

# 巴音沟河近60年出山口年径流量演变规律

刘艺<sup>1</sup>, 雷晓云<sup>1</sup>, 马红刚<sup>2</sup>, 邢坤<sup>1</sup>, 吕姣姣<sup>1</sup>

(1. 新疆农业大学 水利与土木工程学院, 乌鲁木齐 830052; 2. 石河子巴音沟河流域管理处, 新疆 石河子 832000)

**摘要:**对径流演变规律的研究是水资源合理利用、水利规划的前提。以新疆典型山溪河流巴音沟河黑山头水文站1956—2014年的年径流序列为基础,采用累积距平法、Mann-Kendall突变检验法、小波分析方法,对巴音沟河流域年径流量的变化趋势、突变特征、周期演变规律进行了研究。结果表明:(1)近60年来巴音沟河流域年径流量有缓慢上升趋势,并且呈现出一定的阶段性。(2)近60年来巴音沟河流域年径流量变化在1958—1960年和2003年两个时间段发生突变。1958—1960年是径流由多变少的突变时段,2003年是径流由少变多的突变时段。(3)巴音沟河流域年径流量主要存在7年,11年,30年的主周期,且30年时间尺度周期最明显,是河流的第一主周期。

**关键词:**径流; 累积距平; Mann-Kendall; 小波分析; 巴音沟河

**中图分类号:** P333

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2016)02-0139-04

## Characteristics of Runoff from Mountainous Watershed of Bayingou River Basin in Recent 60 Years

LIU Yi<sup>1</sup>, LEI Xiaoyun<sup>1</sup>, MA Honggang<sup>2</sup>, XING Kun<sup>1</sup>, LÜ Jiaojiao<sup>1</sup>

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China; 2. Management Center of Bayingou River in Shihezi, Shihezi, Xinjiang 832000, China)

**Abstract:** Runoff evolution pattern research is the premise of the rational use of water resources and water resources planning. Bayingou River is a typical mountain stream river in Xinjiang. According to the time series data of annual runoff at the Heishantou hydrological station of the Bayingou River from 1956 to 2014, we used accumulated anomaly, Mann-Kendall test and wavelet analysis to diagnose the runoff change trend, mutation characteristics and cycle evolution pattern. The results showed as follows. (1) Annual runoff was slowly rising trend. (2) In recent 60 years, annual runoff mutations happened in 1958—1960 and 2003. From 1958—1960 to 2003, the runoff kept sloping down, but began to climb up since 2003. (3) The principal periods of annual runoff of the Bayingou River were 7 years, 11 years and 30 years, and the 30 years period is the most obvious.

**Keywords:** runoff; accumulated anomaly; Mann-Kendall; wavelet analysis; Bayingou River

径流是流域水量平衡方程中的重要组成部分,研究径流的变化规律对于了解该流域地表水资源的变化趋势及水资源合理开发利用具有重要现实意义。新疆巴音沟河是干旱区典型的中小型山溪性河流,多年平均径流量3.07亿m<sup>3</sup>,其是兵团第八师巴音沟河灌区的主要水源,同时承担着沙湾县及独山子部分工业、农业及生活供水任务,对当地经济社会发展及生态系统保护起着至关重要的作用<sup>[1]</sup>。然而,目前国内对巴音沟河出山口径流量的时序变化规律研究成果少有报道,在新疆执行最严格水资源管理制度的背景下,我们对巴音沟河流域年径流量的变化趋势、突变特征、周期

演变规律进行系统的研究,可为流域水资源的合理利用、水利规划提供理论依据和技术支持,同时该研究成果也可作为干旱区中小河流的同类研究提供借鉴。

## 1 流域概况

巴音沟河流域位于新疆天山北坡中段,准噶尔盆地南缘,东与金沟河相邻,西与奎屯河接壤,南抵依连哈比尔尕山脉的冰峰雪岭,北达古尔班通古特沙漠。其地理位置为东经84°45′—85°27′,北纬43°29′—44°58′。河流水网发育,成树状水系。发源于乌苏县境内,由卡哈尔阿特、阿冬萨拉、哈尔莫仁、阿勒泰沙拉、依克马斯吐及

