

DOI:10.16198/j.cnki.1009-640X.2016.03.008

李斌, 解建仓, 胡彦华, 等. 渭河中下游年径流量变化趋势及突变分析[J]. 水利水运工程学报, 2016(3): 61-69. (LI Bin, XIE Jian-cang, HU Yan-hua, et al. Analysis of variation and abruptness of annual runoff in middle and lower Weihe River[J]. Hydro-Science and Engineering, 2016(3): 61-69.)

# 渭河中下游年径流量变化趋势及突变分析

李斌<sup>1,2</sup>, 解建仓<sup>1</sup>, 胡彦华<sup>2</sup>, 姜仁贵<sup>1</sup>

(1. 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048; 2. 陕西省水利厅, 陕西 西安 710004)

**摘要:** 以渭河中下游林家村、咸阳、临潼和华县等4个典型水文站资料为例,采用滑动平均法、累积距平和线性倾向估计法分析年径流量变化趋势;采用滑动 $t$ 检验,有序聚类法和Mann-Kendall法分析年径流量的突变情况。结果表明:20世纪70年代以来,渭河流域径流量呈减少趋势,各站年径流量的变化趋势相似,各水文站径流量突变点发生在70年代初和90年代初。不同水文站突变情况存在差异,林家村突变点发生在1970年和1990年,咸阳站在1970年和1990—1992年之间,临潼站在1968年和1990—1994年之间,华县站在1968年和1990年。渭河流域径流量变化是气候变化和人类活动共同作用的结果,前者主要表现为降水和潜在蒸发量的变化,后者主要体现在流域内水利工程建设。

**关键词:** 渭河中下游; 径流量; 变化特征; 突变检验

**中图分类号:** TV121

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1009-640X(2016)03-0061-09

近百年来,全球气候发生了显著变化,极端天气、气候事件增多加强。对于中国而言,气候变化对水资源、河川径流等产生了明显影响,国内外学者对此做了大量研究。张建云等<sup>[1-2]</sup>通过研究发现:中国大部分江河年内径流分配十分不均匀,我国六大江河的实测年径流量总体上呈下降趋势,北方河流尤其显著;秦年秀等<sup>[3-5]</sup>通过研究发现长江上游、中游径流减少,下游地区径流增加;李二辉等<sup>[6]</sup>通过研究得出黄河中上游径流量和下游径流量均呈现出减少趋势;周园园等<sup>[7-8]</sup>采用多种方法分析黄河流域的无定河、窟野河的径流变化,得出无定河、窟野河径流量呈持续减少趋势;禹朴家等<sup>[9-10]</sup>通过研究发现阿克苏河、闽江等径流量呈现上升趋势。

作为黄河最大支流,受气候变化和人类活动影响,渭河流域水资源情势发生变化,尤其是针对径流变化趋势诸多学者已经开展相关研究<sup>[11-13]</sup>。然而,当前研究所采用的径流序列相对较短,考虑到近年来环境变化的影响,有必要开展长序列径流量变化研究。本文以渭河流域干流4个典型水文站为研究对象,采用趋势分析、突变检测等方法,分析渭河年径流量变化趋势,探讨径流变化与影响因素之间的联系,可为合理开发利用渭河流域水资源,促进流域经济社会可持续发展提供参考。

## 1 研究区概况

渭河全长818 km,流域总面积13.48万km<sup>2</sup>,发源于甘肃省渭源县鸟鼠山,由西向东横贯甘肃东部,在陕西省宝鸡县凤阁岭乡附近进入陕西境内。渭河流域及典型水文站地理位置如图(1)所示。

收稿日期: 2015-06-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51509201,51479160,41471451);陕西省教育厅科研计划资助项目(15JK1503)

作者简介: 李斌(1980—),男,陕西西安人,高级工程师,博士研究生,主要从事水利信息化研究。

E-mail: 157506520@qq.com

## 2 数据及分析方法

### 2.1 资料选取

综合考虑水文站点在流域内的代表性以及资料的可靠性与完整性,本文选取渭河干流上的林家村、咸阳、临潼、华县4个典型水文站,进行径流变化趋势分析,径流时间序列截至2010年。径流数据来源于《陕西省渭河流域防汛技术手册》及历年陕西省水资源公报,水文年鉴等资料。

### 2.2 分析方法

国内外水文气象变化趋势分析采用的主要方法包括:线性倾向估计、累积距平、滑动平均、二次平滑、三次平滑、三次样条函数等。突变检测方法主要有:滑动 $t$ 检验法、克拉默(Cramer)法、山本(Yamatoto)法、有序聚类法、曼-肯德尔(Mann-Kendall)法、佩蒂特(Pettitt)法、勒帕热(Le Page)法、BG(Bernaola-Galvan)分割算法等。考虑到径流序列特点,本文采用滑动平均法、累积距平、线性倾向估计法分析各水文站的年径流量变化趋势;采用滑动 $t$ 检验,有序聚类,Mann-Kendall法进行趋势突变分析。

## 3 结果与分析

### 3.1 径流量年代变化特征

按不同年代分别计算渭河流域4个典型水文站径流量变化特征,结果见表1。由表1可知:20世纪50年代以来,林家村的年径流量先增后减,70年代后逐年减少。特别是90年代以来径流量明显减少,和60年代相比,减少幅度为80%。与多年平均年径流量相比,80年代之前均大于平均值,从90年代开始急剧下降。咸阳站也呈相同的变化趋势,70年代径流量急剧减少,低于多年平均值,80年代略高于多年平均值,90年代以来又开始下降,约为多年平均值的一半。临潼站和华县站年代平均径流量的变化趋势相近。

