

汉江上游径流变化趋势及特征分析

严栋飞¹, 解建仓¹, 姜仁贵¹, 吴昊², 李杨¹

(1. 西安理工大学 陕西省西北旱区生态水利工程重点实验室, 陕西 西安 710048;

2. 陕西省水利水电工程咨询中心, 陕西 西安 710048)

摘要: 南水北调中线工程从汉江中上游的丹江口水库引水, 作为调水工程水源区, 研究汉江上游的径流变化趋势及特征具有重要意义。采用累积距平法和 Mann-Kendall 趋势分析法分析典型测站的长系列年径流量变化趋势, 采用滑动 t 检验和有序聚类法分析年径流量突变情况。以汉江上游典型水文站武侯站、洋县站、汉中和石泉站为例。结果表明: 20 世纪 50 年代以来, 汉江上游径流量总体呈减少趋势, 尤其在 20 世纪 90 年代以后减少趋势显著。各站年径流量的变化趋势相似, 年代平均径流量存在高低交替的现象。突变分析表明 4 个水文站径流的突变年份均为 1990 年。汉江上游径流量减少主要受降水量的减少、社会经济用水的增加及水资源开发利用等方面的影响。

关键词: 径流; 变化特征; 突变检验; 汉江上游; 南水北调

中图分类号: TV121; P333

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2016)06-0013-07

Trends and characteristics of runoff for upper Hanjiang River

YAN Dongfei¹, XIE Jiancang¹, JIANG Rengui¹, WU Hao², LI Yang¹

(1. State Key Laboratory of Eco-hydrologic Engineering in Northwest in the Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Shaanxi Water Conservancy and Hydropower Engineering Consulting Center, Xi'an 710048, China)

Abstract: The middle route of the South to North Water Transfer Project is originated from Danjiangkou reservoir in the middle and upper reaches of the Hanjiang River. As the water source area of water diversion project, it is of great significance to study the trends and characteristics of runoff in the upper reaches of the Hanjiang River. The trends and variations of annual runoff for typical stations were analyzed using the cumulative anomaly and Mann Kendall methods, and Sliding t test and sequential clustering were used to analyze the change of annual runoff. Taking four hydrological stations including Wuhou, Yangxian, Shiquan, Hanzhong in the upper reaches of Hanjiang River as examples, the results showed that the runoff amount in the upper reaches of Hanjiang River showed a trend of decreasing since 1950s, the decreasing trend was significant especially after 1990s. The changing trend of annual runoff in each station was similar, and the average runoff has the phenomenon of alternating high or low. The abrupt analysis showed that the abrupt points of the runoff for the four stations are all in 1990. The decrease of runoff in the upper reaches of the Hanjiang River was mainly affected by the decrease of precipitation and the increase of water using in social economy.

Key words: runoff; variation characteristics; abrupt tests; upper reaches of Hanjiang River; South to North Water Transfer Project

1 研究背景

近百年来, 全球气候发生了显著变化, 极端气候事件频发广发, 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^[1]。汉江是长江最大的一级支流^[2], 发源于陕西省宁强县的蟠冢山, 也是陕西省陕南地区最大河流, 由西向东横贯秦岭、大巴山之间, 流经汉中市辖的勉县、汉中、城固、洋县以

收稿日期: 2016-06-13; 修回日期: 2016-08-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(51509201/51679188); 国家重点研发计划项目(2016YFC0401409); 中国博士后科学基金资助项目(2016M590964); 陕西省高校科协青年人才托举计划项目(20160217)

作者简介: 严栋飞(1990-), 男, 陕西渭南人, 博士研究生, 主要研究方向为水文学及水资源。

通讯作者: 姜仁贵(1985-), 男, 江西玉山人, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为工程管理信息化。

及安康市的石泉、紫阳、安康、旬阳、白河等县城于白河县流入湖北省境内,在汉口注入长江,全长1577km,干流在陕西省境内长709km,占汉江干流全河段长的45%,陕西省内流域面积为59 110 km²,占汉江全流域面积的37.1%,多年平均径流量为264 × 10⁸ m³,出陕西境年径流约302 × 10⁸ m³,河床平均比降1.76‰,多年平均输沙量约5 400 × 10⁴ t。水源丰富,地表水人均占有量为4 044 m³,亩均占有量2 810 m³,高于全国平均水平。汉江是长江最长的支流,在历史上占据重要地位,南水北调中线工程的水源地就选取在汉江中上游的丹江口水库^[3]。近年来,随着流域经济的高速发展和人口剧增,水资源供需矛盾十分突出,因此研究汉江上游的径流变化趋势对指导流域水资源规划、配置有着重要意义^[4]。

