

# 基于启发式分割和近似熵法的径流序列变异诊断\*

黄生志, 黄 强, 王义民, 陈昱潼

(西安理工大学西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地, 陕西 西安 710048)

**摘要:** 对河川径流的变异研究不仅有助于掌握变化环境下径流的演变规律, 还能提高水文分析、水文模拟以及水文计算结果的准确度。以渭河流域为研究对象, 采用启发式分割和近似熵方法, 对渭河年径流序列进行了变异诊断, 诊断结果表明: 林家村以上流域存在 1971 和 1994 年 2 个变异点; 张家山以上流域无变异点存在; 整个渭河流域存在 1969 和 1993 年两个变异点。此外, 通过对渭河径流变异归因分析可知, 该流域径流变异主要是由气候变化 (1971 年的 El Niño 和 1994 年的 ENSO 事件) 与人类活动 (水利工程建设、流域下垫面的改变以及大量开采地下水和地表水) 的共同作用所导致的。

**关键词:** 启发式分割法; 近似熵法; 河川径流; 变异诊断; 渭河流域

中图分类号: P338 文献标志码: A 文章编号: 0529-6579 (2014) 04-0154-07

## The Study on the Runoff Change Based on the Heuristic Segmentation Algorithm and Approximate Entropy

HUANG Shengzhi, HUANG Qiang, WANG Yimin, CHEN Yutong

(State Key Laboratory Base of Eco-Hydraulic Engineering in Arid Area, School of Water Resources and Hydropower, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** The study on the variation of runoff not only helps to master the evolvement rule of runoff under the background of change climate, but also causes the results of hydrological analysis, hydrological simulation and hydrological calculation to be more accuracy. The object of study in this paper is the Wei River Basin. The heuristic segmentation algorithm and approximate entropy theory are employed to detect the mutation points of the annual runoff in the Wei River basin. The diagnosis results suggest: there are two mutation points, 1972 and 1994, in the basin above Linjiacun; there are no variation points in the basin above Zhangjiashan; there are two change points, 1970 and 1994, in the Wei River Basin as a whole. Furthermore, the attribution analysis on the variation of runoff indicates that the variation of runoff in this basin is caused by the mutual effects of climate changes (the El Niño of 1972 and the ENSO of 1994 events) and human activities (the construction of water conservancy project, the changes in underlying surface and excessive exploitation of groundwater and surface water).

**Key words:** the heuristic segmentation algorithm; the approximate entropy; runoff; variation diagnosis; the Wei River basin

\* 收稿日期: 2013-12-02

**基金项目:** 国家自然科学基金重大资助项目 (51190093); 国家自然科学基金资助项目 (51179148, 51179149); 国家重大基础研究 973 资助项目 (2011CB403306-2); 教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目 (NCET-10-0933); 陕西省重点实验室资助项目 (11JS077)

**作者简介:** 黄生志 (1988 年生), 男; **研究方向:** 水资源系统工程、流域气象水文学研究; **通讯作者:** 黄强; E-mail: wresh@mail.xaut.edu.cn

随着全球气候的变化以及日益加剧的人类活动的影响,流域水文要素以及水文情势诸如河川径流、湖泊蓄水以及流域降雨等无论是在时间上还是空间上均有可能发生变异,致使水文资料的一致性遭到破坏<sup>[1-2]</sup>。水文资料一致性的破坏将会给水文分析、水文模拟、水文计算以及流域的水资源规划等带来巨大的影响<sup>[3-5]</sup>,进而导致变异前的成果不能再继续使用,否则将产生极大的偏差。对流域水文变异进行诊断,不仅有助于掌握流域水文要素的演变规律,还能避免因使用一致性被破坏的水文资料进行设计或分析而产生重大失误或者损失。