表1 各水文站平均径流量年代变化趋势

时间	林家村	咸阳	临潼	华县	时间	林家村	咸阳	临潼	华县
1950年前	23.55	60.15		95.38	1981—1990年	17.94	46.74	79.04	82.53
1951—1960年	19.08	52.88		83.09	1991—2000年	6.52	19.19	39.95	39.51
1961—1970年	33.03	64.69	97.09	100.13	2001—2010年	5.90	24.63	50.62	47.50
1971—1980年	15.12	34.16	56.77	55.61	多年平均	12.27	44.00	64.69	73.85

### 3.2 年径流量累积距平分析

渭河流域典型水文站年径流量累积距平曲线如图2。由图可见:20世纪60年代前,各站的年径流量有增加趋势;70年代初至80年代中期,年径流量波动变化;80年代中期至目前,各站年径流量呈现减少趋势;特别是90年代初以来,各站径流量减少趋势明显。各水文站明显存在2个拐点,3个不同的变化阶段,即增加-波动-减小的变化。

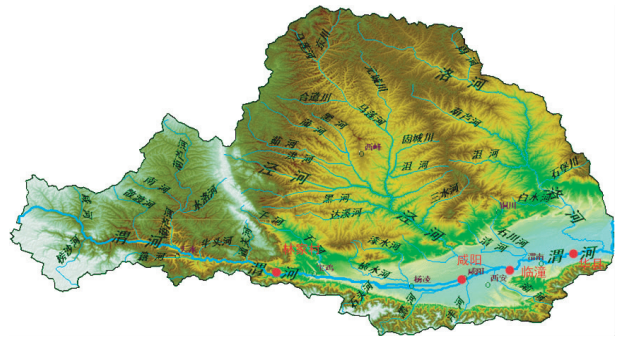


图1 研究区域及水文站点分布

Fig. 1 Study area and location of hydrological stations

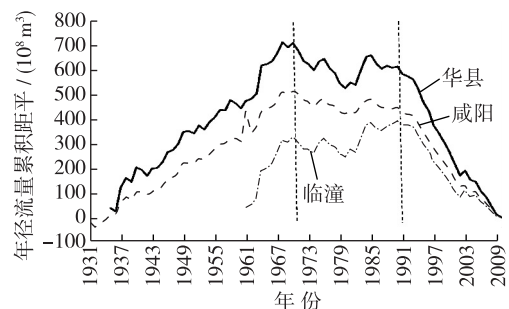


图2 年径流量累积距平曲线

Fig. 2 Cumulative departure curves of annual runoff of three stations

### 3.3 径流时序的年际变化

**3.3.1 林家村站年径流量的变化特征及趋势** 林家村站年径流量变化趋势见图 3(a),由图可知:1944—2009 年径流量、5a 滑动过程线和线性趋势线均显示 1944—2009 年林家村站径流量呈减少趋势。1944—2009 年,林家村多年平均年径流量为 17.27 亿  $\text{m}^3$ 。径流量的年际变化差异较大,大于和小于平均值年数均为 32 年。年径流量负距平值为  $-16.44 \sim -0.57$ ,正距平值为  $0.02 \sim 31.55$ 。年径流量距平百分率为  $-95.7 \sim 183.6$ ,反映了径流的年际变化差异较大。最大值为平均值的 2.83 倍,最大值为最小值 58.1 倍,说明林家村径流量年际变化幅度大。

林家村站 1944—1969 年径流量均偏丰,1964 年达最大值 48.82 亿  $\text{m}^3$ ,比平均值多 31.54 亿  $\text{m}^3$ 。70 年代初期至 80 年代中期,年径流量和平均值接近。80 年代中期至 21 世纪前 10 年,径流量呈现明显下降趋势;近 30 年期间,除了 1990 年和 1992 年径流量高于平均值外,其余年份径流量均低于平均值。图 3(b)中,林家村年径流量有明显减少的趋势。1944—1970 年,平均年径流量约 25.48 亿  $\text{m}^3$ ;1971—1985 年,平均年径流量约 17.35 亿  $\text{m}^3$ ;1986—2009 年平均年径流量约为 7.95 亿  $\text{m}^3$ 。在逐渐减少的过程中也出现过个别年份径流量较大的情况,如 2003 年。

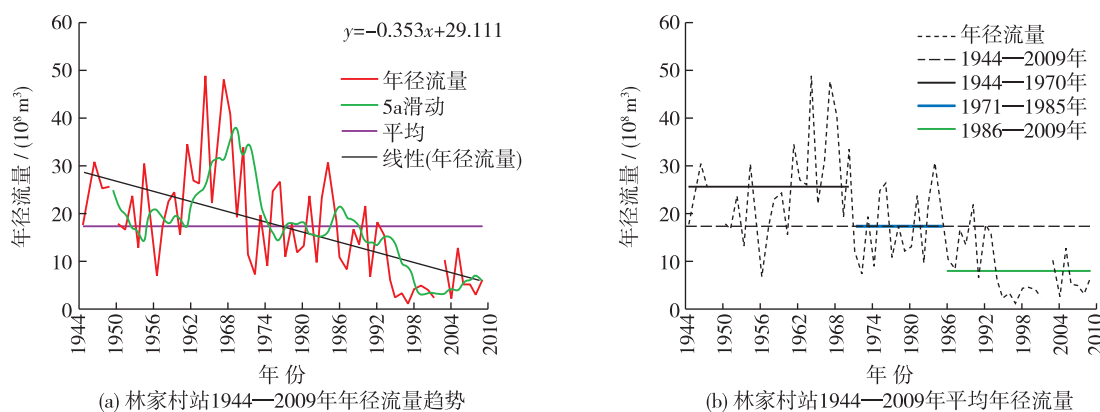


图3 林家村站 1944—2009 年径流量的变化特征及趋势

Fig. 3 Annual variations of mean runoff of Linjiacun station during the period of 1944—2009

