

# 海流兔河近 50 年来基流变化特征分析

祖明娟<sup>1,2</sup>, 管仪庆<sup>1</sup>, 张丹蓉<sup>1,3</sup>, 沈晓金<sup>4</sup>, 李绣红<sup>1</sup>, 邵广文<sup>1</sup>

(1. 河海大学 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098; 2. 河海大学 水文水资源学院, 南京 210098;  
3. 密西西比大学 国家水科学和工程计算中心, 密西西比 牛津 MS 38655;  
4. 浙江省湖州市水利局, 浙江 湖州 313000)

**摘要:** 基流是枯水期河流的主要补给来源, 对干旱半干旱区的河流尤其重要。在沙漠半沙漠区, 河流基流还对维持脆弱的生态系统中发挥重要作用。对河流基流变化分析, 可为流域水资源保护以及合理的利用和开发提供依据。本文基于半干旱风沙滩地区海流兔河 1957 年到 2007 年的实测流量资料, 采用递归数字滤波法对该站的流量过程进行了基流分割, 研究了海流兔河年基流量和基流指数(BFI)的年内、年际变化特征; 用 M-K 非参数检验法分析了基流量和 BFI 的变化趋势。结果表明, 海流兔流域基流占径流比重较大, 年均径流、基流都呈减少趋势, 径流年内分配均匀、基流则表现为先减少后增加, BFI 年际、年内变化都较均匀, 没有明显的增加或减少趋势; 情势变化指数法(RSI)检测出基流在 1966、1986 年存在突变点, 径流在 1968、1989、2001 年发生突变。

**关键词:** 基流分割; 递归滤波法; 基流指数; M-K 非参数检验法

中图分类号: P333 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2013)03-0038-05

## Analysis of base flow variation characteristic in Hailiutu River in past 50 years

Zumingjuan<sup>1,2</sup>, GUAN Yiqing<sup>1</sup>, ZHANG Danrong<sup>1,3</sup>,  
SHEN Xiaojin<sup>4</sup>, LI Xiuhong<sup>1</sup>, SHAO Guangwen<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;  
2. College of Hydrology & Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. National Center for Computational Hydroscience and Engineering, University of Mississippi, Oxford, MS 38655, USA; 4. Huzhou Bureau of Water Resources of Zhejiang Province, Huzhou 313000, China)

**Abstract:** Base flow is the main supplement source of stream flow in dry period and especial important to the river in arid and semi-arid area. It plays an important role in maintaining the fragile ecological system in the region. Based on the observed runoff series of Hailiutu river from 1957 to 2007, the paper used recursive digital filter method for base flow separation and investigated the trend of annual and inter-annual variations of base flow and BFI (base flow index). The statistical method of nonparametric Mann-Kendall test was used for analyzing the trend of base flow and BFI. Results showed that base flow holds a larger proportion of the runoff, annual base flow and runoff have a significant descending trend; the annual distribution of runoff is even but the base flow first decreased and then increased; BFI both in annual and inter-annual shows even, has no significant increase or decrease trend. The Regime Shift Index (RSI) method was used to measure sudden change point of the base flow in 1966 and 1986. The runoff occurred sudden change in 1968, 1989 and 2001.

**Key words:** base flow separation; recursive digital filter method; base flow index (BFI); Mann-Kendall test

## 1 概述

基流是河川的基本径流, 也是枯水期的主要补给来源, 在河川径流形成、维持及可再生过程中具有

重要的作用<sup>[1]</sup>。西北干旱半干旱区内陆河冬春季节河流部分封冻, 以地下水补给为主, 基流在维持河道不断流、水源的稳定性和脆弱的荒漠生态系统中发挥重要作用<sup>[2]</sup>。因此分析处于干旱半干旱区典

收稿日期: 2013-01-18

基金项目: 国家自然科学基金资助(51209064)

作者简介: 祖明娟(1987-), 女, 河南南阳人, 硕士研究生, 研究方向: 水文水资源。

通讯作者: 张丹蓉(1972-), 女, 江苏南京人, 博士, 副教授, 研究方向: 水资源与水环境。

型流域基流的时空变化规律,不仅有助于深入了解该流域水资源特性,正确认识干旱半干旱区流域水循环特征及其转化关系,而且对促进流域水资源可持续开发利用具有实际指导意义。