东测沙湾县境内的巴依什果勒、乌拉斯台等七条主要支流汇集而成,自西南流向东北,全长 160 km。巴音沟河流域集水面积为 1 579 km<sup>2</sup>,森林覆盖面积 51 km<sup>2</sup>。最大年径流量为 4.33 亿 km<sup>3</sup>,最小年径流量 2.22 亿 km<sup>3</sup>。全年径流量分配:春季 3—5 月 0.19 亿 km<sup>3</sup>,占全年 6.55%;夏季 6—8 月 2.28 亿 km<sup>3</sup>,占全年 72.19%;秋季 9—11 月 0.52 亿 km<sup>3</sup>,占全年 16.70%;冬季 12—2 月 0.14 亿 km<sup>3</sup>,占全年 4.57%。其径流以冰川雪源消融补给为主,降雨补给次之。

巴音沟河自上游到下游历史上共建立过喇嘛庙、二道沟、黑山头、安集海大桥四个水文站。本文以出山口黑山头水文站 1956—2014 年的年径流序列为基础资料,采用累积距平法、Mann-Kendall 突变检验法、小波分析方法<sup>[2-4]</sup>,对径流的变化趋势、突变特征、周期演变规律进行分析,从多个角度揭示其径流演变规律<sup>[5]</sup>。

## 2 研究方法

### 2.1 趋势分析

累积距平法<sup>[6-7]</sup>能够反映径流量在不同时代的阶段变化<sup>[8]</sup>。对于序列  $x$ ,其某一时刻  $t$  的累积距平为:

$$\hat{X}_t = \sum_{i=1}^t (x_i - \bar{x}) \quad (t=1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

式中,  $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$

将  $n$  个时刻的累积距平值全部算出,即可绘出累积距平曲线进行趋势分析。累积距平曲线比较直观,从曲线明显的上下起伏,可以准确判断其长期显著的演变趋势及持续性变化<sup>[9]</sup>。

### 2.2 突变分析

本文采用 Mann-Kendall 非参数统计检验法<sup>[10-11]</sup>来确定巴音沟河流域年径流量的突变点。该方法的优点是不需要样本遵从一定的分布,也不受少数异常值的干扰,更适用于类型变量和顺序变量,计算比较简便<sup>[12]</sup>。对于具有  $n$  个样本量的时间序列  $x$ ,构造秩序列:

$$S_k = \sum_{i=1}^k r_i \quad (k=2, 3, \dots, n) \quad (2)$$

式中,  $r_i = \begin{cases} 1, & \text{当 } x_i > x_j \\ 0, & \text{当 } x_i \leq x_j \end{cases} \quad (j=1, 2, \dots, i)$

秩序列  $S_k$  是第  $i$  时刻数值大于  $j$  时刻数值个数的累计数。

在时间序列随机独立的假定下,定义统计量:

$$UF_k = \frac{S_k - E(S_k)}{\sqrt{\text{var}(S_k)}} \quad (k=1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

式中:  $UF_1=0$ ,  $E(S_k)$ ,  $\text{var}(S_k)$  是累计数  $S_k$  的均值和方差。在  $x_1, x_2, \dots, x_n$  相互独立,且具有相互连续分布时,可由下式分别求得:

$$E(S_k) = \frac{n(n-1)}{4} \quad (4)$$

$$\text{var}(S_k) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{72} \quad (5)$$

$UF_k$  服从标准正态分布,它是按时间序列  $x$  顺序  $x_1, x_2, \dots, x_n$  计算出的统计量序列,给定显著性水平  $\alpha$ ,查正态分布表,得出相应的  $U_\alpha$  值。按时间序列  $x$  的逆序  $x_n, x_{n-1}, \dots, x_1$ ,再重复上述过程,同时使  $UB_k = -UF_{(n-k)}, k=1, 2, \dots, n-1, UB_n=0$ 。