**3.3.2 咸阳站径流量的变化特征及趋势** 咸阳站年径流量变化特征及趋势见图 4(a),由图可知:咸阳站径流量呈减少趋势。1931—2010 年,咸阳站多年平均径流量为 44.00 亿  $\text{m}^3$ 。径流量的年际变化差异较大,大于和小于平均值年数分别为 39 年和 41 年。年径流量的负距平值为  $-38.72 \sim -0.50$ ,正距平值为  $0.4 \sim 67.7$ 。年径流量距平百分率为  $-88.0 \sim 153.9$ 。年径流量最大值为平均值的 2.54 倍,最大值为最小值的 21.2 倍。

咸阳站 1931 年至 60 年代末均为径流量偏丰年代,其中 1964 年达 111.7 亿  $\text{m}^3$ ,为最大值,比平均值多 67.7 亿  $\text{m}^3$ 。70 年代初期至 80 年代中期,年径流量略小于平均值。80 年代中期以来,径流量呈明显下降趋势。1986—2010 年,除 1988,2003 和 2005 三年径流量大于平均值外,其余年份均小于平均值。尤其是 1995 年径流量最小,仅为 5.28 亿  $\text{m}^3$ 。咸阳站平均径流量年代变化见图 4(b)。1931—1970 年,年均径流量约为 56.82 亿  $\text{m}^3$ ;1971—1985 年,年均径流量约为 41.68 亿  $\text{m}^3$ ;1986—2010 年,年均径流量约为 24.88 亿  $\text{m}^3$ 。

**3.3.3 临潼站年径流量的变化特征及趋势** 临潼站年径流量变化特征及趋势见图 5(a),由图可知:1961—2010 年,临潼站多年平均年径流量为 64.69 亿  $\text{m}^3$ 。大于和小于平均值的年数均为 30 年。年径流量的负距平值为  $-46.4 \sim -0.26$ ,正距平值为  $5.76 \sim 117.71$ 。年径流量距平百分率为  $-71.9 \sim 172.7$ 。年径流量最大值为平均值的 2.73 倍,最大值为最小值的 9.7 倍。

临潼站 1961 年至 80 年代中期均为径流量偏丰年代,1964 年达最大值 176.4 亿  $\text{m}^3$ ,是多年平均值的 2.7 倍。70 年代初期至 80 年代中期,年径流量略大于平均值。80 年代中期至 2010 年,径流量呈现下降趋势。21 世纪以来,除 2003 和 2005 年径流量大于平均值外,其余年份均小于平均值。尤其是 2001 年径流量为

29.54 亿  $\text{m}^3$ , 不及多年平均值的一半。临潼站平均年径流量年代变化如图 5(b) 所示。1961—1970 年平均年径流量约为 97.09 亿  $\text{m}^3$ ; 1971—1985 年约为 68.5 亿  $\text{m}^3$ ; 1986—2010 年约为 49.45 亿  $\text{m}^3$ 。

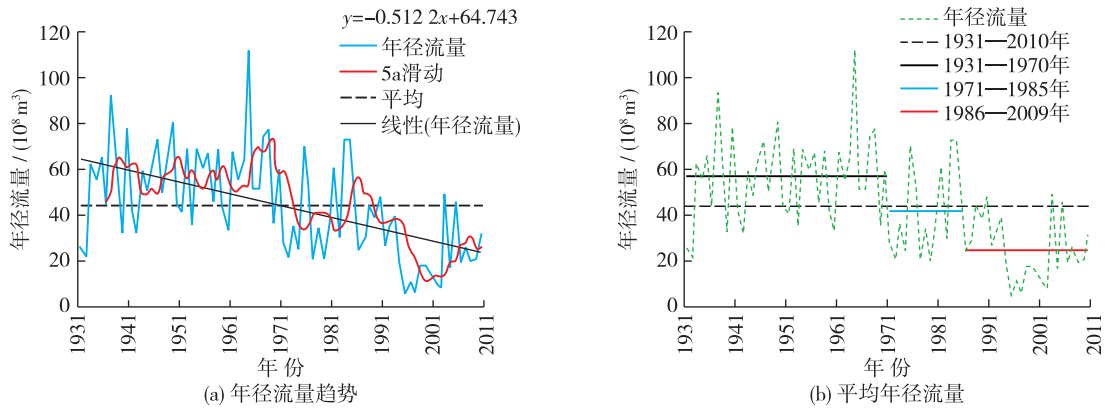


图4 咸阳站 1931—2010 年径流量的变化特征及趋势

Fig. 4 Annual variations of mean runoff of Xianyang station during the period of 1931—2010

