

泾河流域径流量变化特征研究

王娇¹, 姜仁贵¹, 解建仓¹, 王尹萍¹, 汪雅梅²

(1. 西安理工大学 省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048;

2. 陕西省江河水库管理局, 陕西 西安 710018)

摘要: 通过分析张家山典型水文测站长序列径流量变化情况, 揭示泾河流域径流量演变规律, 预测未来变化趋势。采用线性回归、滑动平均法、Mann-Kendall 检验分析泾河流域径流量变化特征, 采用有序聚类法和滑动 t 检验分析突变点, 采用 R/S 法对流域径流量的未来变化趋势进行预测。结果表明: 张家山站径流量年内分配不均, 主要集中在 7-10 月, 占到全年径流量的近 70%。从年际变化趋势来看, 年径流量、汛期径流量与非汛期径流量丰枯年份交替频繁, 突变点在 1996 年左右, 其中汛期径流量波动性与年径流量波动性相似程度更高, 非汛期波动相对平稳。张家山站在 1950s 至 1980s 年代平均径流量较大, 处于偏丰年代, 1990s 至 2010s 年代平均径流量小于多年平均值。年径流量、汛期径流量与非汛期径流量均呈现出显著减少趋势, 其 Hurst 指数均大于 0.5, 表明未来与当前趋势有一定持续性, 预测未来将呈现持续减少趋势。

关键词: 径流量; 变化趋势; 突变分析; R/S 分析; 泾河

中图分类号: TV121⁺.4; P333

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2018)06-0088-06

Analysis on characteristics of runoff variation in Jinghe River

WANG Jiao¹, JIANG Rengui¹, XIE Jiancang¹, WANG Yinping¹, WANG Yamei²

(1. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology,

Xi'an 710048, China; 2. Rivers and Reservoirs Administration Bureau in Shaanxi, Xi'an 710018, China)

Abstract: Based on the analysis of runoff variation in the typical hydrological station of Zhangjiashan, the evolution law of runoff in Jinghe River Basin is revealed, and the future trend is predicted. The linear trend analysis, moving average method and Mann-Kendall test method were used to investigate the variation of runoff. The sequential cluster method and sliding t -test were applied to study the abruptness of the runoff, and the R/S method was used to predict the future trend of runoff. The results showed that the distribution of annual runoff in Zhangjiashan Station was unevenly distributed, which was mainly concentrated in July and October, accounting for nearly 70% of the annual runoff. From interannual variation trend, dry year and wet year are alternating frequently, and mutation point is in around 1996. The flood season runoff was highly similar with the annual runoff, non-flood season runoff was relatively stable. The average runoff of Zhangjiashan Station from the 1950s to 1980s was relatively large, and from the 1990s to 2010s was less than the average of many years. Annual runoff, flood season runoff, and non-flood season runoff show a significant decrease trend, the Hurst index were greater than 0.5, which shows that there is a certain degree of continuity between the future and the current trend. The forecast will show a continuous decreasing trend in the future.

Key words: runoff; variation trend; abruptness analysis; R/S analysis; Jinghe River

收稿日期: 2018-05-18; 修回日期: 2018-07-10

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0401409); 国家自然科学基金项目(51509201, 51679188); 陕西省自然科学基金基础研究基金项目(2018JM5031)

作者简介: 王娇(1994-), 女, 甘肃天水人, 硕士研究生, 研究方向为流域径流变化特征。

通讯作者: 姜仁贵(1985-), 男, 江西玉山人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事水资源适应性管理研究。

1 研究背景

河川径流作为一种重要的水资源,支撑着流域社会、经济、生态等各方面的可持续发展^[1]。流域径流量的变化,对该流域的经济发展、生态环境以及对水资源的保护、开发利用等都产生着巨大影响。近些年来,由于气候环境与人类活动对河川径流量的变化产生了较大影响,对径流量变化趋势的研究也逐渐成为水科学研究的主要方面之一^[2]。鉴于西北地区的特殊环境状况,水资源对其生态环境和社会经济的发展影响更加重大。泾河作为渭河的第一大支流,是西北地区较为重要的流域之一,是关中平原中部泾惠渠灌区的水源,因此对其径流变化规律的分析有着重要的意义。通过分析可以为流域水资源区域规划、流域调控管理等提供参考依据,从而改善生态环境、推动经济发展。

