径流资料,需要经过人工还原后,方可进行基流分割。窟野河流域内现存坝库约850处,总容量近55万 $\text{m}^3$ ,这些大规模的水利工程改变了该流域原有的下垫面水循环规律,其水文效应在20世纪80年代初期开始凸显,对河川基流量的衰减有一定程度的影响<sup>[3]</sup>。前人对黄河基流量的研究中,研究水利工程的修建对河川基流量影响的较少。黄河是人类活动最为频繁的流域之一,而青铜峡水利枢纽位于黄河上游东部季风区与西部干旱区域的交汇地带,此地区气候干旱、降雨量少,该水利工程的修建改变了地表水与地下水的补排给关系<sup>[21]</sup>,因此,研究青铜峡水利枢纽建坝前后流域基流量的变化规律对维持该流域的生态平衡以及实现水资源优化配置具有重要作用。

本文采用 Lyne-Holick 单参数数字滤波法对黄河上游下河沿水文站、青铜峡水文站以及石嘴山水文站的流量过程进行基流分割,运用 Mann-Kendall 非参数检验法分析基流的变化趋势和突变点,分析青铜峡建坝前后基流的变化特征以及变化规律,揭示水利枢纽工程对河川基流量变化的影响程度,以为该流域水资源优化配置和水文模拟提供理论支持。

## 1 研究区概况

### 1.1 流域概况

研究区域属于黄河上游宁夏段,从宁夏回族自治区中卫市下河沿水文站到石嘴山市石嘴山水文站(图1)。该流域位于 $36^{\circ}0'N \sim 39^{\circ}23'N$ , $104^{\circ}17'E \sim 107^{\circ}39'E$ ,南邻甘肃省,西部、北部与内蒙古自治区相连,东部结合陕西省。该流域地处中国地质、地貌“南北中轴”的北端,地形结构复杂,包含高原、山地、沙漠、平原等多种地形地貌。全流域从南向北表现出由流水地貌向风蚀地貌过渡的特征,黄河上游宁夏段属于大陆性半湿润半干旱气候,降水量少且年内分布不均匀,蒸发强烈<sup>[22-23]</sup>。

### 1.2 水利工程及水文站概况

青铜峡水电站位于黄河上游宁夏回族自治区青铜峡市青铜峡峡谷出口处,是一座以灌溉、发电为主,兼有防洪、防凌、城市供水等效益的综合性水利枢纽。坝址以上流域面积27.5万 $\text{km}^2$ ,多年平均年径流

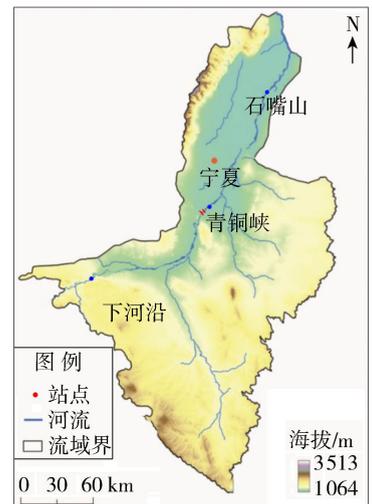


图1 流域位置

Fig. 1 Location of catchment

量324亿 $\text{m}^3$ ,多年平均流量1028 $\text{m}^3/\text{s}$ ,水库正常蓄水位1156m,相应设计库容为6.06亿 $\text{m}^3$ ,水库面积为113 $\text{km}^2$ ,现存库容0.56亿 $\text{m}^3$ 。1958年8月青铜峡水电站正式开始动工,1967年12月投入使用,1968年2月第一台机组(2号机组)正式发电,1978年8台机组安装完毕。黄河上游石嘴山水文站位于宁夏回族自治区与内蒙古的交界处(106°47'E,39°15'N),集水面积3215.12 $\text{km}^2$ ,是控制黄河水量从宁夏进入内蒙古的重要水文站。青铜峡水文站位于105°99'E,37°89'N,是青铜峡水电站的出水控制站。下河沿水文站是黄河宁夏段的入境站,位于105°05'E,37°15'N,集水面积为2643.08 $\text{km}^2$ 。