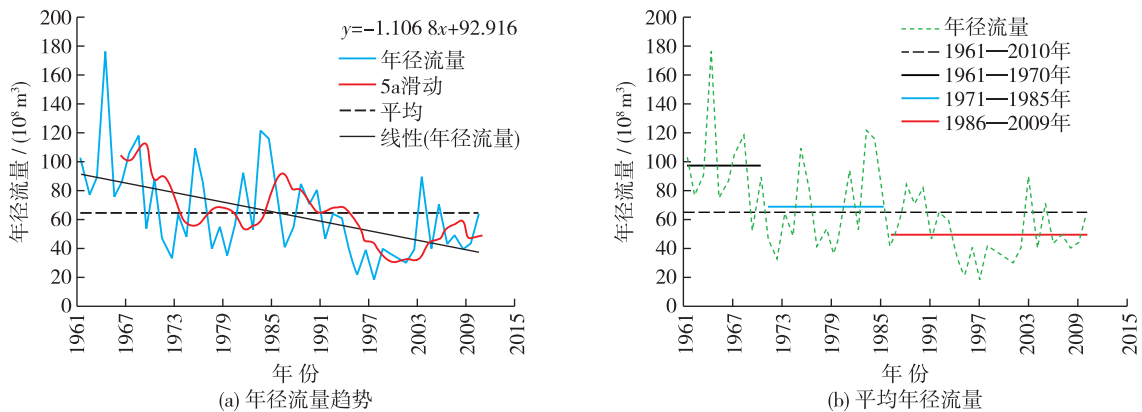


图5 临潼站 1961—2010 年径流量的变化特征及趋势

Fig. 5 Annual variations of mean runoff of Lintong station during the period of 1961—2010

**3.3.4 华县年径流量的变化特征及趋势** 华县站年径流量的变化特征及趋势见图 6(a), 由图可知: 华县站年径流量呈减少趋势。1935—2010 年, 华县站多年平均年径流量为 73.85 亿  $\text{m}^3$ 。70 多年间, 径流量的年际变化差异较大, 大于和小于平均值年数分别为 35 年和 41 年。年径流量的负距平值约  $-57.02 \sim -0.59$ , 正距平值约  $2.62 \sim 113.75$ 。年径流量距平百分率为  $-77.21 \sim 154.02$ 。年径流量最大值出现在 1964 年, 为平均值的 2.54 倍, 为最小值的 11.15 倍。

华县站年径流量 1931 年至 60 年代末均为径流量偏丰年代, 其中 1964 年达 187.6 亿  $\text{m}^3$ , 为最大值, 比平均值多 113.75 亿  $\text{m}^3$ 。70 年代初期至 80 年代中期, 年径流量略小于平均值。80 年代中期至 2010 年, 径流量呈现下降趋势。21 世纪以来, 除了 2003 年径流量为 93.39 亿  $\text{m}^3$  外, 其余年份径流量均低于平均值。华县站径流量年代平均值如 6(b)。1935—1970 年平均年径流量约 73.85 亿  $\text{m}^3$ , 1971—1985 年平均年径流量约 93.37 亿  $\text{m}^3$ , 1986—2010 年平均年径流量约为 70.56 亿  $\text{m}^3$ 。

由图 3~6 可知: 20 世纪 70 年代之前, 各站的年径流量大部分在年平均径流量之上波动; 90 年代之后, 各站的年径流量大部分在多年平均径流量之下波动; 而 70 到 90 年代, 各站年径流量在多年平均值上下波动。因此可大致将径流阶段划分为 1970 年前、1971—1990 年、1991—2010 年。

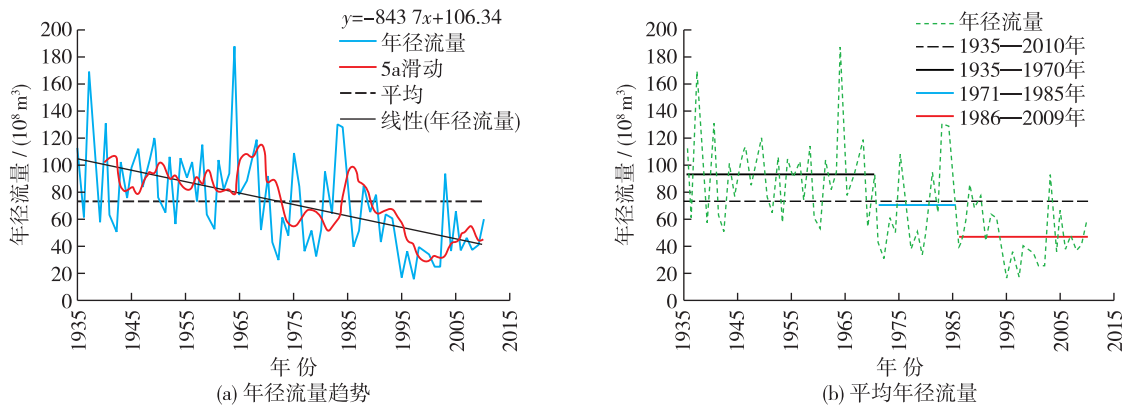


图6 华县站 1935—2010 年径流量的变化特征及趋势

Fig. 6 Annual variations of mean runoff of Huaxian station during the period of 1935—2010

### 3.4 年径流量突变分析

**3.4.1 滑动  $t$  检验** 林家村、咸阳站、临潼站、华县站滑动  $t$  统计量曲线见图 7。由图 7(a) 可知:  $n = 59, n_1 = n_2 = 8$ , 给定显著性水平  $\alpha = 0.01, \alpha = 0.001$ , 按照  $t$  的分布自由度,  $\nu = 14, t_{0.01} = \pm 2.98; t_{0.001} = \pm 4.14$ 。1951 年以来,  $t$  的统计量有 7 次超过 0.01 显著性水平, 有两处极大值, 1970 年和 1993 年。 $t$  的统计量在 1993 年和 1994 年 2 次超过 0.001 显著性水平。说明林家村站年径流量自 20 世纪 50 年代以来, 出现了两次明显的突变。70 年代经历 1 次由增加到减少的转变, 80 年代有所增加; 90 年代年径流量经历了 1 次增加到减少的转变。