近年来,诸多学者围绕河川径流变化趋势特征开展了众多研究^[3-6]。例如,陈晨等^[7]运用 Morlet 小波和 Kendall 秩次相关分析法对泾河径流量进行分析,结果表明流域近 80a 的径流量呈现明显减小趋势,并得到相应丰枯周期。郭巧玲等^[8]对黑河流域径流量进行年内分析,结果表明莺落峡站与正义峡站虽有所区别,但整体年内分配十分不均,其分配的变化由降水条件、河流补给和人类活动等因素造成。李二辉等^[9]应用 Mann-Kendall 秩次相关检验、流量历时曲线法、双累计曲线法等分析出黄河中上游径流量变化呈现出减少的趋势,并指出人类活动是径流量减少的主要因素。陈忠升等^[10]利用 Mann-Kendall 法、R/S 法和滑动 t 检验法等对塔里木河径流量进行趋势和突变分析,结果表明流域径流量呈现显著递减趋势,突变点在 1973 年左右,并采用方差分析外推法和叠加趋势预测模型对未来水文周期和径流量进行预测。

鉴于当前关于泾河流域径流量研究的时间序列较短,且多集中于分析影响径流量的因素,对于未来趋势的预测较少,因此本文在当前研究的基础上,进行进一步分析。以泾河流域为研究区域,选用泾河流域张家山站 1956-2015 年径流量数据,采用线性回归、滑动平均法、Mann-Kendall 检验、有序聚类法、滑动 t 检验法以及 R/S 分析法对径流量进行年内、年际、年代和突变点的分析,并对未来发展趋势进行预测。研究结果有助于对泾河流域径流量有更加全面的认识,可以为泾河流域水资源管理和区域的可持续发展提供科学依据,对沿岸生产生活、植被

覆盖、生态环境进行合理规划。

2 数据与方法

2.1 流域概况

泾河流域地处西北地区东南部,是黄河的二级支流,渭河的一级支流,发源于宁夏回族自治区泾源县六盘山东麓的老龙潭,横跨宁夏、甘肃、陕西 3 省 31 个县(市),于陕西省高陵县南注入渭河。流域处于干旱、半干旱向半湿润区的过渡地带,属温带大陆性气候,流域内各地区年降水量在 350~650 mm,主要集中在夏季,且降水强度大。泾河干流总长 455 km,总流域面积 45 421 km²,其中陕西省境内长 275.3 km,流域面积 9 236 km²。流域内水网密布,支流较多,主要有马莲河、蒲河、汭河、黑河等;干流河谷开阔,川地平坦完整,有良好的灌溉条件。本文所研究的张家山(二)水文测站位于泾惠渠大坝下游 500 m 处,集水面积为 43 216 km²。泾河流域概况如图 1 所示。

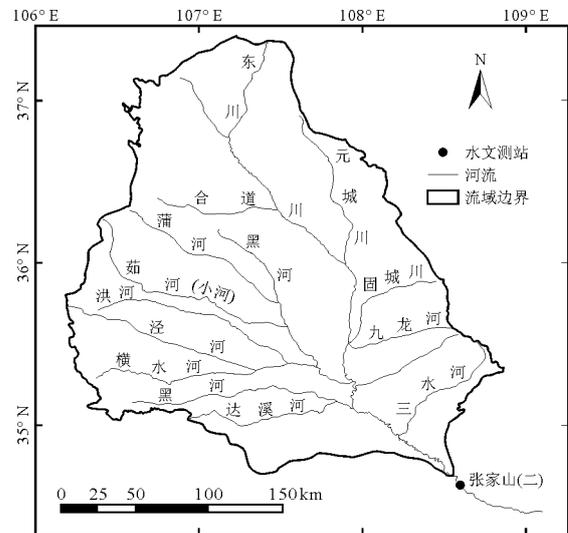


图 1 泾河流域及水文测站分布图

2.2 数据选取

张家山(二)水文测站作为泾河流域总出口站,其数据有代表性,且该站数据完整性与可靠性较高,故选取该水文站 1956-2015 年共 60 年的径流量资料,对其径流变化进行分析。数据来源于《中华人民共和国水文年鉴黄河流域水文资料》、陕西省江河水库管理局统计整理数据等资料。