目前对基流的概念存在不同的理解和定义,本文采用国内大多数学者通用的定义,即基流是指补给河流的地下径流<sup>[3]</sup>。国内外对基流分割方法进行了很多研究,1979年 Pettyjohn 和 Henning 提出了 HYSEP<sup>[4]</sup> 程序,使用3种方法划分基流,即固定时间间隔法、滑动时间间隔法和局部最小值法;1990年 Nathan 和 McMahon<sup>[5]</sup> 首先将电子滤波法引入到水文研究中,将日径流时间历时资料作为直接径流(高频信号)和基流(低频信号)的叠加,从日流量过程中分割出基流;数字滤波法是近年来被国际上研究和应用最为广泛的基流分割方法,易于采用计算机自动实现。2005年 Eckhard 根据数字滤波法修正改进后提出了递归滤波模型<sup>[6]</sup>。此外从19世纪70年代开始降水和河流中的同位素和化学元素被用来划分水文过程线,通过分析降水和地下水的稳定同位素组成,可以揭示径流的组成成分关系<sup>[7]</sup>。张华<sup>[8]</sup>等利用递归数字滤波法分割黑河上游主要水文站点的基流量并分析了其变化趋势和变化原因;陈利群<sup>[9]</sup>等利用黄河源区的4个水文站及13个气象站的日系列资料,基于改进的加里宁基流分割法,分析了1956-2000年以来黄河源区基流和以水文站为节点控制的各个子流域的基流变化及其影响因素;邱海军<sup>[10]</sup>等分析了近50a来榆林市主要代表站河川基流量,结果表明过去50a榆林市主要代表站河川基流量呈总体下降态势,并在未来有继续下降的趋势。

本文选取半干旱半荒漠地区海流兔河流域为研究区域,选用数字滤波法中的一种——递归滤波法对具有连续、长系列流量过程进行分割,分析其变化规律,探讨其变化原因,丰富半干旱半荒漠地区产流机制研究,并为当地的水资源开发保护和管理提供依据。

## 2 研究区概况

海流兔河是黄河流域无定河水系的一条较大支流,起源于内蒙古自治区南部乌审旗的巴彦柴达木乡、南到陕西省榆林市红石桥乡韩家崄村;西起乌审旗的查汗敖包、东至榆林大海则三队,流域面积约2600 km<sup>2</sup>,是一条典型的风沙区河流,常年流水不断。流域地势平坦,沙丘广布,水土流失严重。

流域地处毛乌苏沙漠边缘地带,地势北高南低,北部为沙漠滩地,地势平缓,南部发育多条溪流支系;地下水主要赋存于老地层的溶洞及裂隙中、碎屑岩的裂隙孔隙中及松散岩的孔隙中;地下水按含水介质分为松散岩类孔隙水、碎屑岩裂隙孔隙水、基岩裂隙水和岩溶水4大类<sup>[11]</sup>。

流域年平均气温8.1℃,多年平均蒸发量1895.7 mm(Φ20 cm蒸发皿),多年平均地面温度10.2℃。流域因受大气环流和地理位置的影响,冬季寒冷干燥、少雨,夏季炎热,多雷阵雨,秋季偏凉,降雨稍多。据韩家崄站1957-2007年降水资料统计,多年平均降水量为351.8 mm,年最大降水量为748.9 mm(1964年),年最小降水量为143.5 mm(1965年),年最大降水量是最小降水量的5.2倍。年降水量多集中在6-9月份,占全年降水量的72%。

## 3 数据来源及研究方法

### 3.1 数据

本文选用具有代表性的位于海流兔河出水口的韩家崄站1957-2007年的流量资料,数据由水文站提供,该水文站控制流域面积2542 km<sup>2</sup>。采用递归滤波法对流量过程进行自动分割,然后用 Mann-Kendall 非参数检验方法对基流时间序列进行趋势分析,再采用情势变化指数法(RSI)<sup>[12]</sup>分析其突变点。