针对径流变化特征,诸多学者已开展相关研究,并取得一定成果。苏雪锐等^[5]通过研究安康站和石泉站1955年至2005年的月平均径流资料发现汉江上游径流量呈现出较为明显的减少趋势,且存在明显周期变化规律。李桃英等^[6]对汉江上游安康水文站1950-2007年的实测径流资料进行研究,发现汉江上游径流在20世纪90年代前呈现增加的趋势,但是在1990年后径流有着显著减少的趋势,2000年后径流减少的趋势有所缓解。陈华等^[7]通过研究汉江流域年径流量的突变点为1991年,春季和冬季汉江大部分子流域径流量呈现显著减少趋势。郭世兴等^[8]采用非参数检验Mann-Kendall法对汉江洋县水文站1956-2008年还原后的年径流量和年输沙量进行了趋势分析和突变分析,得出汉江上游的径流量和输沙量发生趋势显著的减小突变的结论。陈燕飞等^[9]通过分析汉江流域13个水文站逐月降水量和气温观测资料,得出了汉江上游多数站点年降水量减少的结论。

本文以汉江上游4个典型水文站武侯站、洋县站、石泉站和汉中市为研究对象,采用累积距平法和MK趋势分析法对径流趋势进行分析,采用滑动t检验法和有序聚类法研究径流的突变情况,并探讨径流变化与影响因素之间的联系,可为合理开发利用水资源,促进流域经济发展提供参考。

2 数据与方法

2.1 研究区概况

汉江上游流域位于西部平原及青藏高原之间,该区域降水量较为丰沛,但降水量与径流量年际变

化大,同时也存在着降水时空不均的问题。汉江上游年径流量的地区分布和降水量大体一致,汛期径流占年径流的80%左右^[6]。汉江上游地区分属两个气候区^[10],汉江西侧为秦岭山地暖温带温和湿润气候区,年平均降雨量约800~900 mm之间,其余地区为陕南北亚热带湿润气候区,年平均降雨量为914 mm。

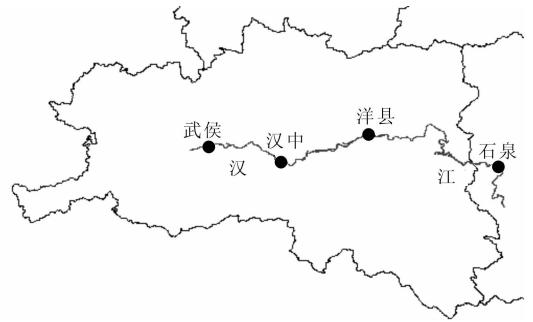


图1 汉江上游水文站分布图

综合考虑现有水文资料的情况下,选取汉江上游武侯站、汉中市、石泉站和洋县站4个水文站进行径流变化趋势分析,其中武侯站的径流序列为1953-2014年,汉中的径流序列为1972-2014年,石泉站的径流序列为1956-2014年,洋县站的径流序列为1967-2014年。

2.2 研究方法

国内外水文气象变化趋势分析采用的主要方法包括^[11]:线性倾向估计法、累积距平法、滑动平均法、二次平滑法、三次平滑法、三次样条函数等。突变检测方法主要有:滑动t检验法、有序聚类法、克拉默(Cramer)法、山本(Yamatoto)法、曼-肯德尔(Mann-Kendall)法等。考虑到已有径流数据的特点,本文选用累积距平法^[12]和MK趋势分析法分析各水文站的年径流量变化趋势;用滑动t检验,有序聚类法对各水文站的径流趋势进行突变分析。

(1)累积距平法。首先计算出径流序列每一年的径流量距平,按照年份顺序进行累计叠加,可得出累积距平序列,即

$$LP_i = \sum_{i=1}^N (R_i - \bar{R}) \quad (1)$$

式中: LP_i 为第 i 年的累积距平值, 10^8 m^3 ; R_i 为第 i 年的径流量, 10^8 m^3 ; \bar{R} 为径流量序列的多年平均值, 10^8 m^3 。