2.3 研究方法

采用线性趋势、滑动平均法和 Mann-Kendall 法分析径流变化趋势特征,采用有序聚类、滑动 t 检验等方法分析径流突变情况,利用 R/S 法对未来径

流量进行预测。

(1) 线性趋势。线性回归预测法是分析一个自变量 X 与一个应变量 Y 之间的线性关系并建立线性回归方程的预测方法。回归方程为：

$$\hat{Y} = a + bX \quad (1)$$

式中： \hat{Y} 为水文序列； X 为相应时序； a 、 b 为线性回归方程的参数。

(2) 滑动平均法。为了消除偶然因素对地理变化的影响，可采用平滑法对数据进行处理，以便使其随时间发展变化的趋势和方向明显化。计算公式为^[11]：

$$\hat{y}_t = \frac{1}{2l+1}(y_{t-l} + y_{t-(l-1)} + \dots + y_{t-1} + y_t + y_{t+1} + \dots + y_{t+l}) \quad (2)$$

式中： \hat{y}_t 为 t 点的滑动平均值； l 为单侧平滑时距(点数)。若 $l = 1$ ，则称为三点滑动平均，若 $l = 2$ ，则称为五点滑动平均。

(3) 有序聚类。有序聚类法是统计的估计方法，可用于提取水文序列突变点，计算方法如下^[12]：

$$S_t = \sum_{i=1}^t (y_i - \bar{y}_t)^2 + \sum_{i=t+1}^N (y_i - \bar{y}_{N-t})^2 \quad (3)$$

式中： N 为样本数； t 为分割点； \bar{y}_t 和 \bar{y}_{N-t} 为分割点 t 之前和之后样本的均值。

(4) 滑动 t 检验。是通过对比原序列中的两个子序列的均值来检验该序列是否突变。对于一个序列 x ，设定一个基准点，该基准点将原序列划分成了 x_1 和 x_2 两个子序列，定义统计量为^[12]：

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{n_1 s_1^2 + n_2 s_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right)}} \quad (4)$$

式中： n_1 和 n_2 为两个子序列的样本大小， s_1 和 s_2 为两个子序列的标准差。

(5) Mann-Kendall 检验。M-K 检验法广泛应用于时间序列数据趋势检验，该方法不需样本遵从一定的分布，也不受少数异常值的干扰，计算简便^[13]。此方法也可用于水文序列突变检验。

M-K 趋势分析法利用下式计算 Z ：

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sigma} & \text{当 } S > 0 \\ 0 & \text{当 } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sigma} & \text{当 } S < 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中： $S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{Sgn}(x_j - x_k)$ ，其中 $\text{Sgn}(x_j - x_k)$

$$= \begin{cases} 1 & \text{当 } x_j - x_k > 0 \\ 0 & \text{当 } x_j - x_k = 0; \sigma \text{ 为标准差, 均值为 } 0。Z \\ -1 & \text{当 } x_j - x_k < 0 \end{cases}$$

值为正，说明序列数据为增加趋势， Z 值为负，则为减少趋势。

(6) R/S 分析法。 R/S 法利用 Hurst 指数判断序列过去与未来是否存在相同或相反的变化特征，预测序列的未来发展趋势^[14]。基本原理为^[15]：取时间序列 $x(\tau)$ ， $\tau = 1, 2, \dots$ ，极差序列为 $R(\tau) = \max_{1 \leq t \leq \tau} X(t, \tau) - \min_{1 \leq t \leq \tau} X(t, \tau)$ ，其中 $X(t, \tau) = \sum_{i=1}^t [x(i) - x_\tau]$ ($1 \leq t \leq \tau$)；标准差序列为 $S(\tau) = \sqrt{\frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} [x(t) - x_\tau]^2}$ ，其中 $x_\tau = \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} x(t)$ ； $R(\tau)$ 与 $S(\tau)$ 存在着一定关系： $R(\tau)/S(\tau) = (C\tau)^H$ (C 为常数)， H 即为 Hurst 指数 ($0 < H < 1$)。当 $H = 0.5$ ，表明序列数据是随机的；当 $H > 0.5$ ，表明未来趋势与过去一致， H 越大则持续性越强；当 $H < 0.5$ ，表明未来趋势与过去相反， H 越小则反持续性越强。