将  $UF_k, UB_k$  两个统计量序列曲线和给定显著性水平下的临界值  $U_\alpha$  绘制在一张图上,根据三者在图上显示出来的相互关系,判定是否发生突变以及突变发生的时间等<sup>[13]</sup>。

### 2.3 周期分析

小波分析方法应用于分析水文序列时可以给出不同层次的变化尺度及变化时间<sup>[14]</sup>。Morlet 小波为复数小波,其实部和虚部相位相差  $\pi/2$ ,消除了实数小波在变换过程中系数模的震荡,目前应用最为广泛。所以,本文拟采用 Morlet 小波<sup>[15]</sup>来分析巴音沟河流域径流序列的多时间尺度特性,Morlet 小波的函数为:

$$\psi(t) = \pi^{-1/4} e^{i\omega_0 t} e^{-t^2/2} \quad (6)$$

式中:  $\omega_0$ ——常数;  $t$ ——虚部。

给定的小波函数  $\psi(t)$ ,时间序列  $f(t) \in L^2(R)$  的连续小波变换为:

$$W_f(a, b) = |a|^{-1/2} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \bar{\psi}\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (7)$$

式中:  $a$ ——尺度因子,反映了小波的周期长度;  $b$ ——时间因子,反映了时间上的平移;  $\bar{\psi}(t)$ —— $\psi(t)$  的复共轭函数;  $W_f(a, b)$ ——小波系数。

将时间域上的关于  $a$ (尺度)的所有小波系数的平方进行积分,即为小波方差。小波方差随时间的变化过程为小波方差图,它反映了波动的能量随尺度的分布,可以用来确定径流时间序列存在的主要周期<sup>[16]</sup>。其计算公式为:

$$\text{var}(a) = \int_{-\infty}^{\infty} |W_f(a, b)|^2 db \quad (8)$$

## 3 结果与分析

### 3.1 变化趋势

由巴音沟河流域 1956—2014 年径流年际变化过程线(图 1)可知,近 60 年来流域年径流量呈缓慢上升趋势,且表现出一定的周期性;在此基础上,累积距平曲线(图 2)更好地呈现出了流域径流量年际变化的阶段性,具体可以分为如下 4 个时段(持续时间为 5 a 及以上):1956—1966 年为径流增加时期,到 1966 年达到近 60 a 来的最大值,累积距平为 1.944 亿 m<sup>3</sup>;1967—1974 年为径流波动时期,在该时段内,持续丰水和枯水时间较短,丰枯交替出现。波动程度较

小,径流累积距平极差仅为 0.433 亿  $\text{m}^3$ ;1975—1997 年为径流显著减少时期,到 1997 年达到近 60 a 来的最小值,径流累积距平为 -5.576 亿  $\text{m}^3$ ;随后从 1998 年开始,年径流量又开始增多,到 2012 年达到近 60 a 的第二个极大值,径流累积距平为 1.105 亿  $\text{m}^3$ ,1998—2014 年为径流显著增加时期。