(2)MK趋势分析。Mann-Kendall检验是世界气象组织推荐并已广泛使用的非参数检验方法,该方法的优点是不需要样本遵从一定分布,也不受少

数异常值的干扰,适用于水文、气象等非正态分布的数据^[13]。

在MK趋势分析法中,时间序列数据为 (x_1, \dots, x_n) ,则统计量 z 通过下式计算:

$$z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{if } S > 0 \\ 0 & \text{if } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{if } S < 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k)$,其中 $\text{sgn}(x_j - x_k) = \begin{cases} +1 & \text{if } (x_j - x_k) > 0 \\ 0 & \text{if } (x_j - x_k) = 0, \text{为正常分布,Var}(S) \text{为其方差,均值为} 0. \\ -1 & \text{if } (x_j - x_k) < 0 \end{cases}$

统计量 z 如果为正,说明是增加趋势,反之 z 如果为负,则为减少趋势。如果在给定置信水平 α 的情况下,若 $|z| \geq z_{\alpha/2}$,则认为该趋势显著。

(3) 滑动t检验。滑动t检验主要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。在给定显著性水平的情况下,当子序列的均值差超过了该显著性水平,则认为有突变发生。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, n_1 和 n_2 为两个子序列的样本大小,定义统计量^[14]为:

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{n_1 s_1^2 + n_2 s_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right)}} \quad (3)$$

给定显著性水平 α ,查t分布表得到 t_α ,如果 $|t_i| < t_\alpha$,则认为基准点前后两子序列均值无显著差异,否则认为在基准点时刻出现突变。

(4) 有序聚类。有序聚类法将总体序列当作一个整体进行聚类分析,认为相同类之间的离差平方和最小,不同类之间离差平方和最大,由此求出整体的最优分割点,即突变点,计算方法如下:

设可能的最优分割点为 τ ,则该点将原序列分割成两个序列,其离差平方和分别为:

$$V_\tau = \sum (x_i - \bar{x}_\tau)^2 \quad (4)$$

$$V_{n-\tau} = \sum (x_i - \bar{x}_{n-\tau})^2 \quad (5)$$

其中 \bar{x}_τ 和 $\bar{x}_{n-\tau}$ 分别为 τ 前后两个序列的均值,则总离差平方和 $S_n(\tau)$ 为:

$$S_n(\tau) = V_\tau + V_{n-\tau} \quad (6)$$

当 $S_n(\tau) = \min[S_n(\tau)] (2 \leq \tau \leq n-1)$,认为 τ 为突变点。

3 结果与分析

3.1 径流趋势变化分析

3.1.1 径流量年代变化特征 按不同年代分别计算汉江流域典型水文站径流量变化特征,结果见表1。

由表1可知,武侯站在20世纪60年代的平均径流量为 $12.8 \times 10^8 \text{ m}^3$,高于多年平均水平。70年代降至 $9.61 \times 10^8 \text{ m}^3$,低于多年平均水平。80年代升至 $15.21 \times 10^8 \text{ m}^3$,高于多年平均水平。90年代降至 $7.23 \times 10^8 \text{ m}^3$,低于多年平均水平。21世纪初升至 $9.12 \times 10^8 \text{ m}^3$,低于多年平均水平。汉中站20世纪80年代年平均径流量为 $48.05 \times 10^8 \text{ m}^3$,高于多年平均水平。90年代升至 $24.38 \times 10^8 \text{ m}^3$,低于多年平均水平。21世纪初为 $28.17 \times 10^8 \text{ m}^3$,低于多年平均水平。洋县站20世纪70年代年平均径流量为 $47.29 \times 10^8 \text{ m}^3$,低于多年平均水平。在80年代升至 $78.66 \times 10^8 \text{ m}^3$,高于多年平均水平。90年代降至 $43.73 \times 10^8 \text{ m}^3$,低于多年平均水平。20世纪初降至 $39.14 \times 10^8 \text{ m}^3$,低于多年平均水平。石泉站在20世纪60年代年平均径流量为 $114.5 \times 10^8 \text{ m}^3$,高于多年平均水平。在70年代降至 $83.64 \times 10^8 \text{ m}^3$,低于多年平均水平。在80年代升至 $138.92 \times 10^8 \text{ m}^3$,高于多年平均水平。在90年代降至 $80.35 \times 10^8 \text{ m}^3$,低于多年平均水平。在21世纪初升至 $82.96 \times 10^8 \text{ m}^3$,但仍低于多年平均水平。

表1 1960-2014年不同时段各水文站年平均径流量
 10^8 m^3

时间段	武侯	汉中	洋县	石泉
1960-1969	12.80			114.5
1970-1979	9.61		47.29	83.64
1980-1989	15.21	48.05	78.66	138.92
1990-1999	7.23	24.38	43.73	80.35
2000-2009	9.12	28.17	39.14	82.96
2010-2014	13.74	40.45	64.47	112.14
多年平均	11.32	33.11	53.67	102.06