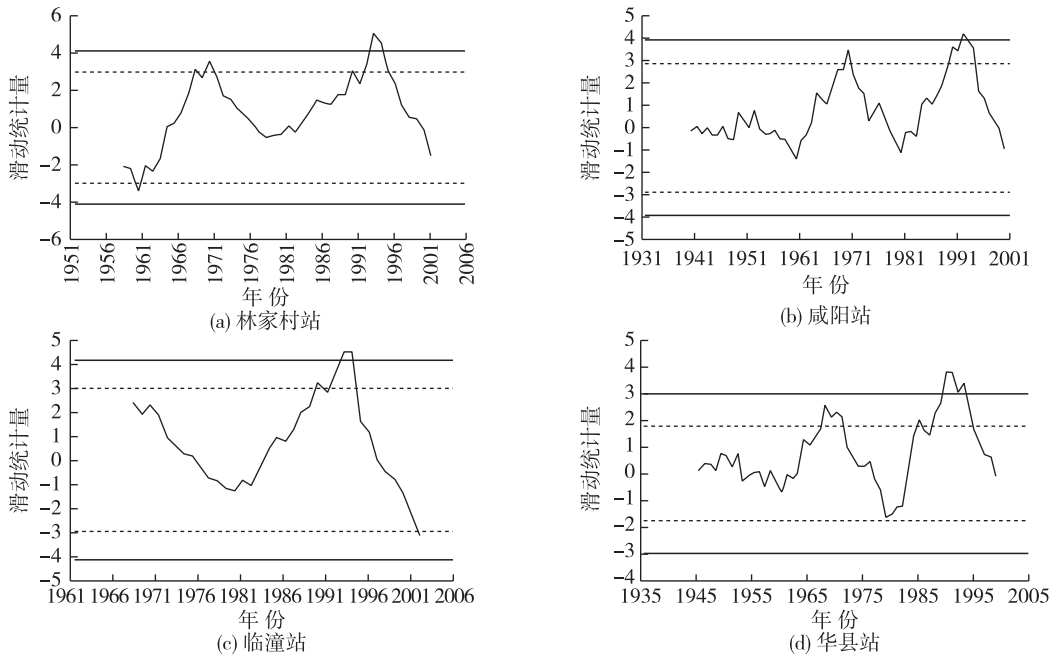


图7 滑动  $t$  统计量曲线

Fig. 7 Sliding  $t$  statistic curves

图 7(b) 为咸阳站滑动  $t$  统计量曲线。由图可知:  $n = 80, n_1 = n_2 = 10$ , 给定显著性水平  $\alpha = 0.01, \alpha = 0.001$ , 按照  $t$  的分布自由度,  $\nu = 18, t_{0.01} = \pm 2.88; t_{0.001} = \pm 3.92$ 。从 1931 年以来,  $t$  的统计量有 6 次超过 0.01 显著性

水平,有两处极大值,1970年和1992年。 $t$ 的统计量在1992年超过0.001显著性水平。表明咸阳站年径流量自20世纪30年代以来,出现了两次明显的突变。30年代至60年代末,年径流量波动中增加;70年代经历了1次由增加到减少的转变,80年代有所增加;90年代年径流量经历1次增加到减少的转变,具体突变点在1992年。

图7(c)为临潼站滑动 $t$ 统计量曲线。由图可知: $n=50, n_1=n_2=8$ ,给定显著性水平 $\alpha=0.01, \alpha=0.001$ ,按照 $t$ 的分布自由度, $\nu=14, t_{0.01}=\pm 2.98, t_{0.001}=\pm 4.14$ 。从1951年以来, $t$ 的统计量有4次超过0.01显著性水平,有3处极大值,对应时间为1990年、1993年、1994年。 $t$ 的统计量在1993,1994年超过0.001显著性水平。表明临潼站年径流量自20世纪50年代以来,出现1次明显的突变。径流量由增加到减少的转变,具体突变点在1993—1994年。

图7(d)为华县站滑动 $t$ 统计量曲线。由图可知: $n=76, n_1=n_2=8$ ,给定显著性水平 $\alpha=0.1, \alpha=0.01$ ,按照 $t$ 的分布自由度, $\nu=14, t_{0.1}=\pm 1.76, t_{0.01}=\pm 2.98$ 。从1951年以来, $t$ 的统计量有4次超过0.1显著性水平,有一处极大值,对应时间为1990年。 $t$ 的统计量在1990—1993年超过0.01显著性水平,但没有通过0.001显著性水平检验。表明华县站年径流量自20世纪30年代以来,出现了2次明显突变。30年代至60年代末,年径流量呈现增加趋势;70年代有所减少,1980年以来有所增加;90年代年径流量经历1次由增加到减少的转变。2个突变点对应的的时间分别为1968年和1990年。

**3.4.2 有序聚类法** 渭河林家村、咸阳、临潼、华县四站的年径流量序列离差平方和 $S_n(\tau)$ 曲线见图8。由图8(a)可知,林家村站1944—2009年的离差平方和 $S_n(\tau)$ 曲线在1970年出现最低,并且在1985年和1990年出现极小值。图8(b)中,咸阳站1931—2010年的离差平方和 $S_n(\tau)$ 曲线在1970年出现最低,并且在1985年和1990年出现极小值。图8(c)中,临潼站1961—2010年的离差平方和 $S_n(\tau)$ 曲线在1968年出现最低,并且在1990年出现极小值。图8(d)中,华县站1935—2010年的离差平方和 $S_n(\tau)$ 曲线在1968年出现最低,并且在1985年和1990年出现极小值。综合分析4个站离差平方和,可得4个站的突变点在1968—1970,1985—1990年。