3 结果与分析

3.1 径流量年内分配

图 2 为泾河流域张家山站径流量年内分布情况，柱状图为各月径流量，折线图为各月径流量所占全年比率。由图 2 可知：1 月份径流量最小，仅为 $0.11 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，占全年径流量的 0.91%；8 月份径流量最大，为 $2.70 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，占全年径流量的 22.70%，最大值是最小值的 24.5 倍。张家山站全年径流量分配主要集中在汛期 7-10 月，占全年总径流量的近 70%，而非汛期的 8 个月总径流量仅占约 30%。由此可以看出泾河流域径流量年内分配不均，其中流域年内降雨分配主要集中于 7-9 月，径流量分配与降雨量分配有着一定的关系。

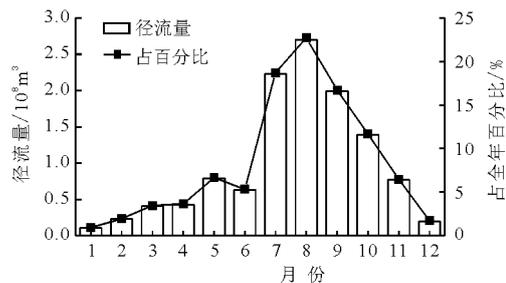


图 2 径流量年内分配

3.2 径流量年际变化特征

为减小偶然因素产生的影响,使变化趋势更加明显^[16],对张家山站 1956 - 2015 年 60 a 的年径流量、汛期径流量和非汛期径流量采用 3、5 a 滑动平均法进行年际径流量分析,结果如图 3 所示。张家山各径流量趋势线和 3 a、5 a 滑动趋势线的变化趋势基本一致,均有明显的波动。对年径流量进行线性拟合,所得回归方程为 $y = -0.208x + 424.526$,趋势线的斜率为负值,表明自 20 世纪 50 年代以来径流量整体呈现出减少的趋势,年径流量大约以 $0.208 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 的速率减少。在该区域 60 a 中,年径流量最大值出现在 1964 年,为 $38.82 \times 10^8 \text{ m}^3$,最小值出现在 1972 年,为 $3.22 \times 10^8 \text{ m}^3$,两者相差 $35.6 \times 10^8 \text{ m}^3$,极值比为 12.1,由此可以看出张家山径流量年际变化较大。对汛期与非汛期径流量采用相同方法进行线性拟合,趋势线斜率均为负值,表明汛期与非汛期的径流量均呈现出减少的趋势,年减少速率分别为 $0.135 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 $0.072 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。其中年径流量最值年份与汛期径流量最值年份基本一致,而非汛期径流量年份并不一致。

图 4 为径流量距平图,由图 4 可知:张家山站年径流量有着明显的波动性,特别是自 20 世纪 60 年代至 21 世纪初之间,丰枯年份交替频繁,在近 10 年径流量较少,距平值均为负值。汛期与非汛期径流量和年径流量波动性有所差别,但相对而言,汛期径流量与年径流量的波动趋势更为相似,而非汛期径流量波动趋势则相对平稳。