3.1.2 径流时序的年际变化 武侯站、汉中站、洋县站和石泉站径流量的年际变化如图2所示。

由图2(a)可知:1953-2014年之间,武侯站的年径流量呈减少趋势,年径流量平均值为 $11.32 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。62 a中有26 a的年径流量大于平均值,36 a的年径流量小于平均值。其中1997年的径流量为最小,仅有 $1.746 \times 10^8 \text{ m}^3$,1981年达到最大值 $34.7 \times 10^8 \text{ m}^3$,是1997年的19.87倍。武侯站1953

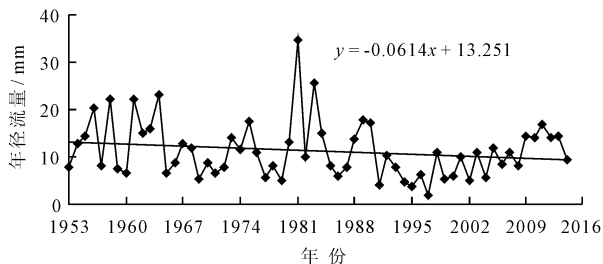
年到1981年为径流量偏丰年代,径流量平均值为 $12.59 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。1982-1990年间,径流量平均值为 $13.49 \times 10^8 \text{ m}^3$,与多年平均值接近。1991-2008年间径流量呈现着较为明显的下降趋势,平均值仅为 $7.32 \times 10^8 \text{ m}^3$,只有2005年的年径流量略高于平均值,其余年份均低于平均值。2009年至2014年径流量呈现略微升高趋势,径流量平均值为 $13.87 \times 10^8 \text{ m}^3$,除去2014年其余年份均高于平均值。

由图2(b)可知,1972-2014年之间,汉中站年平均径流量呈减少趋势,年径流量平均值为 $33.11 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。43 a中有19 a的年径流量大于平均值,24 a的年径流量小于平均值。其中1997年的径流量最小,仅有 $8.63 \times 10^8 \text{ m}^3$,1981年达到最大值 $92.5 \times 10^8 \text{ m}^3$,是1997年的10.72倍。汉中站1972-1990年间为径流量偏丰年代,均值为 $39.43 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。1991-2008年间径流量减少明显,均值为 $24.16 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。2009-2014年间径流量呈略微升高趋势,均值为 $39.94 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

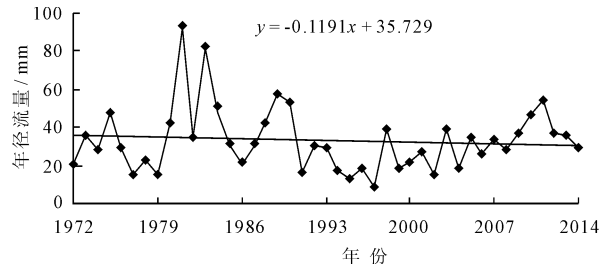
由图2(c)可知,1956-2014年之间,石泉站年平均径流量呈减少趋势,年径流量平均值为

$102.06 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。59 a中有26 a的年径流量大于平均值,33 a的年径流量小于平均值。其中1997年的径流量最小,仅有 $36.3 \times 10^8 \text{ m}^3$,1983年达到最大值 $235 \times 10^8 \text{ m}^3$,是1997年的6.47倍。石泉站1956-1964年之间,径流量平均值为 $125 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。1965-1979年间,径流量平均值为 $87.56 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。1980-1985年间,径流量平均值达到 $158.17 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。1986-2014年间,平均值为 $90.83 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

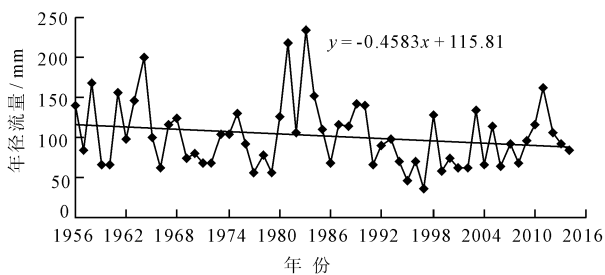
由图2(d)可知,1967-2014年之间,洋县站年平均径流量呈减少趋势,年径流量平均值为 $53.67 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。48 a中有21 a的年径流量大于平均值,27 a的年径流量小于平均值。其中1997年的径流量最小,仅有 $18.37 \times 10^8 \text{ m}^3$,1981年达到最大值 $142 \times 10^8 \text{ m}^3$,是1997年的7.76倍。洋县站1967-1979年间,径流量平均值为 $49.69 \times 10^8 \text{ m}^3$,与多年平均水平接近,略低于平均水平。1980-1990年间,平均值为 $79.63 \times 10^8 \text{ m}^3$,其中1981年径流量达到最大值。1991-2002年间,平均值为 $36.94 \times 10^8 \text{ m}^3$,低于平均水平。2003-2014年间,平均值为 $50.93 \times 10^8 \text{ m}^3$,与多年平均值接近。