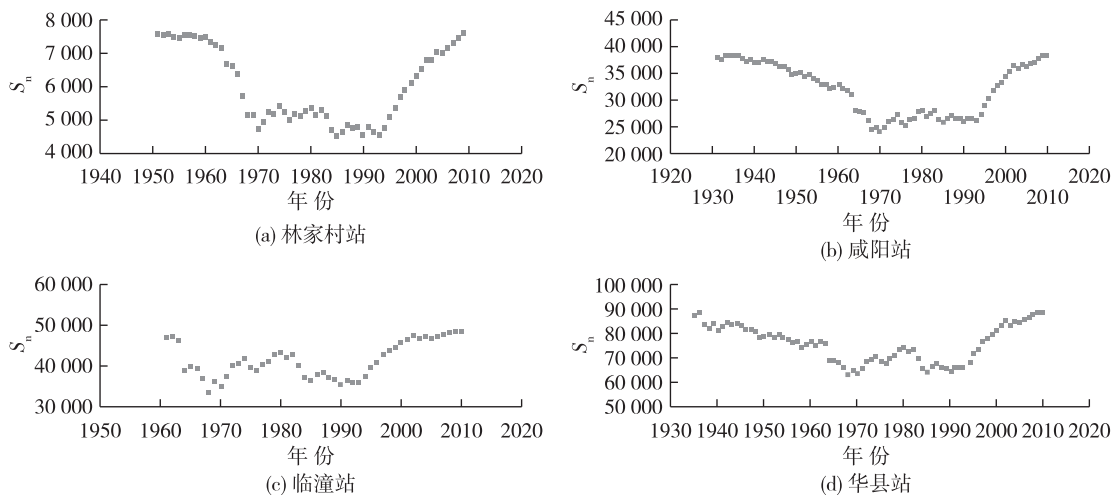


图8 年径流量突变分析结果

Fig. 8 Results of abrupt analysis of annual runoff

**3.4.3 Mann-Kendall 分析结果** 渭河流域4个水文站年径流量的Mann-Kendall统计量曲线如图9所示。图9(a)为林家村站的统计量曲线。20世纪50年代到60年代末,径流量有增加趋势。70年代以来,林家村站的年径流量有明显减少趋势。特别是90年代中期以来,这种减少趋势大大超过了显著性水平0.05的临界线,1995年以后,甚至超过0.01显著性水平,说明林家村站年径流量减少的趋势十分显著。根据UF和

UB 这两条曲线交叉点的位置, 确定该站年径流量减少这一突变现象, 具体从 1990 年开始。图 9(b) 为咸阳站的统计量曲线, 变化趋势与林家村站变化趋势类似, 总体上呈现显著减少趋势, 根据 UF 和 UB 这两条曲线有两个交叉点, 不确定是否发生突变。图 9(c) 为临潼站的统计量曲线。20 世纪 70 年代以来, 径流量呈现波动中下降趋势。90 年代以来, 这种减少趋势超过了显著性水平 0.05 的临界线。70 年代和 80 年代之间, 根据 UF 和 UB 这两条曲线有多个交叉点, 不确定是否发生突变。图 9(d) 为华县站的统计量曲线。20 世纪 30 年代到 60 年中期, 径流量呈现波动变化。60 年代后期, 华县站的年径流量有减少趋势。特别是 1986 年以来, 这种减少趋势大大超过了显著性水平 0.05 的临界线, 1993 年以后, 甚至超过 0.01 显著性水平。这些都表明华县站年径流量减少趋势十分明显。在 70 年代后期和 80 年代中期, 两条曲线有多个交叉点。根据 UF 和 UB 这两条曲线有多个交叉点, 不确定是否发生突变。