## 2 数据来源及研究方法

### 2.1 数据来源

本文选取下河沿、青铜峡和石嘴山水文站1951—2000年共50a的日径流量时间序列作为基础数据,对实测径流数据进行水文频率分析等处理,采用Lyne-Holick单参数数字滤波法对日径流量进行基流分割得到日基流量,对基流量进行M-K检验以及趋势分析。

### 2.2 研究方法

#### 2.2.1 数字滤波法

本文采用数字滤波法中的Lyne-Holick数字滤波法,该方法是由Lyne和Holick于1979年首次提出,1990年Nathan等<sup>[24]</sup>将其改进并首次应用于水文研究中<sup>[25]</sup>。

滤波方程为

$$q_t = \alpha q_{t-1} + \frac{1 + \alpha}{2} (Q_t - Q_{t-1}) \quad (1)$$

基流方程为

$$b_t = Q_t - q_t \quad (2)$$

式中: $q_t$ —— $t$ 时刻的地面径流, $\text{m}^3/\text{s}$ ; $Q_t$ —— $t$ 时刻的总径流, $\text{m}^3/\text{s}$ ; $q_{t-1}$ —— $t-1$ 时刻的地面径流, $\text{m}^3/\text{s}$ ; $Q_{t-1}$ —— $t-1$ 时刻的总径流, $\text{m}^3/\text{s}$ ; $b_t$ —— $t$ 时刻的基流; $\alpha$ ——滤波参数。根据Nathan和McMahon等的研究以及结合该流域气候、水文地质条件,通过实际切割效果对比比较,得到0.95作为滤波参数<sup>[16]</sup>,采用第3次滤波所得的基流量<sup>[19]</sup>更符合实际情况。

#### 2.2.2 Mann-Kendall非参数检验法

Mann-Kendall非参数检验法是一种不需要样本遵从一定的分布,也不受少数异常值干扰的非参数统计检验方法<sup>[26]</sup>,其能够很好地描述时间序列的趋势变化特征,具有适用范围广、定量化程度高、计算简便等优点。原假设 $H_0$ 为时间序列数据 $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 是 $n$ 个独立的、随机变量同分布的样本,备择假设 $H_1$ 是双边检验<sup>[27]</sup>,对于所有的 $k, j \leq n$ ,且 $k \neq j$ , $x_k$ 和 $x_j$ 的分布是不相同的,检验的统计变量 $S$ 为

$$S = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^i \text{sign}(x_i - x_j) \quad (3)$$

其中

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

标准的正态统计变量计算公式为

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

其中

$$D(S) = n(n-1)(2n+5)/18$$

$Z$ 为正值表示增加趋势, $Z$ 为负值表示减少趋势,当 $Z$ 的绝对值在大于等于1.28、1.64、2.32时分别表示通过90%、95%、99%置信度显著性检验<sup>[28]</sup>。

当Mann-Kendall检验进一步用于检验序列突变时,检验统计量与上述 $Z$ 有所不同,通过构造一秩序列<sup>[29-30]</sup>。

$$S_k = \sum_{i=1}^k \sum_j^{i-1} a_{ij} \quad (k=2,3,\dots,n) \quad (5)$$

其中

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & x_i > x_j \\ 0 & x_i < x_j \end{cases}$$

$$\text{定义统计变量: } U_{F_k} = \frac{S_k - E(S_k)}{\sqrt{D(S_k)}} \quad (k=1,2,\dots,n) \quad (6)$$

式中:  $E(S_k)$ 、 $D(S_k)$ —— $S_k$  的均值、方差。

按时间序列  $x$  的逆序  $x_n, x_{n-1}, \dots, x_1$  重复上述过程, 获得统计变量  $U_{B_k} (k=n, n-1, \dots, 1)$ , 同时使:  $U_{B_k} = -U_{F_k}$ 。将  $U_{B_k}$  与  $U_{F_k}$  绘制成曲线, 如果 2 条曲线出现交点, 且该点处满足  $U_{B_k} < 1.96$ 、 $U_{F_k} < 1.96$ , 则认为该点为序列的突变点, 检验置信水平为 0.05<sup>[31]</sup>。