### 3.2 研究方法

3.2.1 基流分割方法 数字滤波法是近年来被国际上应用最为广泛的基流分割方法,而递归滤波模型是2005年由 Eckhardt 根据数字滤波法修正改进后提出的。其计算公式如下:

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

式中:  $q_t$  和  $q_{t-1}$  分别是  $t$  和  $t-1$  时刻的基流;  $Q_t$  是  $t$  时刻的总径流量;  $\alpha$  是在没有地下水补给时的衰退常数即滤波系数;  $BFI_{\max}$  是各个数字模拟算法在连续时间序列中计算得出的最大基流值。

利用公式(1)即可直接计算基流量,其中包括两个参数滤波系数  $\alpha$  和  $BFI_{\max}$ 。Eckhardt 给出了不同类型流域的  $BFI_{\max}$  值,他建议以孔隙含水层为主的常流河  $BFI_{\max}$  可取为0.8,因此海流兔河的  $BFI_{\max}$  值可取为0.8;而  $\alpha$  可通过下式计算得出:  $b_{k+1} = \alpha b_k$ ,  $b_k$  和  $b_{k+1}$  分别是第  $k$  天和第  $k+1$  天的基流量( $k \geq 5$ ),根据海流兔河日流量资料,计算得到  $\alpha = 0.997$ 。

3.2.2 趋势分析方法 M-K法是一种被广泛应用于分析趋势变化特征的检验方法,它不仅可以通过检验时间序列趋势上升与下降,而且还可以说明趋势变化的程度,能很好地描述时间序列的趋势特征<sup>[12]</sup>。其检验的统计变量  $S$  计算公式如下:

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

其中:

$$\text{sgn}(X_j - X_k) = \begin{cases} +1, & X_j - X_k > 0 \\ 0, & X_j - X_k = 0 \\ -1, & X_j - X_k < 0 \end{cases} \quad (3)$$

$S$  为正态分布,其均值为0,方差  $\text{Var}(S) = n(n-1)(2n+5)/18$ 。当  $n > 10$  时,标准的正态统计变量由下式计算:

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

$Z$  为正值表示增加趋势,负值表示减少趋势, $Z$  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。

3.2.3 情势变化指数法 情势变化指数法 (Regime Shift Index, RSI) 是结合了部分累积和检验法 (CUSUM)<sup>[13]</sup> 和  $t$  检验法的算法,被应用于检测水文时间序列等序列的突变点的一种方法。其算法如下:  $X_1, X_2, \dots, X_l$  代表实时有新数据进来的时间序列值。当有新一年的数据进来时,检测新序列的标准差是否偏离了原来序列的平均值,是否发生了变化,如果发生变化的话,就将此年标记为潜在的变化点  $c$ , 随后再检验是接受还是拒绝该假设。用序列变化指数 (RSI) 参量来判定,对于每个  $c$ :

$$RSI_c = \sum_{i=c}^{c+m} \frac{x_i^*}{l\sigma_l} \quad (5)$$

式中:  $m = 0, 1, 2, \dots, l-1$ ,  $l$  是被检测序列的切割长度;  $\sigma_l$  是时间序列中所有一年间隔的数据的平均标准偏差,  $RSI$  代表标准化的偏差  $x_i^*$  与新序列的平均值 ( $\bar{X}_{new}$ ) 之间的累积和,新序列均值与原有序列均值 ( $\bar{X}_{cur}$ ) 之间差异的显著性用学生  $t$  检验检测:

$$\text{diff} = \bar{X}_{new} - \bar{X}_{cur} = t \sqrt{\frac{2\sigma_l^2}{l}} \quad (6)$$

其中  $t$  是在给定概率水平  $p$  下,自由度为  $(2l-1)$  时  $t$  分布的值,如果新序列开始后的任意时间,

$RSI$  为负值,那么检测失败则重新开始。如果  $RSI$  从  $l-1$  开始保持正值,那么  $c$  就是在概率  $\leq p$  时的突变点,然后从  $c+1$  开始检测下一个突变点,保证即使在间隔小于 1 年的情况下也可以检测出突变点<sup>[14]</sup>。