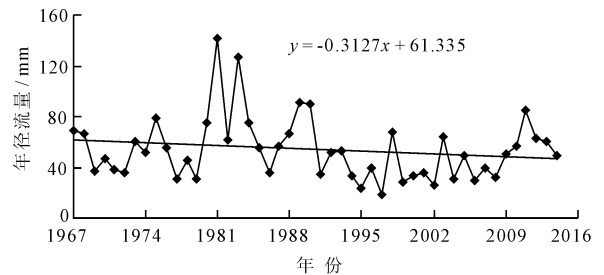
(a) 武侯站



(b) 汉中站



(c) 石泉站



(d) 洋县站

图2 典型测站年径流量

采用Mann-Kendall分析武侯站、汉中站、石泉站和洋县站4个水文站的年径流量的变化趋势, MK检验Z值计算结果分别为-1.0447、0.0209、-1.2425和-1.1554。结果表明:武侯、石泉和洋县均为减少趋势,但是并没有通过显著性水平 $\alpha = 0.05$ 的检验,因此减少趋势并不明显。汉中为增加趋势,但同样未通过显著性水平 $\alpha = 0.05$ 的检验,说明增加趋势不明显。

3.1.3 年径流量累积距平分析 武侯站、洋县站、汉中站和石泉站年径流量累积距平曲线如图3所示。

由图3(a)可知,武侯站1964年以前年径流量有增加的趋势,1964-1979年之间呈减少的趋势,1979-1990年之间处于上升趋势,1990-2008年径流量有着明显的减少趋势,2008-2014年径流量有增加趋势。由图3(b)可知,石泉站径流变化与武侯站相似,1964年之前年径流量有增加的趋势,1964-

1979年之间呈减少的趋势,1979-1990年之间处于上升趋势,1990-2009年径流量减少趋势明显,2009-2014年径流量有增加趋势。由图3(c)可知,1972-1979年间汉中站年径流量有减少的趋势,1979-1990年间径流量有着明显的增加趋势,1990-2008年径流量存在明显的减少趋势,2008-2014

年径流量有略微的增加趋势。由图3(d)可知,洋县站径流变化与汉中站相似,1967-1979年间年径流量有略微的减少的趋势,1979-1990年间径流量存在着明显的增加趋势,1990-2009年径流量存在明显的减少趋势,2009-2014年径流量有略微的增加趋势。