## 3 研究结果

### 3.1 基流量和 BFI 的年际变化特征

在基流计算过程中, 一般以年基流量以及基流量占总径流量的比重(即基流指数, baseflow index, 简称 BFI)来量化基流与径流之间的关系<sup>[26]</sup>。为了分析青铜峡水利枢纽工程对黄河基流的影响, 绘制了下河沿、青铜峡以及石嘴山水文站的年际基流变化规律, 如图 2、图 3 所示。

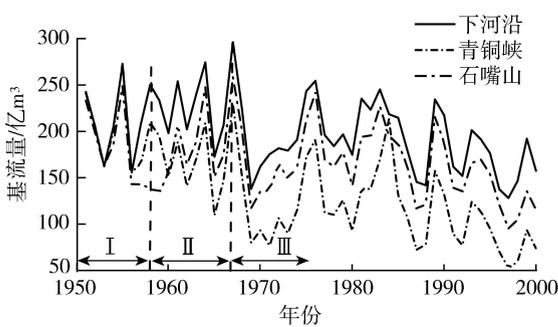


图 2 基流年际变化

Fig. 2 Annual variations of baseflow

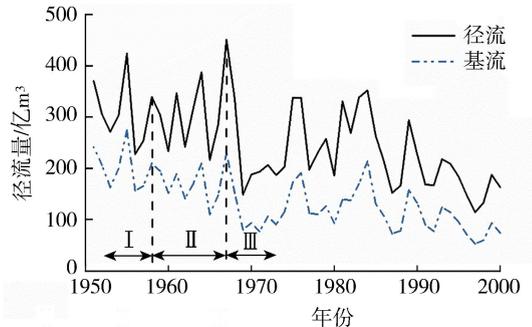


图 3 青铜峡径流基流年际变化

Fig. 3 Annual variations of runoff and baseflow in Qingtongxia

人为自然条件下为青铜峡大坝建设以前, 人类活动较少, 自然和人为条件干预下为大坝建设期, 人为干预条件下为大坝建设完成投入使用以后, 人类活动影响显著如图 2 所示(图中: I 为自然条件下, II 为自然和人为干预条件下, III 为人为干预条件下)。由图 2、图 3 可知: 3 个站的河川基流量整体呈下降趋势, 其中青铜峡站下降幅度最为明显。建坝前下河沿、青铜峡、石嘴山 3 个水文站多年平均基流量分别为 214 亿  $m^3$ 、184 亿  $m^3$ 、192 亿  $m^3$ , 建坝后 3 站多年平均基流量分别为 187 亿  $m^3$ 、111 亿  $m^3$ 、160 亿  $m^3$ , 相比于建坝前分别减少了 12%、40%、17%, 其中青铜峡站下降幅度最大。由以上数据可以看出, 建坝前 3 个水文站的基流量相差不大, 建坝施工期 3 个站的基流量开始出现差异, 建坝后, 青铜峡站基流量明显小于其他 2 个站, 其中上游的下河沿站基流量最大。Lyne-Hollick 数字滤波法分割出的年平均径流与年平均基流的 pearson 相关系数均高达 0.94, 且都通过置信水平为 0.01 的显著性检验。

基流量从建坝施工期出现明显的减少, 说明水电站的修建影响了地下水的时空分布的规律。青铜峡水库正常蓄水位 1156 m, 水库蓄水提高了流域地下水排泄基准面, 导致地下水排泄量减少, 影响了地下水对河川径流的补给, 从而使河川基流量减少。降水是河川基流量的主要补给来源, 青铜峡水利枢纽的修建使流域气候发生了一定程度上的改变, 从而使河川基流量呈现明显减少趋势。从图 4 中可以看出: 下河沿、青铜峡、石嘴山站多年平均基流指数分别为 0.65、0.54、0.60, BFI 的年际变化过程基本保持一致, 在 20 世纪 60 年代青铜峡水利枢纽建设时期均出现大幅度下降, 其中青铜峡站 BFI 下降幅度最为明显, 为 13%, 而石嘴山站总体 BFI 保持相对稳定。