基于此,国内外不少学者对水文变异进行了研究并取得了大量的研究成果。诸如 Lee 等<sup>[6]</sup>运用了贝叶斯推断理论对水文变点进行了研究。然而,该方法对资料的要求过高且对样本分布的假设过多,因此在实际的应用过程中操作性不强<sup>[7]</sup>;陈广才等<sup>[8]</sup>针对潮白河水资源分区的45 a年径流量序列,采用基于平稳与线性的检验假定的滑动F检验法、滑动T检验法以及秩和检验法等统计的方法,进行了径流序列的变异诊断。事实上,水文序列受到气候变化以及人类活动的影响,往往呈现出高度的非线性和非平稳性,使用传统的统计诊断方法对水文序列的变异点进行检验则往往产生一定的偏差<sup>[9]</sup>。

由 Bernaola-Galván<sup>[10]</sup>提出的启发式分割法主要用于处理非线性及非平稳时间序列的均值变异点。同传统的变异检验方法相比,启发式分割法能够将一个非平稳的时间序列分割成多个平稳的子序

列,各子序列的均值互不相同并表征不同的物理背景,能较好地弥补传统检验方法的不足。由于该方法在分割时采取了一分为二的迭代算法,因此,极大地减少了计算量,具有较好的实用性<sup>[9]</sup>。此外,由 Pincus 于20世纪90年代提出的近似熵(approximate entropy),因其具有较好的抗干扰与处理非稳态序列能力且所需数据量较少等优点,故在机械设备故障的诊断及医学等领域得到广泛地应用<sup>[11]</sup>。鉴于此,本文基于启发式分割算法与近似熵理论,对渭河流域的年径流量进行变异诊断,并对其变异进行归因分析。

## 1 研究区域与数据

### 1.1 研究区域概况

渭河作为黄河流域最大的一级支流,发源于甘肃省内渭源县的乌鼠山,自西向东分别流经甘肃的陇西、天水,陕西的宝鸡、西安、渭南,最终于潼关汇入黄河<sup>[12]</sup>。渭河的干流全长约为818 km,总流域面积约为13.5万 km<sup>2</sup>(图1)。渭河流域位于34°-38°N,104°-110°E,属于大陆性季风气候,春季温暖少雨,夏季雨热同期且有伏旱,秋季凉爽湿润,冬季寒冷少雨。流域的最冷月平均气温大约是-3~-1℃,最热月平均气温大约为23~26℃<sup>[12]</sup>。流域降雨空间分布不均,由东南向西北递减,秦岭南麓雨水充沛,最大年降水量超过1000 mm,而平原河套地区年降水量仅为500 mm左右<sup>[12]</sup>。