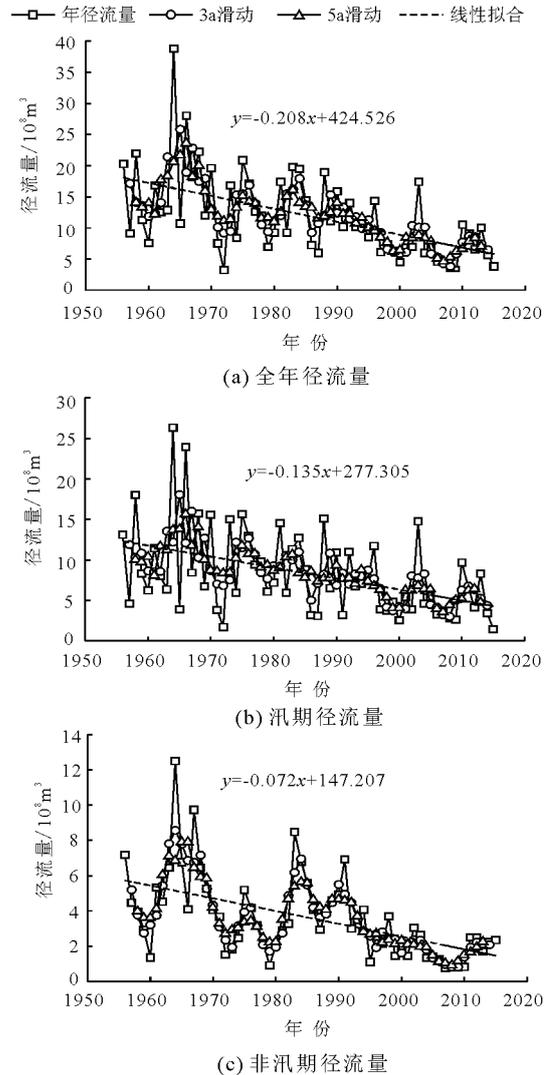


图 3 1956 - 2015 年张家山站径流量年际变化

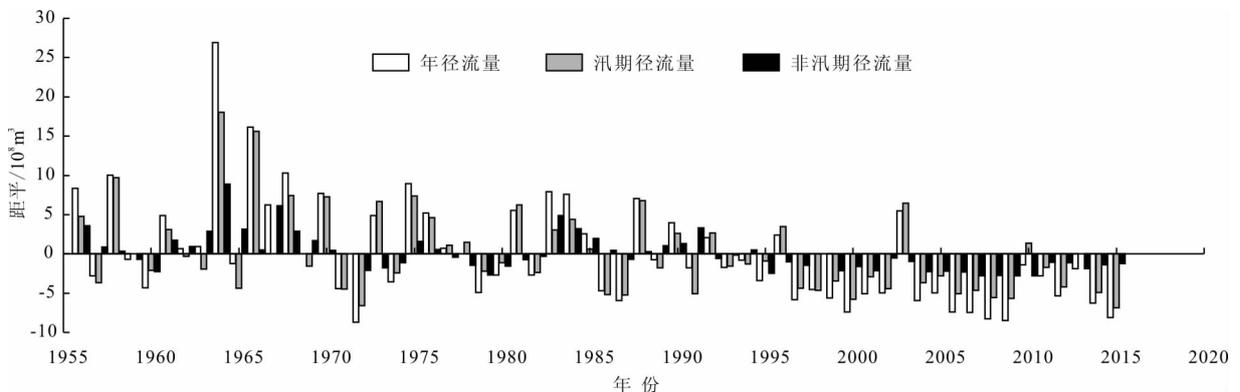


图 4 1956 - 2015 年张家山站径流量距平

采用 Mann - Kendall 趋势检验法对径流量进行趋势显著性分析。通过计算,年径流量、汛期径流量与非汛期径流量的 Z 值分别为 -4.86 、 -3.67 、 -4.71 ,通过 $\alpha = 0.05$ 的显著性检验,表明径流量均呈现减少趋势,且趋势显著。

3.3 径流量年代变化特征

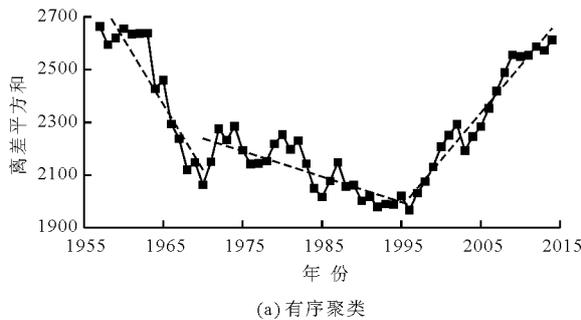
图 5 为张家山站径流量年代变化图。按不同年代对张家山站径流量进行划分,从图 5 中可以看出:除 1950s 与 2010s 外,其余年代均值均大于其中位数,即 C_s 值大于 0,说明年代径流量大多集中在小

于均值的部分。该站各年代径流量整体变化呈现高低交替的现象,其中减少幅度最大的是从20世纪60年代到70年代,径流量减少了 $5.46 \times 10^8 \text{ m}^3$,增加幅度最大的是从20世纪50年代到60年代,增加了 $2.32 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。张家山站多年平均年径流量为 $11.90 \times 10^8 \text{ m}^3$,与平均值相比,在1950s至1980s之间各年代径流量均大于平均值,属于偏丰年代,从1990s开始年代径流量小于多年平均值,其中1960s的径流量最大,达到 $17.96 \times 10^8 \text{ m}^3$,最小值出现在2000s,为 $6.46 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