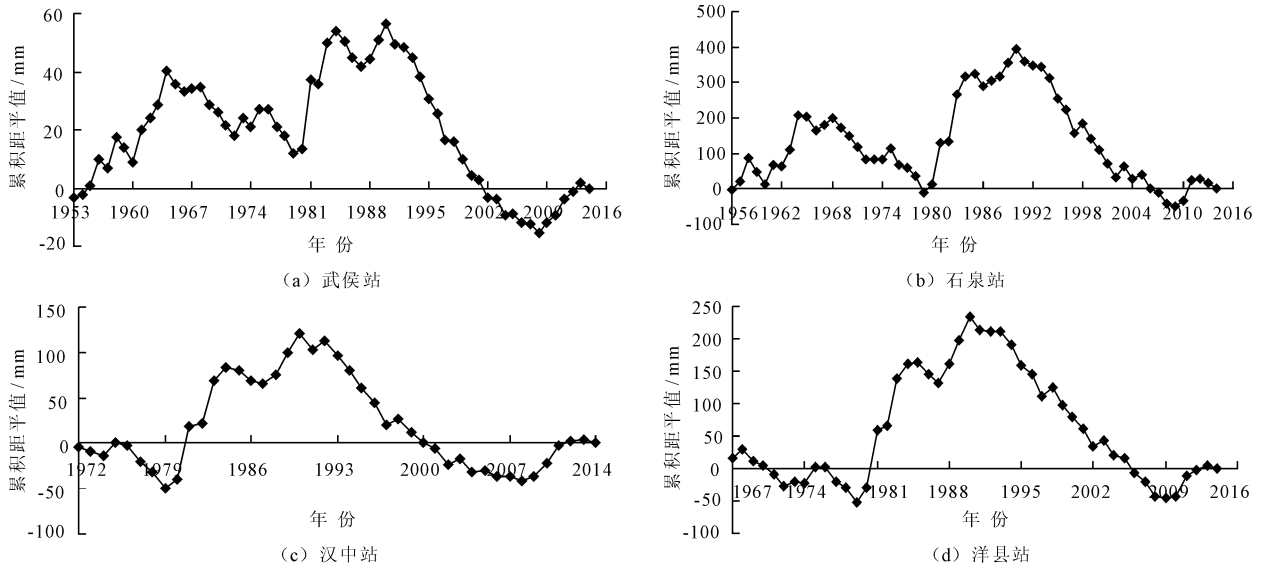


图3 典型测站年径流量累积距平曲线

3.1.4 径流量年内分配变化特征 武侯、洋县、汉中、石泉4个水文站径流量年内分配的变化特征基本相同,7、8、9、10四个月的径流量大,在这四个月中,4个站流量所占全年流量的比例依次为:71.44%、66.98%、70.01%、64.31%。其中9月为全年流量最大的月份,4个站9月份流量所占全年流量的比例依次为21.75%、21.09%、21.93%、19.27%;而1月和2月的径流量极小,4个站在1月和2月的径流量总和占全年流量的比例依次为:1.72%、3.84%、3.31%、3.96%。

3.2 年径流量突变分析

3.2.1 滑动 t 检验结果 武侯站、洋县站、石泉站和汉中站的滑动 t 统计量曲线见图4。对4个水文站皆选定 $n_1 = n_2 = 8$, 显著性水平 $\alpha = 0.01$, 通过查 t 分布表可得 $t_{0.01} = 2.98$ 。武侯站滑动 t 检验结果由图4(a)可知, $n = 62$, 1953年以来, t 的统计量共有4次超过0.01显著水平, 分别是1990年, 2002年, 2003年和2004年, 1990年 t 的统计量为最大值, 说明该年份可能是武侯站1953-2014年径流的突变年份。洋县站滑动 t 检验结果由图4(b)可知, $n = 48$, 1967年以来, t 的统计量共有3次超过0.01显著水平, 分别是1990年, 1991年和1992年, 1990年 t 的统

计量为最大值, 说明该年份可能是洋县站1967-2014年径流的突变年份。石泉站滑动 t 检验结果由图4(c)可知, $n = 59$, 1956年以来, t 的统计量共有4次超过0.01显著水平, 分别是1979年, 1989年, 1990年和1992年, 1990年 t 的统计量为最大值, 说明该年份可能是石泉站1956-2014年径流的突变年份。武侯站滑动 t 检验结果由图4(d)可知, $n = 43$, 1972年以来, t 的统计量共有3次超过0.01显著水平, 分别是1990年, 2002年和2004年。在1990年达到最大值, 说明该年份可能是汉中站1972-2014年径流的突变年份。

3.2.2 有序聚类结果 各个水文站的年径流量序列离差平方和 S_n 曲线见图5所示。由图5(a)可知武侯站1953-2014年的离差平方和 S_n 曲线在1990年出现最低, 在1964年和1984年出现极小值。由图5(b)可知汉中站1972-2014年的离差平方和 S_n 曲线在1990年出现最低, 在1979年和1984年出现极小值。

由图5(c)可知洋县站1967-2014年的离差平方和 S_n 曲线在1990年出现最低, 在1984年出现极小值。由图5(d)可知石泉站1956-2014年的离差平方和 S_n 曲线在1990年出现最低, 在1964年出现极小值。