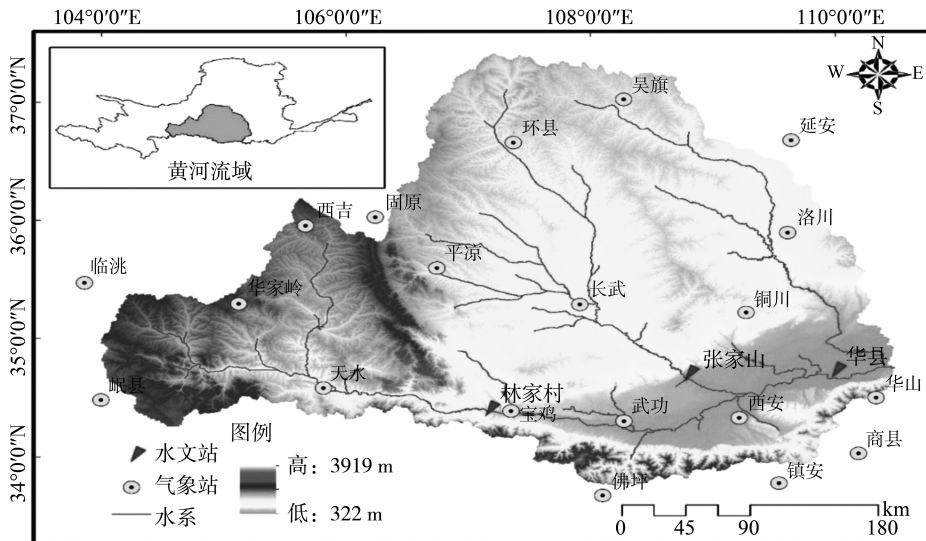


图1 渭河流域及相关水文站位置

Fig. 1 The location of the Wei River Basin and the related hydrological stations

流域降水年内分配不均且年际变化大, 汛期降水量约为年降水量的 65%。自从国家实行西部大开发这一国策以及成立了关中-天水国家级经济开发区后, 渭河流域的经济社会高速发展, 工业用水、农业用水量剧增。因此, 人类大量开采与利用地下水及地表水, 致使渭河流域的河川径流显著减少。此外受全球气候变化的影响, 近年来渭河流域的降雨呈现下降的趋势, 如此一来渭河流域水文情势将发生巨大的变化, 日益减少的水资源将难以满足渭河流域经济社会的可持续发展。鉴于渭河流域用水安全的重要性, 为了进一步掌握渭河流域河川径流的演变规律, 本文对该流域的年径流量进行变异诊断, 并对变异结果进行归因分析。本文将研究区域划分为三个部分, 分别为林家村水文站以上流域, 该区域代表渭河流域的中上游; 张家山水文站以上流域, 该区域代表渭河最大的支流泾河流域; 华县水文站以上流域, 该区域代表整个渭河流域。

## 1.2 数据

本研究所用数据为渭河流域 21 个气象站的 1960-2005 年的日气象数据, 通过求和运算得到各个气象站的降雨、气温、风速、日照变化率等年气象序列以及林家村、张家山以及华县水文站的 1960-2005 年的日径流序列, 通过求和而得到各水文站的年径流量, 渭河流域及各站点所在的位置如图 1 所示。以上气象数据均来源于中国国家气象中心, 水文数据摘自水文手册。所有数据在使用之前均进行了三性审查, 审查结果表明本文所采用的水文气象数据具有较好的可靠性、一致性以及代表性, 可以用作相应分析。潜在蒸发量是通过 Penman-Monteith 公式计算而成。

## 2 研究方法

### 2.1 启发式分割算法

某一时间序列  $x(t)$  由  $N$  个点组成, 其中一个分割点  $i$  从序列的左边沿着该序列依次向右边滑动, 分割点左边和右边部分的平均值分别为  $\mu_1(i)$  和  $\mu_2(i)$ , 其标准差分别是  $s_1(i)$  和  $s_2(i)$ ,  $i$  点的合并偏差  $S_D(i)$  可表示为<sup>[9,13-14]</sup>:

$$S_D = \left( \frac{(N_1 - 1)s_1^2 + (N_2 - 1)s_2^2}{N_1 + N_2 - 2} \right)^{1/2} \cdot \left( \frac{1}{N_1} + \frac{1}{N_2} \right)^{1/2} \quad (1)$$

式中,  $N_1$ 、 $N_2$  分别表示  $i$  点左边与右边部分的点数。其中,  $i$  点左右两边两子序列均值的差异能够使用  $t$  检验统计值  $T(i)$  来进行度量<sup>[9]</sup>:

$$t = \left| \frac{\mu_1(i) - \mu_2(i)}{S_D} \right| \quad (2)$$

$T$  值越大, 则说明该点左右两边两子序列的差异越明显。计算  $T(t)$  中最大值  $T_{\max}$  所对应的统计显著性  $P(T_{\max})$ , 其计算公式如下<sup>[9]</sup>:

$$P(t_{\max}) \approx \{1 - I_{[v/(v+t_{\max}^2)]}(\delta v, \delta)\}^\eta \quad (3)$$