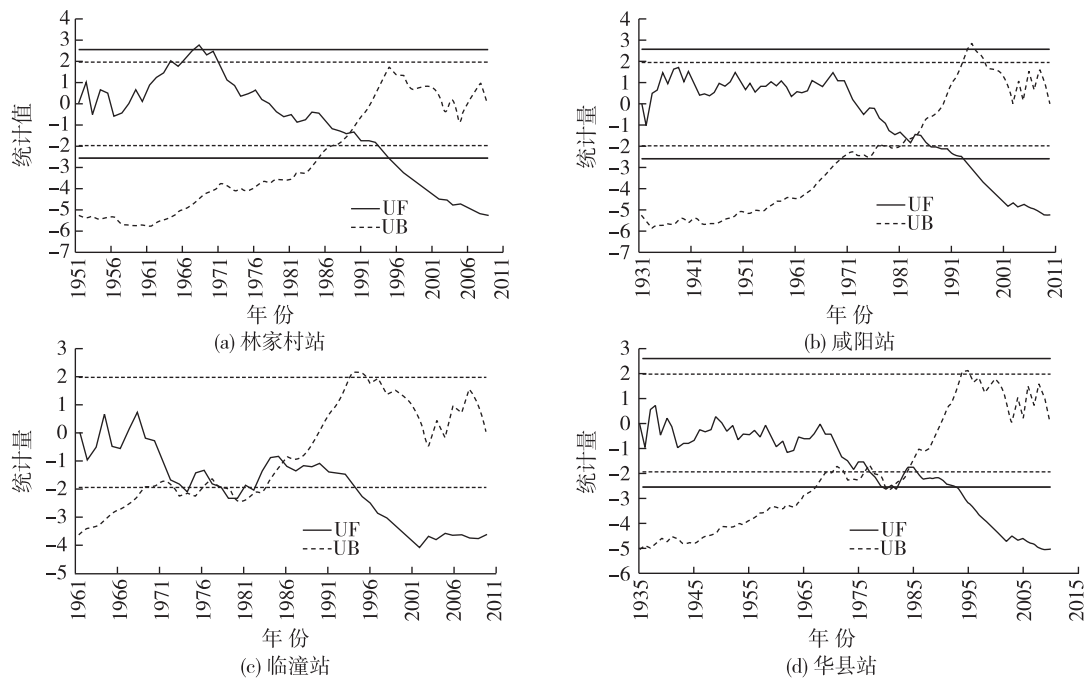


图 9 年径流量 Mann-Kendall 统计量曲线

Fig. 9 Mann-Kendall statistic curves of annual runoff

### 3.5 径流量变化综合分析成因

综合上述结果可知渭河流域各水文站径流量突变点发生在 20 世纪 70 年代初和 90 年代初, 其中, 林家村站的突变点为 1970 年和 1990 年; 咸阳站的突变点为 1970 年和 1990—1992 年之间; 临潼站的突变点为 1968 年和 1990—1994 年之间; 华县站的突变点为 1968 年和 1990 年。渭河流域径流变化主要由气候变化和人类活动引起。60—70 年代, 渭河流域年降水量偏多; 而 1990—2000 年以后降水量锐减, 径流量锐减更甚。渭河降水量最多发生在 60 年代, 最少的是 90 年代。90 年代以来降水量急剧下降且变化明显, 这与径流变化的趋势吻合。

20 世纪 60—70 年代, 渭河流域多处水利工程相继建设并投入使用。宝鸡峡引渭灌区 1971 年运行以来, 农业生产条件得到极大改善, 灌区粮食产量占全省粮食总产的 1/8; 交口抽渭灌区位于渭河下游分两期建成, 1960 年至 1966 年建成一期工程, 1966—1970 年建成二期扩大工程; 石头河水库位于渭河右岸支流石头河, 是一座具有灌溉、城镇供水、发电的大 II 型水利工程, 于 1969 年开工建设; 冯家山水库 1970 年开建, 1974 年主体工程建成; 羊毛湾水库 1958 年动工建设, 1970 年建成。这些水利工程为社会经济发展提供了重要支撑, 另一方面也影响着河道径流变化。20 世纪 90 年代以来随着城市化进程不断加快、工业化的迅猛发展导致对水资源需求也迅猛增加。国民经济的迅速发展必然引起耗水量的增加。流域内黑河金盆水库、石

头河水库、冯家山水库等向城市供水量的增加影响河道径流。城镇化进程的加快、道路硬化等改变了流域下垫面;流域内水土保持等用水量的增加对于实测径流量也有一定影响。

## 4 结 语

(1) 20世纪70年代以来,渭河流域径流呈减少趋势,尤其20世纪90年代以来,减少趋势显著。渭河流域径流变化是降水和人类活动共同作用的结果。气候变化对径流的影响主要表现为降水减少和潜在蒸散的增加。20世纪60年代以来,渭河流域年均降水呈下降趋势。降雨量减少是造成渭河干流径流量减少的主因。渭河林家村以上1956—1990年和1991—2000年平均降雨量分别为542和459 mm,降雨量明显减少。渭河流域1956—1990年和1991—2000年平均降雨量分别为591和509 mm,两者相比减少14%。降雨量的减少导致渭河入黄水量减少了20.37亿 $m^3$ ,占20世纪90年代实际入黄水量减少量41.78 $m^3$ 的49%。

(2) 人类活动对流域径流的影响主要表现为20世纪70年代以后流域内大规模的水利工程和工农业用水的增加,国民经济发展耗水量的增加,水土保持用水量的增加,城镇化的不断推进需水量的增加以及流域下垫面的改变。截至2000年底,渭河流域共建成大中型及小I型水库302座,饮水工程2631处,提水工程6578处,建设淤地坝4367座。冯家山,石头河,宝鸡峡,金盆水库等水利工程改变了天然径流原有节律,致使渭河径流特征发生了变异,客观上减少了径流量。工程措施和工农业耗水量不断上升,人类活动对渭河径流的影响越来越剧烈,导致径流量不断减少。

(3) 尽管渭河年径流量呈减少趋势,但渭河洪灾频发,洪水特性发生了一些变化,表现在洪水次数减少,发生时间更加集中。21世纪以来,渭河发生了“03.8”,“05.10”,“11.9”等洪水。特别是“03.8”渭河流域连续出现了6次大范围、高强度、长历时的降雨过程,整个降雨过程出现了7个暴雨中心,发生日雨量50 mm以上的暴雨110站次。咸阳、临潼、华县站洪水总量均大于历史最大年份,洪水造成巨大损失。