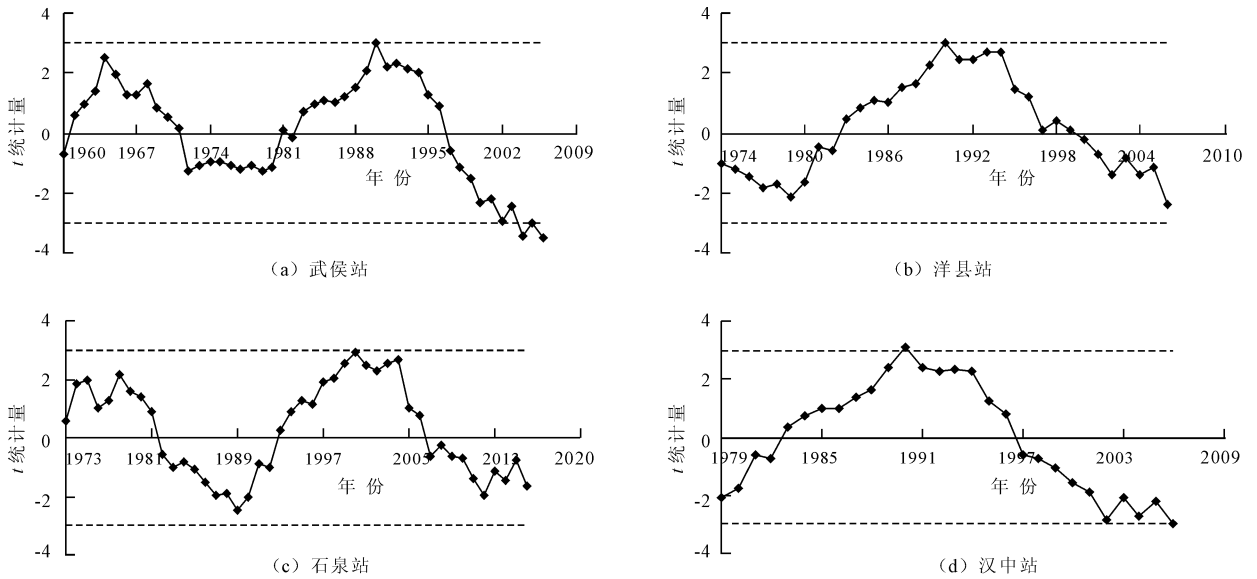
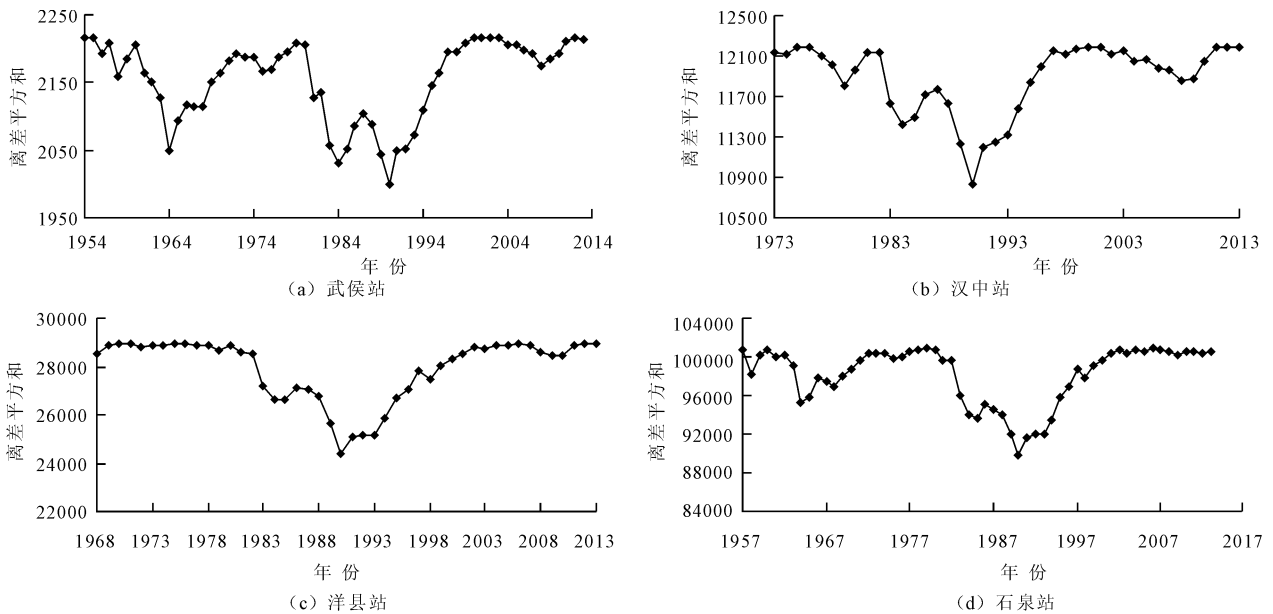
图4 4个水文站滑动 t 检验结果

图5 有序聚类法结果

4 结论

(1) 20世纪50年代以来,汉江上游流域径流量呈现减少的趋势,特别在1990年后,径流量存在着显著的减少趋势。武侯站1953-2014年多年平均径流量为 $11.32 \times 10^8 \text{ m}^3$, 汉中天1972-2014年多年平均径流量为 $33.11 \times 10^8 \text{ m}^3$, 石泉站1956-2014年多年平均径流量平均值为 $102.06 \times 10^8 \text{ m}^3$, 汉中天1972-2014年多年平均径流量为 $33.11 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