通过蒙特卡洛模拟可得:  $\eta = 4.19 \ln N - 11.54$  且  $\delta = 0.40$ 。其中,  $N$  表示该序列的长度,  $v = N - 2$ ,  $I_x(a, b)$  是不完全  $\beta$  函数。预先设定一个临界值  $P_0$ , 当  $P(T_{\max}) \geq P_0$ , 则在该点处将此序列分割成左右两个均值差异较大的子序列, 否则不进行分割<sup>[9]</sup>。对得到的新序列不断进行迭代并重复以上操作, 直到子序列的长度小于  $\ell_0$  ( $\ell_0$  是最小分割尺度) 时便停止对其分割。由此, 便将原序列分割成几个均值不同的子序列, 而分割点则为该序列的均值变异点。

通常情况下,  $P_0$  取值范围为 0.5~0.95, 而  $\ell_0$  的取值则不应小于 25<sup>[15]</sup>。通过不断调整的大小, 能够实现对该时间序列不同尺度上的变异检测<sup>[9]</sup>。

### 2.2 近似熵方法

近似熵方法实质上是一种基于边缘概率分布统计的定量描述某一时间序列的复杂程度的方法, 该算法的具体步骤简要介绍如下<sup>[11]</sup>。

假定某一长度为  $N$  的时间序列  $u(1), u(2), \dots, u(N)$ , 在该时间序列中构造一组  $m$  维数的向量  $X(1), X(2), \dots, X(N + m - 1)$ , 其中向量为<sup>[11]</sup>:

$$X(i) = \{u(i), u(i+1), \dots, u(i+m-1)\} \quad (4)$$

定义两个向量  $X(i)$  与  $X(j)$  之间的距离  $d[X(i), X(j)]$  是两个向量中对应的元素的最大值<sup>[11]</sup>:

$$d[X(i), X(j)] = \max[|u(i+k) - u(j+k)|] \quad (5)$$

对于每一个  $i$ , 定义两个向量  $X(i)$  与  $X(j)$  之间的关联程度:

$$C_i^m(r) = \frac{\{d[X(i), X(j)] \leq r \text{ 的个数}\}}{(N - m + 1)} \quad (6)$$

对  $C_i^m(r)$  求对数, 进而求所有  $i$  对应的平均值:

$$\varphi^m(r) = \frac{1}{N - m + 1} \sum_{i=1}^{N-m+1} \ln(C_i^m(r)) \quad (7)$$

将维数  $m$  加上 1, 重复以上步骤, 可以得到  $C_i^{m+1}(r)$  与  $\varphi^{m+1}(r)$ 。理论上, 该时间序列的近似熵应该为<sup>[11]</sup>:

$$\text{ApEn}(m, r) = \lim_{N \rightarrow \infty} \varphi^m(r) [\varphi^m(r) - \varphi^{m+1}(r)] \quad (8)$$

然而，实际上  $N$  不可能为无穷大。当  $N$  取有限值时，便可得到近似熵的估计值，表示为：

$$ApEn(m,r) = \varphi^m(r) - \varphi^{m+1}(r) \quad (9)$$

### 3 结果与讨论

#### 3.1 基于启发式分割算法的年径流变异结果分析

根据上述 2.1 的具体步骤，将  $P_0$  设定为 0.95， $\ell_0$  的取值则设为 25，分别得到林家村以上流域、张家山以上流域以及整个渭河流域的年径流变异分析结果，如图 2 所示。

由图 2(a) 中的第一次分割可知，1971 年对应的  $T$  值最大，并且其相应的  $P(T_{\max})$  等于 1 要大于临界值 0.95。因此，1971 年是林家村以上流域年径流序列的第一个突变点；从第二次分割可知，1994 年所对应的  $T$  值最大，且其相应的  $P(T_{\max})$  等于 0.998 5，也大于临界值 0.95，故 1994 年为该流域年径流序列的第二个突变点。