3.4 径流量突变点分析

在径流量的变化中存在着突变的现象,它表现为较为稳定的径流量变化状态或趋势跳跃式地转变到另一种状态或趋势的形式^[17]。本文采用有序聚类法、滑动 t 检验法进行分析,综合判断出可能的突变点。

张家山水文站径流量序列离差平方和 S_n 曲线如图6(a)所示。从图6(a)中可以看出,曲线有两处极小值点,分别为1970与1996年,可判断这两点可能为径流量突变点。图6(b)为张家山水文站径流量的滑动 t 统计量曲线。选定 $n_1 = n_2 = 5$,显著性水平 $\alpha = 0.05$,通过查表可知 $t_{0.05} = \pm 2.31$ 。



从图6(b)中可以看出,1996与1997年两点超过了0.05显著性水平,说明张家山站1956-2015年径流量的突变年份可能为1996年与1997年。

上述两种方法所得径流量突变点存在一定差异,综合分析可得张家山站在1956-2015年间存在1个径流量突变点,在1996年左右。距平图(图4)显示在1996年之前距平值一般均为正值,1996年之后距平值大多为负值,表明1996年之后径流量减少明显;年代变化图(图5)显示在1990s年代径流量开始小于多年平均值,并且在之后的2000s与2010s年代径流量均小于多年平均值。结合年际与年代变化分析可以发现,在突变点后,径流量出现了明显的减少趋势。

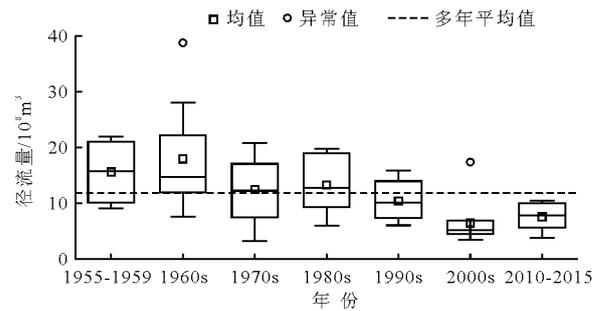


图5 张家山径流量年代变化

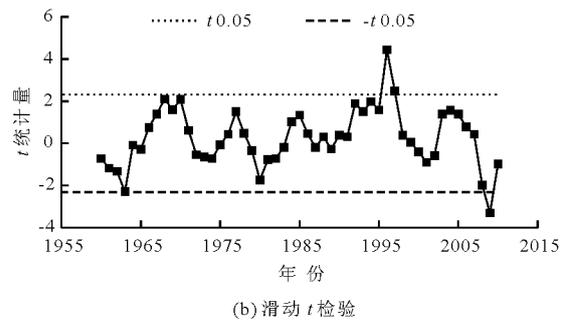


图6 张家山径流量突变分析

3.5 径流量R/S分析

图7为张家山站R/S分析结果图。利用R/S法对泾河流域径流量进行趋势预测,以年径流量序列为例。

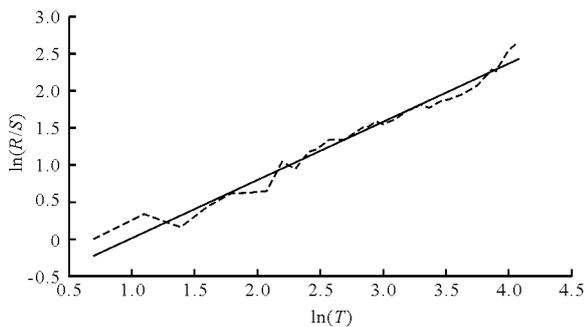


图7 张家山年径流量R/S分析

由图7所示,张家山站年际分析相关系数为0.98,表明其线性关系良好,Hurst效应较为显著。通过计算得到张家山站年径流量、汛期径流量与非汛期径流量Hurst指数分别为0.7837、0.7249、0.7563,3个数值均大于0.5,表明各序列的递减趋势具有一定的持续性,其中年径流量Hurst指数最大,持续性最强。在未来时间内年径流量、汛期径流量与非汛期径流量将会呈现出持续减少趋势。