### 3.2 不同水平年基流量和 BFI 变化特征

运用 P-III 型频率曲线法对下河沿、青铜峡、石嘴山 3 个水文站 1951—2000 年的实测径流资料进行水文

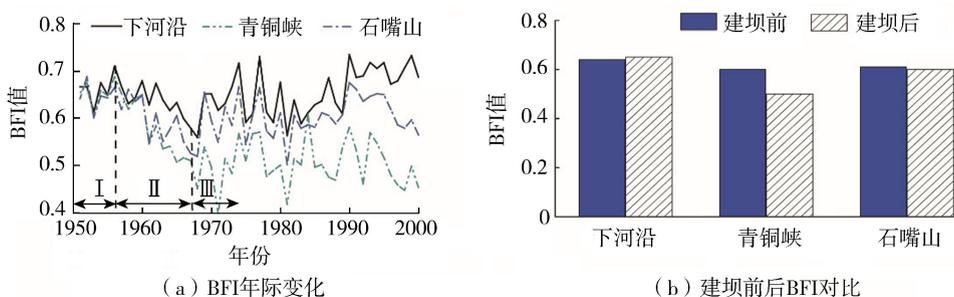


图 4 BFI 年际变化和建坝前后 BFI 对比

Fig. 4 Annual variations of BFI and comparison chart before and after dam construction

频率分析,划分出相应的丰水年、平水年、枯水年。根据丰水年、平水年、枯水年的划分标准(表 1),将 3 个站的年均基流和 BFI 按照建坝前和建坝后分别进行计算统计。

表 1 年径流量丰水年、平水年、枯水年划分标准

Table 1 Standard for division of wet, ordinary and dry annual runoff level

水平年	设计频率 $P/\%$	下河沿站		青铜峡站		石嘴山站	
		年径流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	$k$	年径流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	$k$	年径流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	$k$
丰水年	(0, 37.5]	>1009.98	>1.06	>467.74	>1.08	>570.94	>1.06
平水年	(37.5, 62.5]	859.16 ~ 1009.98	0.90 ~ 1.06	364.53 ~ 467.74	0.84 ~ 1.08	490.54 ~ 570.94	0.91 ~ 1.06
枯水年	(62.5, 100]	<859.16	<0.90	<0.84	<0.84	<490.54	<0.91

结合图 5、图 6 可以看出,下河沿、青铜峡、石嘴山 3 个站年均基流均为丰水年>平水年>枯水年,相比于建坝前,建坝后 3 个水文站在丰水年、平水年、枯水年 3 个水平年中平均基流量均小幅度减小,其中只有下河沿水文站在枯水年基流量小幅度上升。下河沿站和石嘴山站 BFI 建坝前后变化不大,且在建坝前 3 个站 BFI 相差不大。青铜峡站基流指数下降幅度最明显,丰水年中下降 13%、平水年下降 20%,枯水年基流指数基本保持不变。丰水年降水量相对较大,径流主要由流域内的大气降雨进行补充,青铜峡水利枢纽的修建,改变了地表汇流的条件,减少了地下水对径流的补给。

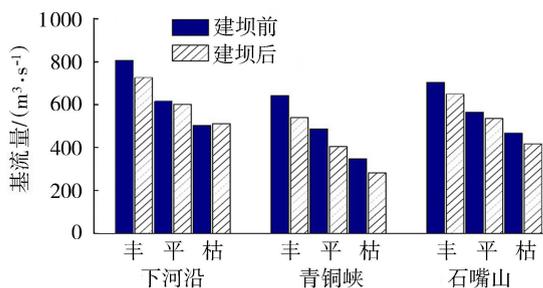


图 5 建坝前后基流量对比

Fig. 5 Baseflow comparison chart before and after dam construction

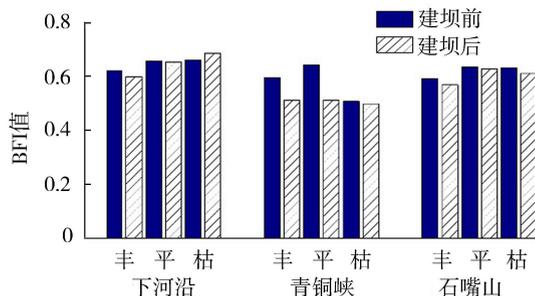


图 6 建坝前后 BIF 对比

Fig. 6 BFI comparison chart before and after dam construction

### 3.3 趋势和突变分析

通过 M-K 非参数检验法进一步分析得出:下河沿、青铜峡、石嘴山 3 个水文站的  $Z$  值分别为 -1.95、-4.23、-2.73,都小于 0,表明 3 个站的基流量呈减少趋势,且青铜峡、石嘴山水文站  $Z$  值通过  $\alpha=0.01$  的显著性检验,下河沿水文站通过  $\alpha=0.05$  的显著性检验,由此可以看出青铜峡、石嘴山基流量减少趋势明显,且青铜峡减少趋势远远大于下河沿和石嘴山。由图 2 可以看出,1967—1968 年间青铜峡径流量和基流量明显减少。