(2) 从年代径流量均值上看,从20世纪60年代开始到90年代4个水文站站均存在年代平均径流量高低交替的现象,20世纪60年代武侯站和石

泉站的平均径流量均高于各站多年平均,20世纪70年代武侯站、石泉站和洋县站的平均径流量均低于各站多年平均,20世纪80年代4站的平均径流量均高于各站多年平均,20世纪90年代4站的平均径流量均低于各站多年平均。

(3) 通过滑动 t 检验法和有序聚类法对汉江上游4个水文站的径流序列进行分析,得出4个水文站均存在同一个突变点,突变年份为1990年。

汉江上游径流量减少主要受降水量的减少、社会经济用水的增加水资源开发利用等方面的影响,后续将围绕降雨量变化和人类活动对径流量的影响进行深入研究。

参考文献:

- [1] 李斌,解建仓,胡彦华,等. 基于集对分析法的渭河中下游径流变化特征研究[J]. 水资源与水工程学报,2016,27(1):20-25.
- [2] 周亮,黄春长,周亚利,等. 汉江上游安康东段古洪水事件光释光测年研究[J]. 地质学报,2013,87(11):1703-1714.
- [3] 乔卫芳,牛海鹏,赵同谦. 基于SWAT模型的丹江口水库流域农业非点源污染的时空分布特征[J]. 长江流域资源与环境,2013,22(2):219-225.
- [4] 张珏,王义民,黄强,等. 汉江上游石泉和安康水文站径流规律分析[J]. 水电能源科学,2009,27(1):18-20.
- [5] 苏雪锐,高喜永,郭亚军. 汉江上游径流时空演变规律分析[J]. 水利科技与经济,2010,16(10):1148-1151.
- [6] 李桃英,殷峻暹,张丽丽,等. 汉江上游径流演变趋势及影响因素分析[J]. 人民长江,2011,42(9):19-22.
- [7] 陈华,闫宝伟,郭生练,等. 汉江流域径流时空变化趋势分析[J]. 南水北调与水利科技,2008,6(3):49-53.
- [8] 郭世兴,刘斌,王光社,等. 基于Mann-Kendall法的汉江上游水沙趋势分析[J]. 水电能源科学,2015,33(11):140-142.
- [9] 陈燕飞,张翔. 汉江流域降水、蒸发及径流长期变化趋势及持续性分析[J]. 水电能源科学,2012,30(6):6-8+215.
- [10] 王学琪. 汉江上游地区水文概况[J]. 水文,1988,(6):46-49.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- (上接第12页)
- [4] Xu Wei, Peng Yong, Wang Bende. Evaluation of optimization operation models for cascaded hydropower reservoirs to utilize medium range forecasting inflow[J]. Science China - Technological Sciences. 2013,56(10):2540-2552.
- [5] Tang Guolei, Zhou Huicheng, Li Ningning. Reservoir optimization model incorporating inflow forecasts with various lead times as hydrologic state variables [J]. Journal of Hydroinformatics,2010,12(3):292-302.
- [6] Hamlet A F, Huppert D, Lettenmaier D P. Economic value of long-lead streamflow forecasts for Columbia River hydropower[J]. Journal of Water Resources Planning and Management. 2002,128(2):91-101.
- [7] Safa H H, Morid S, Moghaddasi M. Incorporating economy and long-term inflow forecasting uncertainty into decision-making for agricultural water allocation during droughts [J]. Water Resources Management,2012,26(8):2267-2281.
- [8] Gelati E, Madsen H, Rosbjerg D. Reservoir operation using El Nino forecasts: case study of daule peripa and baba, ecuador[J]. Hydrological Sciences Journal - Journal Des Sciences Hydrologiques,2014,59(8):1559-1581.
- [9] Celeste A B, Billib M. Evaluation of stochastic reservoir operation optimization models[J]. Advances In Water Resources,2009,32(9):1429-1443.
- [10] Guo Xuning, Hu Tiesong, Zhang Tao, et al. Bilevel model for multi-reservoir operating policy in inter-basin water transfer-supply project [J]. Journal of Hydrology, 2012,424:252-263.
- [11] 刁树峰,彭勇,梁国华,等. 基于决策树方法的水库跨流域引水调度规则研究[J]. 大连理工大学学报,2012,52(1):74-78.
- [12] 卢迪,周惠成. 基于互信息量与BP神经网络的中长期径流预报方法研究[J]. 水文,2014,34(4):8-14.