## 4 结果与分析

### 4.1 基流计算

根据实测资料,韩家岭站年均实测径流量为 0.833 亿  $\text{m}^3$ 。在基流计算中,一般以年基流量和基流占总径流量的比例即基流指数 (Base flow Index, BFI) 来量化。各代际基流计算结果见表 1。

表 1 韩家岭站代际基流计算结果 亿  $\text{m}^3/\text{a}$ , mm

年代	径流量	基流量	年降水量	基流指数 BFI
1957-1959	0.97	0.75	399	0.77
1960-1969	1.09	0.80	384	0.73
1970-1979	0.86	0.61	350	0.71
1980-1989	0.82	0.55	349	0.67
1990-1999	0.59	0.43	292	0.73
2000-2007	0.75	0.52	372	0.69
年代均值	0.833	0.59	352	0.71

从计算结果可以看出,基流占径流的比重较大,基流指数在 0.67~0.77 之间变化,平均基流指数是 0.71。钱云平等<sup>[15]</sup> 采用了同处于黄河中游干旱半干旱黄土沟壑区河流的径流资料,分析计算了这些河流的基流指数,其中皇甫川的多年平均  $BFI$  为 0.11,孤山川为 0.22,窟野河 0.33,可见这些河流径流主要来自直接地表径流,受地下水补给较少,基流占径流比例较少,因为这些流域地处丘陵沟壑区,地表覆盖黄土,透水性差,水土流失严重,不利于降水入渗和地下水赋存;而海流兔河处于风沙滩地区,地势较平缓,地表多为风积沙,透水性较强,有利于降水下渗,且地下多为孔隙含水层,储水能力好,所以该流域常年受到地下水源的补给,年内断流天数相对较少(基本无断流),基流指数相对较大。

### 4.2 基流变化趋势分析

4.2.1 基流及  $BFI$  的年际变化 海流兔河韩家岭站年均径流量和基流量及  $BFI$  的年际变化过程及趋势如图 2 所示,通过该图可以看出在研究期内,该站年均径流和基流均呈减少趋势, $BFI$  则在小范围内上下波动。通过 M-K 趋势检验法,得到年均径流、基流及  $BFI$  的  $Z$  值分别为 -6.4、-6.7、-2.2,说明三个系列都呈下降趋势,径流和基流下降趋势显著,通过了 99% 的显著性检验,而  $BFI$  的下降趋势通过

了95%的显著性检验。由此说明海流兔河基流年际变化不均匀,整体呈下降趋势,这与整个黄河河川基流量的减少趋势一致。对年降水量的M-K趋势检验结果表明降水的下降趋势不显著。

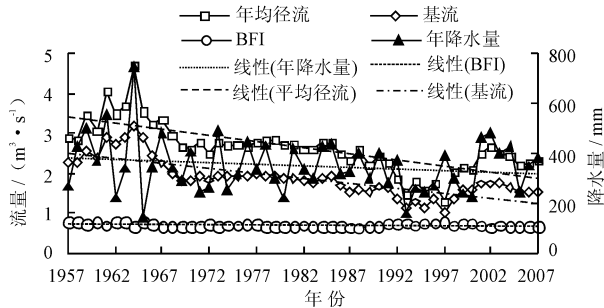


图1 韩家崮站年均径流、基流及BFI过程线及变化趋势线

从图1可以看出,海流兔河基流变化与径流变化一一对应。这与BFI值较高,说明基流为径流的主要成分的结果相一致。由于流域的产流特点,流域的直接径流较少,产流受包气带的调蓄作用影响,而且受水库、傍河取水、灌溉等一系列人类活动的影响,降水量与实测径流量和基流量的对应关系不是很明显。

4.2.2 基流及BFI的年内变化 该站基流、径流、降水量及BFI的多年平均年内变化过程见图2。可以看出韩家崮站的月平均径流在8月份最大,6月份最小,这是由于4月以后该地区蒸发越来越强烈导致径流逐渐减少,6月出现最低值,7、8月进入雨季高峰,径流增大,在8月出现高峰;月平均基流的变化过程是先减少后增加,6、7月份最小,随后又有回升趋势;BFI年内分配均匀。8月径流高峰,而基流量仅从6、7月的最低点略有恢复,所以8月成为BFI的最低点,说明8月地表径流比例较大。