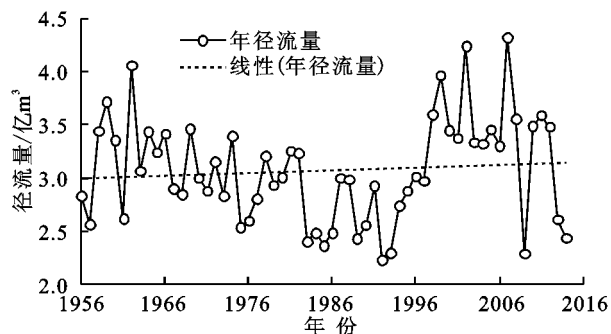


图1 巴音沟河流域径流年际变化过程线

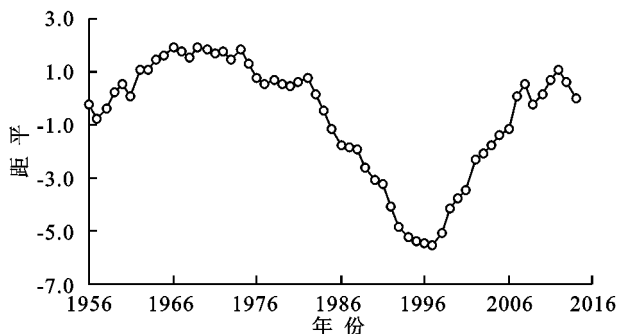


图2 巴音沟河流域年径流量累积距平曲线

### 3.2 突变特征

采用 Mann-Kendall 非参数统计检验法分析了巴音沟河流域年径流序列的突变情况,如图 3 所示。分析图可知,在给定的显著性水平  $\alpha=0.05$ ,临界值  $=\pm 1.96$  的条件下,1956—1970 年 UF 统计变量基本都大于零,说明径流变化有上升趋势,且 UF 统计曲线落在临界值之内,说明径流变化不显著,呈平缓上升趋势。1971—2006 年 UF 统计变量均小于零,说明径流变化有下降趋势。其中,1985—1999 年 UF 统计曲线超过了临界值,表明径流变化有明显的下降趋势。2006—2014 年 UF 统计变量又大于零,说明径流变化有上升趋势,但 UF 统计曲线仍落在临界值之内,径流上升趋势不明显。图 3 中,UF 和 UB 统计曲线在两条临界线之间的部分相交于 1958 年、1960 年和 2003 年,代表突变发生的年份,说明近 60 a 来巴音沟河流域年径流量变化在 1958—1960 年和 2003 年两个时间段发生突变。1958—1960 年是径流由多变少的突变时段,2003 年是径流由少变多的突变时段。

### 3.3 周期演变

采用 Morlet 小波对巴音沟河流域近 60 年来黑山头站年径流量进行周期演变分析,得到径流时间序列的小波变换系数实部图,见图 4。实部图中的实线表

示小波变换系数为正值,这时径流偏丰;虚线表示小波变换系数为负值,这时径流偏枯。由图可见,流域年径流量变化主要存在 5~7 a,10~13 a,27~30 a 周期振荡。在 5~7 a 的特征尺度下,丰枯交替特别频繁,且 1983—1987 年周期特征没有体现出;在 10~13 a 的特征尺度下,20 世纪 70 年代中期之前表现为 10 a 左右的特征尺度,20 世纪 70 年代之后表现为 11 a 左右的特征尺度;27~30 a 的特征尺度在整个研究时段内表现最为明显,呈现出非常规律的年径流量偏多偏少的交替,并且主要以 30 a 左右的波动周期为主。

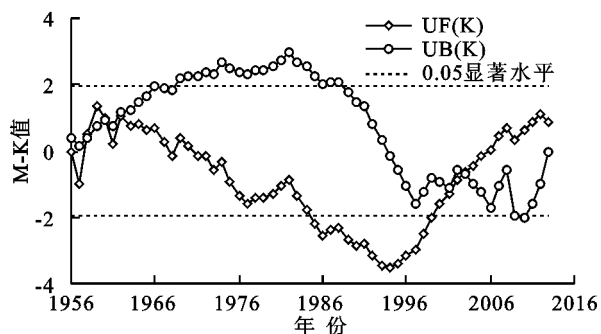


图3 巴音沟河流域 Mann-Kendall 径流突变检验图

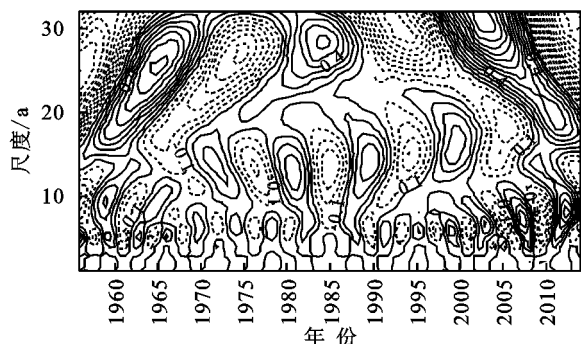


图4 巴音沟河流域年径流量小波变换系数实部图

图 5 是巴音沟河流域年径流量变化的小波方差图,小波方差的大小表示某一尺度成分的多少,反映它所对应时间尺度的周期是否明显,小波方差值越大,它所对应的时间尺度的周期越明显。小波方差图反映了能量随时间尺度的分布,可以确定径流时间序列的主要周期。由图可知,流域年径流量主要存在 7 a,11 a,30 a 的主周期,且 30 a 时间尺度上小波方差值最大,周期最明显,是河流的第一主周期。