由图 2(b) 可得，张家山以上流域的年径流序列并无突变点，因其最大  $T$  值的  $P(T_{\max})$  小于 0.95。对于整个渭河流域的年径流序列，由图 2(c) 中第一次分割可知，1969 年的  $T$  值为最大值，其对应的  $P(T_{\max})$  等于 0.992 9，大于临界值 0.95，因此 1969 年为第一个变异点；由其第二次分割可得，1993 年的  $T$  值为最大值，其对应的  $P(T_{\max})$  等于 0.971 8，大于临界值 0.95，故 1993 年为第 2 个变异。

#### 3.2 基于近似熵的年径流变异分析结果

根据上述 2.2 求近似熵的具体步骤，采用滑动窗口的方法，将窗口宽度设为 5，滑动步长设为 1， $m$  和  $r$  分别设为 2 和  $0.15\sigma$ 。其中， $\sigma$  为原始序列的标准差，分别得到林家村以上流域、张家山以上流域以及整个渭河流域的基于近似熵的年径流变异分析结果于图 3(a) - (c) 中。

由图 3(a) 可知，林家村以上流域年径流 1960 - 1971 年间的近似熵较大，而 1971 - 1994 年间的近似熵较小，1971 年明显是一个变异点，而 1994 - 2005 年间的近似熵较大，易知 1994 年为另一变异点。由图 3(b) 可知，张家山以上流域年径流序列的近似熵没有显著的变异情况。因此，该流域的年径流序列无变异点。而由图 3(c) 中整个渭河流域年径流的近似熵明显可知，渭河流域年径流序列明显存在两个变异点，分别为 1969 与 1993 年。该结果与基于启发式分割算法的结果一致，进一步论证了以上 3 个流域年径流序列变异点的正确性，也充分展示了基于启发式分割算法及近似熵理论在水文变异诊断上的优越性。

#### 3.3 流域年径流变异点的印证

3.3.1 累积年径流与年份关系图 虽然通过启发式分割算法及近似熵方法已经发现林家村以上流域年径流序列存在 2 个变异点（1971 和 1994 年），张家山以上流域年径流序列无变异点存在，整个渭河流域年径流序列也存在两个变异点（1969 和 1993 年）。