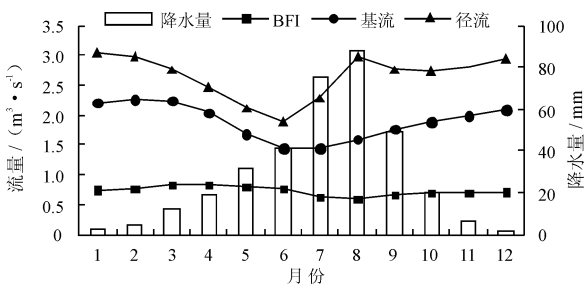


图2 韩家崮站降水量、径流、基流、BFI年内变化过程

### 4.3 突变分析

突变即序列受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)跳跃式地转变到另一种稳定态(或稳定持续的变化趋势)<sup>[16]</sup>。序列中的突变点可通过情势变化指

数法(RSI)来识别。图3、4、5分别是韩家崮站径流及基流和BFI从1957-2007年的突变分析结果,可以看出,径流在1968、1989、2001年发生突变,2001年前向下突变,2001年后向上突变。基流的突变点减少,发生在1966年和1986年,突变发生后基流序列的均值较变点发生前有所降低;BFI则在1967、1991、2001年出现突变点,在1967年突变发生后BFI较之前有所减少直到第二个突变发生之后,又有所增加,增加到2001年时又呈下降趋势。

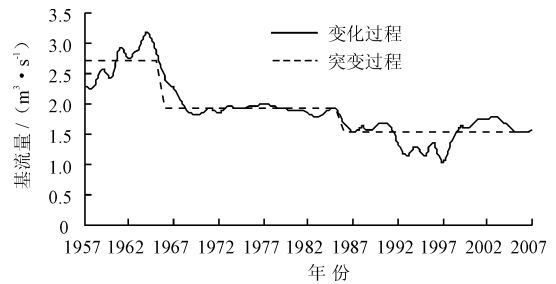


图3 海流兔河基流突变过程

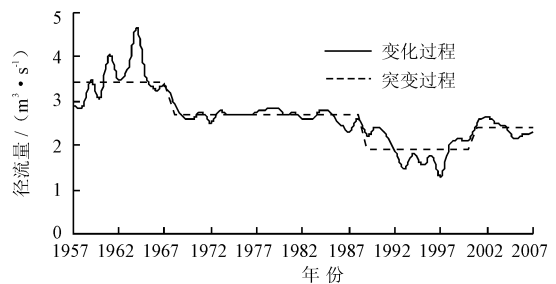


图4 海流兔河径流突变过程

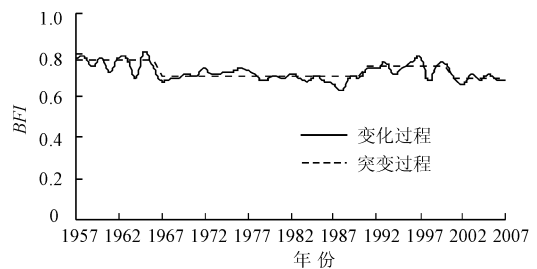


图5 海流兔河BFI突变过程

由此可以看出,径流对外界条件变化的反应敏感,而基流受到包气带调蓄的影响,因此年际变化相对和缓,出现的突变少于径流,而BFI的突变受到两者的影响。据前所述,年降雨量在研究期内没有显著变化。1960年以来,黄河中游地区人类活动变得频繁,分别建设和实施了很多大型灌溉、引蓄水工程和水土保持措施,例如1970年以来黄河中游岔巴沟流域淤地坝的大量修建造成河流年径流减少了30%以上<sup>[17]</sup>。根据Yang等的调查<sup>[18]</sup>,1970年前后海流兔流域修建了4座水库和分水坝,1989-1997

年间建成了5座分水坝,1990-1999年间作物种植面积显著增加。由此推断1966-1968年的径流和基流突变与水库和分水坝的建设有关,分水坝和作物面积的变化导致了1986-2001年的径流突变、1986年的基流突变和1991-2001年BFI的突变。