在此基础上,图 6 给出了年径流量在 7 a,11 a 和 30 a 时间尺度下小波变换系数实部图,在  $a=7$  和 11 的尺度下,径流丰枯变化和突变点可以准确地给出,平均每 3~4 a 发生一次丰枯交替。在  $a=30$  的尺度下,1963—1971 年、1980—1988 年、1999—2008 年各时段为正相位,表示径流偏多;而 1956—1962 年、1972—1979 年、1989—1998 年、2009—2014 年为负相位,表示径流偏少;突变点在 1962 年、1971 年、1979 年、1988 年、1998 年、2008 年。

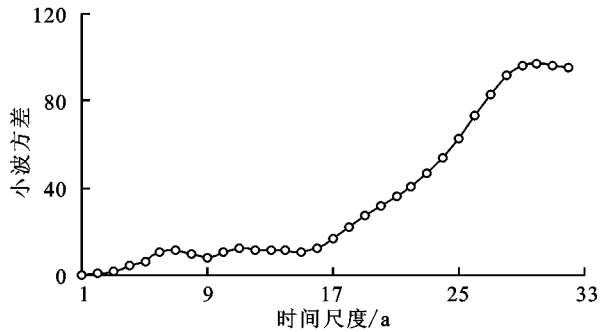


图 5 巴音沟河流域年径流量小波方差图

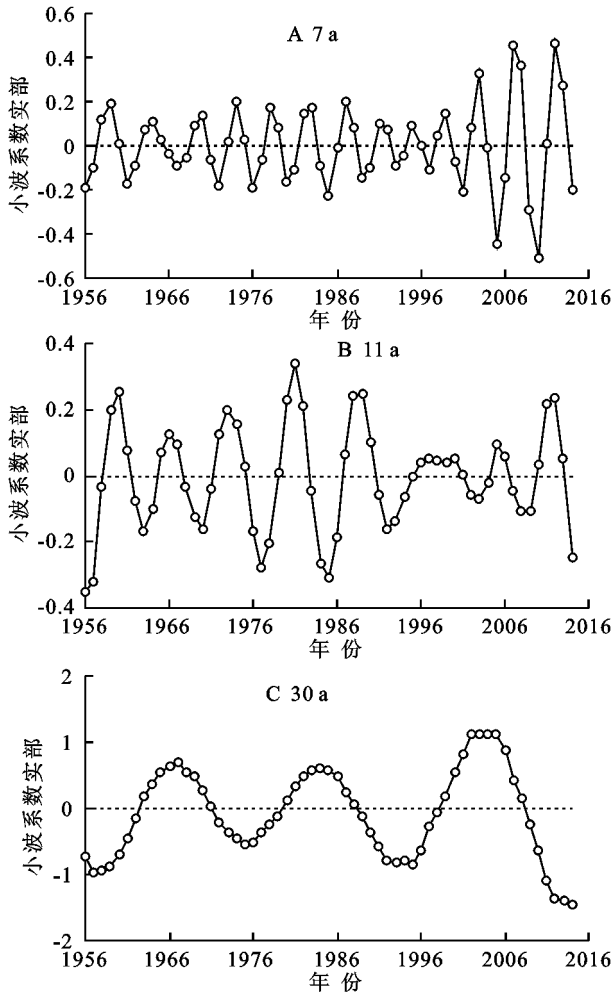


图 6 年径流量在 7 a、11 a 和 30 a 时间尺度下小波变换系数实部图

## 4 结论

(1) 巴音沟河流域 1956—2014 年径流年际变化过程线表明,近 60 a 来流域年径流量呈缓慢上升趋势;累积距平分析更好地呈现出了流域径流量年际变化的阶段性,具体可以分为如下 4 个时段(持续时间为 5 a 及以上):1956—1966 年为径流增加时期;1967—1974 年为径流波动时期;1975—1997 年为径流显著减少时期;1998—2014 年为径流显著增加时期。