突变即序列收到某种条件的变化或受某种因素的影响,数据从一种稳定态(或稳定持续的变化趋势)跳跃地转变到另一种稳定态(或稳定持续的变化趋势)<sup>[16]</sup>。本文采用 M-K 突变检验法确定青铜峡水文站基流数据的突变点。由图 7 可以看出,青铜峡基流量数据的突变点出现在 1962—1964 年,此时段处于青铜峡水利枢纽工程的建设时期,表明青铜峡水利枢纽的施工是造成该河段基流量突变的主要原因。

## 4 结 论

a. 下河沿、青铜峡、石嘴山水文站基流量总体上均呈减少趋势,建坝前3个站基流量和基流指数相差不大,基流量和基流指数分别为214亿 $m^3$ 、184亿 $m^3$ 、192亿 $m^3$ 和0.65、0.54、0.60,建坝后出现明显差异,下河沿站基流量最多,石嘴山站次之,青铜峡站最少,且青铜峡站减少比例最大,基流量减少40%、BFI减少13%,受青铜峡水电站影响最为显著。

b. 下河沿、青铜峡、石嘴山3个水文站的不同水平年的多年平均基流量由高到低依次为丰水年、平水年、枯水年,多年平均基流指数由高到低依次为平水年、丰水年、枯水年,但下河沿水文站多年平均基流指数为枯水年、平水年、丰水年。下河沿水文站位于青铜峡水电站的上游,受青铜峡水电站建设的影响较小。

c. 20世纪60年代以来,青铜峡水利枢纽的建设影响了该区域的水文地质条件,使原有的河流和地下水的补排给关系发生改变,导致基流量出现明显的减少趋势。通过M-K突变检验发现,突变点出现在青铜峡水电站建设施工期,表明青铜峡水电站的建设和水库蓄水,影响了当地地下水的时空分布规律,使河川基流量减少。