4 结论

(1) 泾河流域张家山站受降雨影响,年内径流量分布不均匀,主要集中在汛期7-10月。从多年数据来看,汛期径流量占到全年的近70%,其中8

月径流量最大,占全年径流量的22.7%;非汛期径流量约占30%,其中1月径流量最小,占全年径流量的0.91%。

(2)20世纪50年代以来,泾河流域张家山站年径流量、汛期径流量和非汛期径流量均呈现显著减少趋势,其中多年平均径流量为 $11.90 \times 10^8 \text{ m}^3$,年径流量减少速率为 $0.208 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。汛期径流量与非汛期径流量波动性与年径流量波动性有所差异,但相对而言,汛期径流量与年径流量的相似程度更高,非汛期径流量波动趋势则相对平稳。3个时间序列径流量Hurst指数均大于0.5,即各序列的递减趋势具有一定的持续性,且年径流量持续性最强,预测在未来一段时间内年径流量、汛期径流量与非汛期径流量将会呈现出持续减少趋势。

(3)张家山站年代径流量大多集中在小于年代均值的部分,各年代径流量增减交替,在1950s至1980s之间的年代平均径流量均大于多年径流量平均值,从1990s开始小于多年平均值,在近5年有所增加,其中最大年代均值在1960s,最小值在2000s,流域突变点在1996年左右,突变后径流量呈现明显减少的趋势。

泾河流域径流量减少,对沿岸地区的各个方面产生不同程度的影响。大坝修建、引水工程等人类活动在客观上减少了径流量,环境变化也对径流产生着影响。后续研究将在本文基础上深入分析径流变化的影响因素。

参考文献:

- [1] SHAO Quanxi, LI Zhangling, XU Zongxue. Trend detection in hydrological time series by segment regression with application to Shiyang River Basin[J]. Stochastic Environmental Research And Risk Assessment, 2010,24(2):221-233.
- [2] 王国庆,王兴泽,张建云,等. 中国东北地区典型流域水文变化特性及其对气候变化的响应[J]. 地理科学, 2011,31(6):641-646.
- [3] MU Xingmin, LI Ying, GAO Peng. The runoff declining process and water quality in songhuajiang river catchment, China under global climatic change[J]. Clean - Soil Air Water, 2012,40(4):394-401.
- [4] 何艳虎,陈晓宏,林凯荣,等. 东江流域近50年径流系数时空变化特征[J]. 地理研究, 2014,33(6):1049-1058.
- [5] ZHAO Xuehua, CHEN Xu, HUANG Qiang. Trend and long-range correlation characteristics analysis of runoff in upper Fenhe River Basin[J]. Water Resources, 2017,44(1):31-42.
- [6] 王青,刘招,陶望雄. 基于洛伦兹曲线的泾河张家山站径流及降雨分布不均匀性分析[J]. 水资源与水工程学报, 2016,27(1):119-122+127.
- [7] 陈晨,罗军刚,解建仓,等. 泾河流域近80a径流变化趋势及特征分析[J]. 人民黄河, 2013,35(1):26-28+38.
- [8] 郭巧玲,杨云松,畅祥生,等. 1957-2008年黑河流域径流年内分配变化[J]. 地理科学进展, 2011,30(5):550-556.
- [9] 李二辉,穆兴民,赵广举,等. 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.
- [10] 陈忠升,陈亚宁,徐长春,等. 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.
- [11] 刘伟,何俊仕,陈杨. 浑河流域降水与径流变化特征及同步性分析[J]. 水土保持研究, 2016,23(1):150-154.
- [12] 肖洁,罗军刚,解建仓,等. 渭河干流径流年际及年内变化趋势分析[J]. 人民黄河, 2012,34(11):32-36.
- [13] 严栋飞,解建仓,姜仁贵,等. 汉江上游径流变化趋势及特征分析[J]. 水资源与水工程学报, 2016,27(6):13-19.
- [14] 潘国营,秦永泰,马亚芬,等. 基于R/S和Morlet小波分析的丹河径流变化特征研究[J]. 水资源与水工程学报, 2015,26(3):41-45+50.
- [15] 徐宗学,李占玲,史晓崑. 石羊河流域主要气象要素及径流变化趋势分析[J]. 资源科学, 2007,29(5):121-128.
- [16] 郭彦,侯素珍,林秀芝. 近51年西柳沟流域水沙变化特征分析[J]. 干旱区资源与环境, 2014,28(10):176-183.
- [17] LING Hongbo, ZHANG Qingqing, SHI Wei, et al. Runoff variation law and its response to climate change in the headstream area of the Keriya River basin, Xinjiang[J]. Journal of Earth Science, 2011,22(6):780-791.