(2) Mann-Kendall 突变检验结果显示:在给定的显著性水平  $\alpha=0.05$ ,临界值  $=\pm 1.96$  的条件下,

UF 和 UB 统计曲线在两条临界线之间的部分相交于 1958 年、1960 年和 2003 年,代表突变发生的年份,说明近 60 年来巴音沟河流域年径流量变化在 1958—1960 年和 2003 年两个时间段发生突变。1958—1960 年是径流由多变少的突变时段,2003 年是径流由少变多的突变时段。

(3) 小波分析结果为:小波变换系数实部图表明近 60 a 来巴音沟河流域年径流量的变化主要存在 5~7 a,10~13 a,27~30 a 周期振荡,结合小波方差图上呈现的三个峰值的位置和大小,可知流域年径流量主要存在 7 a,11 a,30 a 的主周期,且 30 a 时间尺度周期最明显,是河流的第一主周期。

### 参考文献:

- [1] 白桦,穆兴民,高鹏,等.嘉陵江流域降水及径流演变规律分析[J].水土保持研究,2012,19(1):102-106.
- [2] 张贤芳,舒强,李偲.张贤芳,舒强,李偲.叶尔羌河近 48 年来径流演变规律研究[J].干旱区资源与环境,2012,26(1):93-97.
- [3] 周园园,师长兴,范小黎,等.国内水文序列变异点分析方法及在各流域应用研究进展[J].地理科学进展,2011,30(11):1361-1369.
- [4] 陆文秀,刘丙军,陈晓宏,等.珠江流域降水周期特征分析[J].水文,2013(2):82-86.
- [5] 乔木,周生斌,卢磊.艾比湖流域年径流变化特征分析[J].水土保持学报,2010,24(6):236-239.
- [6] 杨明金,张勃,王海青,等.黑河流域 1950 年~2004 年出山径流变化规律分析[J].资源科学,2009,31(3):413-419.
- [7] 魏凤英.现代气候统计诊断与预测技术[M].北京:气象出版社,2007.
- [8] 张晓晓,张钰,徐浩杰.1961—2010 年白龙江上游水文气象要素变化规律分析[J].干旱区资源与环境,2015,29(2):172-178.
- [9] 王帅.渭河流域分布式水文模拟及水循环演变规律研究[D].天津:天津大学,2013.
- [10] 徐浩杰,杨太保,柴绍豪.2010 年讨赖河山区径流变化特征及其驱动因素[J].中国沙漠,2014,34(3):878-884.
- [11] 丁贞玉,马金珠.石羊河流域出山口径流特征及其与山区气候变化相关关系分析[J].资源科学,2007,29(3):53-58.
- [12] 胡海英,黄国如,黄华茂.辽河流域铁岭站径流变化及其影响因素分析[J].水土保持研究,2013,20(2):98-102.
- [13] 陈忠升,陈亚宁,徐长春.近 50a 来塔里木河干流年径流量变化趋势及预测[J].干旱区地理,2011,34(1):43-51.
- [14] 夏库热·塔依尔,海米提·依米提,麦麦提吐尔逊·艾则孜,等.基于小波分析的开都河径流变化周期研究[J].水土保持研究,2014,21(1):142-146,151.
- [15] 轩玮,李翀,赵慧颖,等.额尔古纳河流域近 50 年水文气象要素变化分析[J].水文,2011,31(5):80-87.
- [16] 邵晓梅,许月卿,严昌荣.黄河流域降水序列变化的小波分析[J].北京大学学报:自然科学版,2006,42(4):503-509.