### 参考文献:

- [1] 李二辉,穆兴民,赵广举. 1919—2010年黄河上中游区径流量变化分析[J]. 水科学进展, 2014, 25(2): 155-163. (LI Erhui, MU Xingmin, ZHAO Guangju. Temporal changes in annual runoff and influential factors in the upper and middle reaches of Yellow River from 1919—2010[J]. Advances in Water Science, 2014, 25(2): 155-163. (in Chinese))
- [2] 张国胜,李林,时兴合,等. 黄河上游地区气候变化及其对黄河水资源的影响[J]. 水科学进展, 2000, 11(3): 277-283. (ZHANG Guosheng, LI Lin, SHI Xinghe, et al. Climatic changes over the upper Yellow River and its effects on water resources [J]. Advances in Water Science, 2000, 11(3): 277-283. (in Chinese))
- [3] 雷泳南,张晓萍,张建军,等. 窟野河流域河川基流量变化趋势及其驱动因素[J]. 生态学报, 2013, 33(5): 1559-1568. (LEI Yongnan, ZHANG Xiaoping, ZHANG Jianjun, et al. Change trends and driving factors of base flow in Kuye River Catchment [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(5): 1559-1568. (in Chinese))
- [4] 许炯心. 人类活动对黄河河川径流的影响[J]. 水科学进展, 2007, 18(5): 648-655. (XU Jiogxin. Impact of human activities on the stream flow of Yellow River [J]. Advances in Water Science, 2007, 18(5): 648-655. (in Chinese))
- [5] 宋小园,朱仲元,焦玮,等. 数字滤波法在锡林河基流分割中的比较与应用[J]. 干旱区地理, 2016, 39(6): 1319-1326. (SONG Xiaoyuan, ZHU Zhongyuan, JIAO Wei, et al. Comparison and application of digital filtering method in Xilinhe River of baseflow separation [J]. Arid Land Geography, 2016, 39(6): 1319-1326. (in Chinese))
- [6] SMAKHTIN V U. Low flow hydrology: areview [J]. Journal of Hydrology, 2001, 240(3): 147-186.
- [7] 刘昌明,成立. 黄河干流下游断流的径流序列分析[J]. 地理学报, 2000, 55(3): 257-265. (LIU Changming, CHENG Li. Analysis on runoff series with special reference to drying up courses of lower Huanghe River [J]. Acta Geographica Sinica, 2000, 55(3): 257-265. (in Chinese))
- [8] 陈利群,刘昌明,杨聪,等. 黄河源区基流估算[J]. 地理研究, 2006, 25(4): 659-665. (CHEN Liqun, LIU Changming, YANG Cong, et al. Baseflow estimation of the source regions of the Yellow River [J]. Geographical Research, 2006, 25(4): 659-665. (in Chinese))
- [9] 黄文,李占玲,徐宗学,等. 基流分割方法在寒旱区流域的适用性分析[J]. 水文, 2018, 38(3): 21-28. (HUANG Wen, LI Zhanling, XU Zongxue, et al. Suitability analysis of different baseflow separation methods in cold and arid watershed [J]. Journal of China Hydrology, 2018, 38(3): 21-28. (in Chinese))
- [10] 李成六. 基于SWAT模型的石羊河流域上游山区径流模拟研究[D]. 兰州:兰州大学, 2011.
- [11] 熊立华,郭生练. 采用非线性水库假设的基流分割方法及应用[J]. 武汉大学学报(工学版), 2005, 38(1): 27-29. (XIONG Lihua, GUO Shenglian. A baseflow separation method based on nonlinear reservoir assumption [J]. Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering, 2005, 38(1): 27-29. (in Chinese))
- [12] 陈宗宇,万力,聂振龙,等. 利用稳定同位素识别黑河流域地下水的补给来源[J]. 水文地质工程地质, 2006(6): 9-14. (CHEN Zongyu, WAN Li, NIE Zhenlong, et al. Identification of groundwater recharge in the Heihe Basin using environmental

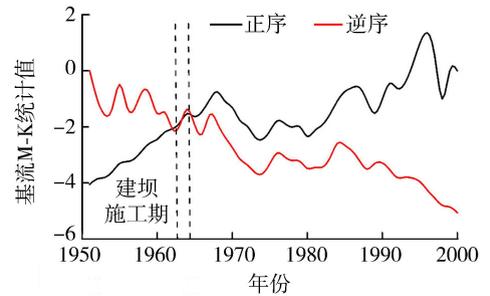


图7 青铜峡建坝前后基流突变分析

Fig.7 Mutation analysis of baseflow of Qingtongxia dam before and after the construction