如何认识不同因素对渭河径流变化的定量影响,需要进一步深入研究。

## 参 考 文 献:

- [1] 张建云,章四龙,王金星,等.近50年来中国六大流域年际径流变化趋势研究[J].水科学进展,2007,18(2):230-234. (ZHANG Jian-yun, ZHANG Si-long, WANG Jin-xing, et al. Study on runoff trends of the six larger basins in China over the past 50 years[J]. Advances in Water Science, 2007, 18(2): 230-234. (in Chinese))
- [2] 王金星,张建云,李岩,等.近50年来中国六大流域径流年内分配变化趋势[J].水科学进展,2008,19(5):656-661. (WANG Jin-xing, ZHANG Jian-yun, LI Yan, et al. Variation trends of runoffs seasonal distribution of the six larger basins in China over the past 50 years[J]. Advances in Water Science, 2008, 19(5): 656-661. (in Chinese))
- [3] 秦年秀,姜彤,许崇育,等.长江流域径流趋势变化及突变分析[J].长江流域资源与环境,2005,14(5):590-594. (QIN Nian-xiu, JIANG Tong, XU Chong-yu, et al. Trend and abrupt analysis of the discharge in the Yangtze basin[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2005, 14(5): 590-594. (in Chinese))
- [4] 李林,王振宇,秦宁生,等.长江上游径流量变化及其与影响因子关系分析[J].自然资源学报,2004,19(6):694-670. (LI Lin, WANG Zhen-yu, QING Ning-sheng, et al. Analysis of the relationship between runoff amount and its impacting factor in the upper Yangtze River[J]. Journal of Natural Resources, 2004, 19(6): 694-670. (in Chinese))
- [5] 赵军凯,李九发,戴志军,等.长江宜昌站径流变化过程分析[J].资源科学,2012,34(12):2306-2315. (ZHAO Jun-kai, LI Jiu-fa, DAI Zhi-jun, et al. Analysis of runoff variation of Yichang station at Yangtze River[J]. Resources Science, 2012, 34(12): 2306-2315. (in Chinese))
- [6] 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. (LI Er-hui, MU Xing-min, ZHAO Guang-ju, et al. 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))
- [7] 周园园,师长兴,杜俊,等.无定河流域1956—2009年径流量变化及其影响因素[J].自然资源学报,2012,27(5):856-865. (ZHOU Yuan-yuan, SHI Chang-xing, DU Jun, et al. Annual runoff change and influencing factors in the Wuding River



- basin in 1956—2009[J]. *Journal of Natural Resources*, 2012,27(5): 856-865 (in Chinese))
- [8] 刘二佳, 张晓萍, 张建军, 等. 1956—2005年窟野河径流变化及人类活动对径流的影响分析[J]. *自然资源学报*, 2013, 28(7): 1159-1167. (LIU Er-jia, ZHANG Xiao-ping, ZHANG Jian-jun, et al. Variation of annual runoff and the effect of human activity in the Kuye River during 1956—2005[J]. *Journal of Natural Resources*, 2013,28(7): 1159-1167. (in Chinese))
- [9] 禹朴家, 徐海星, 刘世薇, 等. 阿克苏河年径流变化的非线性特征[J]. *自然资源学报*, 2011, 26(8): 1413-1421. (YU Pu-jia, XU Hai-xing, LIU Shi-wei, et al. The nonlinear characteristics of annual runoff change in Aksu River[J]. *Journal of Natural Resources*, 2011, 26(8): 1413-1421. (in Chinese))
- [10] 陈莹, 陈兴伟, 尹义星, 等. 1960—2006年闽江流域径流演变特征[J]. *自然资源学报*, 2011, 26(8): 1401-1411. (CHEN Ying, CHEN Xing-wei, YIN Yi-xing, et al. Characteristics of runoff changes in the Minjiang River basin from 1960 to 2006[J]. *Journal of Natural Resources*, 2011, 26(8): 1401-1411. (in Chinese))
- [11] 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. (XIAO Jie, LUO Jun-gang, XIE Jian-cang, et al. Analysis of interannual and annual variation trend of runoff in the main stream of Weihe River[J]. *Yellow River*, 2012, 34(11): 32-36. (in Chinese))
- [12] 魏红义, 李靖, 王江, 等. 渭河流域径流变化趋势及其影响因素分析[J]. *水土保持通报*, 2008, 28(1): 76-80. (WEI Hong-yi, LI Jing, WANG Jiang, et al. Analysis of runoff trend and influence factors in Weihe River basin[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2008, 28(1): 76-80. (in Chinese))
- [13] 毕彩霞, 穆兴民, 赵广举, 等. 渭河流域气候变化与人类活动对径流的影响[J]. *中国水土保持科学*, 2013, 11(2): 34-38. (BI Cai-xia, MU Xing-min, ZHAO Guang-ju, et al. Effects of climate change and human activity on runoff in the Wei River basin [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2013, 11(2): 34-38. (in Chinese))

## Analysis of variation and abruptness of annual runoff in middle and lower Weihe River

LI Bin<sup>1,2</sup>, XIE Jian-cang<sup>1</sup>, HU Yan-hua<sup>2</sup>, JIANG Ren-gui<sup>1</sup>

(1. Faculty of Water Resources and Hydroelectric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Shaanxi Provincial Department of Water Resources, Xi'an 710004, China)

**Abstract:** This study analyzed the variation and abruptness of runoff in the middle and lower reaches of the Weihe River, which can provide a reference for the reasonable development and utilization of water resources and promote the sustainable economic and social development. Taking four hydrological stations including Linjiacun, Xianyang, Lintong, Huaxian in the middle and lower reaches of Weihe River as an example, a moving average method, accumulative anomaly and the linear trend analysis were used to investigate the variation in the annual runoff, and the sliding *t*-test, a sequential clustering method and Mann Kendall method were applied to study the abruptness of the annual runoff. The analysis results show that the annual runoff of the Weihe River basin has decreased since the seventies of the last century, and different hydrological stations have similar changing patterns of the annual runoff. The abruptness of runoff of all hydrological stations were detected in the early 70's and early 90's of the last century. Different hydrologic stations had different abrupt points of the runoff. The abrupt points of the runoff for Linjiacun hydrological station happened in 1970 and 1990, those for Xianyang hydrological station in 1970 and during 1990—1992, for Lintong hydrological station in 1968 and during 1990—1994, and for Huaxian hydrological station in 1968 and 1990. The research results reveal that the variation in annual runoff in the Weihe River was caused by both climate change and human activities. The impacts given by the climate change mainly resulted in variations of precipitation and potential evaporation in the Weihe River basin, and the impacts of human activities mainly resulted in the construction and completion of the water projects.

**Key words:** middle and lower Weihe River; runoff; variation analysis; abruptness tests