## 5 结 语

本文选用递归滤波法对海流兔河韩家崙水文站1957年到2007年的流量过程进行了基流分割,得到了韩家崙站基流过程序列,采用M-K趋势分析法分析了年均径流量、基流量及基流指数(BFI)的年际变化和年内分配,并用RSI方法对基流和BFI序列进行突变点分析。得出如下结论:

(1)由于流域的地形地貌和水文地质条件,处于黄河流域半干旱风沙滩的海流兔河基流占径流比重较大,常年受地下水补给;多年平均径流为0.833亿 $\text{m}^3/\text{a}$ ,年平均基流为0.59亿 $\text{m}^3/\text{a}$ ,多年平均BFI为0.71。BFI较同区域黄土沟壑区河流大。

(2)用M-K方法检验海流兔流域年均径流和基流均呈明显减少趋势,这是气温、降水、人类活动等多种因素综合作用的结果;BFI变化不显著,说明基流所占径流的比例总体上没有多大变化。综合径流、基流和BFI的突变分析结果,可认为水库和分水坝的建设以及作物种植面积的变化是造成径流、基流和BFI突变的主要原因。

(3)径流同时受蒸发过程和降雨过程影响,6月为最低点,后迅速恢复,到8月达峰值。基流全年变化过程相对平缓,6-8月均处于低位;BFI年内分配均匀,8月的最大月降雨造成地表径流增大,而基流仍处于低点,所以BFI出现最低点。因此8月前后应为流域内的水利工程措施拦截部分地表径流的最好时机。

### 参考文献:

- [1] 邱海军,曹明明. 近50a来榆林市主要代表站河川基流量变化及趋势分析[J]. 干旱区资源与环境,2011,25(2):98-101.
- [2] 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.
- [3] 赵玉有,耿鸿江,潘辉学. 基流分割问题评述[J]. 工程勘察,1996(2):30-32.
- [4] Ronald A S, Michele Y C. HYSEP: A computer program streamflow hydrograph separation and analysis[R]. USGS Water Resources Investigation Report, Lemoyne, Pennsylvania: USGS, 1996.
- [5] Nathan R J, Memahon T A. Evaluation of automated techniques for baseflow and recession analysis[J]. Water Resources Research, 1990, 26(7):1465-1473.
- [6] Eckhardt K. How to construct recursive digital filters for baseflow separation[J]. Hydrological Processes, 2005,19:507-515.
- [7] Wels C, Cornett R J, Lazerte B D. Hydrograph separation: a comparison of geochemical and isotopic tracers[J]. J of Hydrol, 1991, 12:253-274.
- [8] 张华,张勃,赵传燕. 黑河上游多年基流变化及其原因分析[J]. 地理研究,2011,30(8):1421-1430.
- [9] 陈利群,刘昌明,郝芳华,等. 黄河源区基流变化及影响因素分析[J]. 冰川冻土,2006,28(2):141-148.
- [10] 邱海军,曹明明. 近50a来榆林市主要代表站河川基流量变化趋势分析[J]. 干旱区资源与环境,2011,25(2):98-101.
- [11] 徐志玲,徐永利,李燕萍. 鄂尔多斯地下水分布特征研究[J]. 内蒙古水利,2010(4):93-94.
- [12] 曹洁萍. 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):35-40.
- [13] Taylor W. Change-point analysis: a powerful new tool for detecting changes[EB/OL]. [2000]. <http://WWW.variation.com/cpa/tech/changepoint>.
- [14] Rodionov S N. A sequential algorithm for testing climate regime shifts[J]. Geophysical Research Letters, 2004, 31:1-4.
- [15] 钱云平,蒋秀华,金双彦,等. 黄河中游黄土高原区河川基流特点及变化分析[J]. 地球科学与环境学报,2004,26(2):88-91.
- [16] 李占玲,徐宗学. 黑河上游山区径流变化分析[J]. 干旱区资源与环境,2012,26(9):51-55.
- [17] 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.
- [18] Yang Z, Zhou Y, Weninger J. The cause of flow regime shifts in the semi-arid Hailiutu River, Northwest China[J]. Hydrol. Earth Syst. Sci, 2012, 16:83-103.