- isotopes[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2006(6): 9-14. (in Chinese)
- [13] WITTENBERG H. Baseflow recession and recharge as nonlinear storage processes[J]. *Hydrological Processes*, 2015, 13(5): 715-726.
- [14] RONALD A S. HYSEP: a computer program streamflow hydrograph separation and analysis[R]. New York: Geological Survey, 1996.
- [15] 李瑞,张士锋. 两种自动基流分割方法在干旱半干旱地区的对比研究[J]. *地理科学进展*, 2017, 36(7): 864-872. (LI Rui, ZHANG Shifeng. Comparative study on two automatic baseflow separation methods in the arid and semi-arid regions[J]. *Progress in Geography*, 2017, 36(7): 864-872. (in Chinese))
- [16] 党素珍,王中根,刘昌明. 黑河上游地区基流分割及其变化特征分析[J]. *资源科学*, 2011, 33(12): 2232-2237. (DANG Suzhen, WANG Zhonggen, LIU Changming. Baseflow separation and its characteristics in the upper reaches of the Heihe River Basin[J]. *Resources Science*, 2011, 33(12): 2232-2237. (in Chinese))
- [17] 王雁林,王文科,钱云平,等. 黄河河川基流量演化规律及其驱动因子探讨[J]. *自然资源学报*, 2008, 23(3): 479-486. (WANG Yanlin, WANG Wenke, QIAN Yunping, et al. Change characteristics and driving forces of base flow of Yellow River Basin[J]. *Journal of Natural Resources*, 2008, 23(3): 479-486. (in Chinese))
- [18] 白乐,李怀恩,何宏谋. 降水和人类活动对秃尾河流域基流的影响[J]. *自然资源学报*, 2014, 29(12): 2078-2088. (BAI Le, LI Huaen, HE Hongmou. Assessing the impacts of precipitation and human activities on base flow in the middle Tuwei River Basin of the Yellow River[J]. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29(12): 2078-2088. (in Chinese))
- [19] 王蕊,夏军. 近40年黄河中游径流情势变化分析[J]. *水文*, 2007, 27(5): 74-77. (WANG Rui, XIA Jun. Changes of runoff regime in the middle reaches of the Yellow River in recent 40 years[J]. *Journal of China Hydrology*, 2007, 27(5): 74-77. (in Chinese))
- [20] 林学钰,廖资生,钱云平,等. 基流分割法在黄河流域地下水研究中的应用[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2009, 39(6): 959-967. (LIN Xueyu, LIAO Zisheng, QIAN Yunping, et al. Baseflow separation for groundwater study in the Yellow River Basin, China[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 2009, 39(6): 959-967. (in Chinese))
- [21] 李芳,靳少波,邹松兵,等. 黄河源区白河基流分割方法适用性分析[J]. *冰川冻土*, 2018, 40(3): 679-689. (LI Fang, JIN Shaobo, ZOU Songbing, et al. Analysis of the applicability of baseflow separation methods in Baihe River Basin, the source regions of Yellow River[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2018, 40(3): 679-689. (in Chinese))
- [22] 李帅. 宁夏黄河流域气候与土地利用变化及其对径流影响研究[D]. 重庆:西南大学, 2015.
- [23] 彭月,李昌晓,李健. 2000—2012年宁夏黄河流域生态安全综合评价[J]. *资源科学*, 2015, 37(12): 2480-2490. (PENG Yue, LI Changxiao, LI Jian. Assessment on the ecological security of the Yellow River Basin in Ningxia Province from 2000 to 2012[J]. *Resources Science*, 2015, 37(12): 2480-2490. (in Chinese))
- [24] NATHAN R J, MAHON T A. Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses[J]. *Water Resources Research*, 1990, 26(7): 1465-1473.
- [25] 徐磊磊,刘敬林,金昌杰,等. 水文过程的基流分割方法研究进展[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(11): 3073-3080. (XU Leilei, LIU Jinglin, JIN Changjie, et al. Baseflow separation methods in hydrological process research: a review[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(11): 3073-3080. (in Chinese))
- [26] 祖明娟,管仪庆,张丹蓉,等. 海流兔河近50年来基流变化特征分析[J]. *水资源与水工程学报*, 2013, 24(3): 38-42. (ZU Mingjuan, GUAN Yiqing, ZHANG Danrong, et al. Analysis of base flow variation characteristic in Hailiutu River in past 50 years[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2013, 24(3): 38-42. (in Chinese))
- [27] 李新新,宋友桂. 近55年新疆昭苏县气候变化特征及成因分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2013, 27(10): 133-138. (LI Xinxin, SONG Yougui. Climate change characteristics and causes in Zhaosu of Xinjiang over the last 55 years[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2013, 27(10): 38-42. (in Chinese))
- [28] ECKHARDT K. How to construct recursive digital filters for baseflow separation[J]. *Hydrological Processes*, 2005, 19: 507-515.
- [29] ECKHARDT K. A comparison of baseflow indices, which were calculated with seven different baseflow separation methods[J]. *Journal of Hydrology*, 2008, 352: 168-173.
- [30] 傅丽昕. 近57年来和丰县气温和降水量的趋势性及突变特征分析[J]. *南水北调与水利科技*, 2014, 12(4): 38-42. (FU Lixin. Tendency and mutation analysis of annual temperature and precipitation of Hefeng County in recent 57 years[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2014, 12(4): 38-42. (in Chinese))
- [31] 杨倩楠,高海东,李占斌,等. 干旱区流域土地利用变化对基流的影响[J]. *水土保持研究*, 2018, 25(3): 317-322. (YANG Qiannan, GAO Haidong, LI Zhanbin, et al. Effect of land use change in watershed on base flow in arid area[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2018, 25(3): 317-322. (in Chinese))