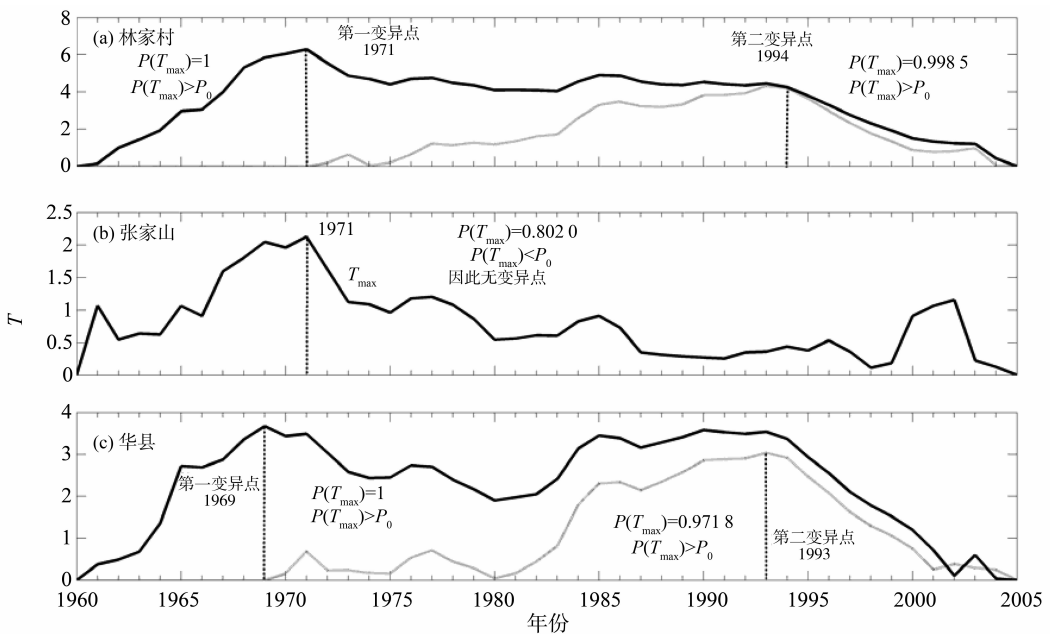


图 2 年径流启发式分割检验图

Fig. 2 The test chart of annual runoff based on heuristic segmentation algorithm

为了进一步证明这两个算法的在变异诊断上的准确性, 绘制 3 个流域的累积年径流量与年份的关系图, 其结果如图 4 所示。

由图 4 实心圆部分可以明显看出林家村以上流域累积年径流被 2 个变异点分成了 3 部分, 且每部分的线性拟合度都很高。其中, 1960 - 1971 与 1972 - 1994 年 2 个部分的线性拟合相关系数高达 0.99, 而 1995 - 2005 年的线性拟合系数为 0.96。而这两个变异点恰好与上述 3.2 节中基于启发式分割法及近似熵理论所找到的关于林家村以上流域年径流序列的变异点相一致。图 4 空心五角星部分所表示的是张家山以上流域累积年径流量与年份之间的关系, 在整个研究阶段 1960 - 2005 年间, 所有的点均拟合于一条直线, 且拟合精度高, 其相关系数高达 0.99。因此, 在 1960 - 2005 年间, 张家山以上流域年径流序列无明显变异点存在。由图 4 的空心圆部分可知, 整个渭河流域的累积年径流量被 1969 与 1993 年这 2 个变异点分成了 3 个部分, 每个部分点的线性拟合程度都很高, 3 个部分的相关系数均高达 0.99。因此, 通过累积年径流量与年份的关系图可知, 整个渭河流域的年径流序列存在 1969 和 1993 年这 2 个变异点, 而这又与上述利用启发式分割法及近似熵理论所发现的整个渭河流域年径流量的变异的十分吻合。由此进一步论证了基于启发式分割法及近似熵理论在水文变异诊断中的准确性; 与此同时, 进一步印证了渭河流域年径流

序列存在变异的事实。其中, 林家村以上流域与整个渭河流域的年径流序列的确存在两个变异点, 而张家山以上流域年径流序列并无变异点存在。此外, 对于林家村以上流域和整个渭河流域被两个变异点分割成的 3 个部分而言, 其拟合直线的倾斜度均随着时间推移而不断减小, 由此可知这两个流域的径流量有着明显的下降趋势, 而实际上也确实如此。该研究结果与拜有存<sup>[16]</sup>的基于差异信息理论的渭河径流序列变异诊断结果基本一致, 他发现渭河流域的年径流存在这两个变异点。

3.3.2 变异前后各参数对比 分别计算存在变异点的林家村以上流域以及整个渭河流域变异前后径流序列的均值、方差以及变差系数等参数, 进一步对比分析变异点前后序列的差异性, 具体的参数值如表 1 所示。由表 1 可知: ① 林家村以上流域由两个变异点所分割成的 3 部分径流序列无论是均值还是方差均有较大差别, 就均值而言, 1972 - 1994 年间的年径流均值较 1960 - 1971 年减少了 42.2%, 而年径流均值 1995 - 2005 年比 1960 - 1972 年减少了 77.3%, 可以说 3 个部分的均值差别比较明显。② 而就方差而言, 1972 - 1994 年间的年径流序列的方差较 1960 - 1971 年减少了 71.4%, 而 1995 - 2005 年的年径流序列的方差同 1960 - 1972 年相比减少了 86.9%, 由此可知, 这 3 部分的方差差异性较大。但是, 对于变差系数而言, 1972 - 1994 年间的变差系数值较 1960 - 1972 年

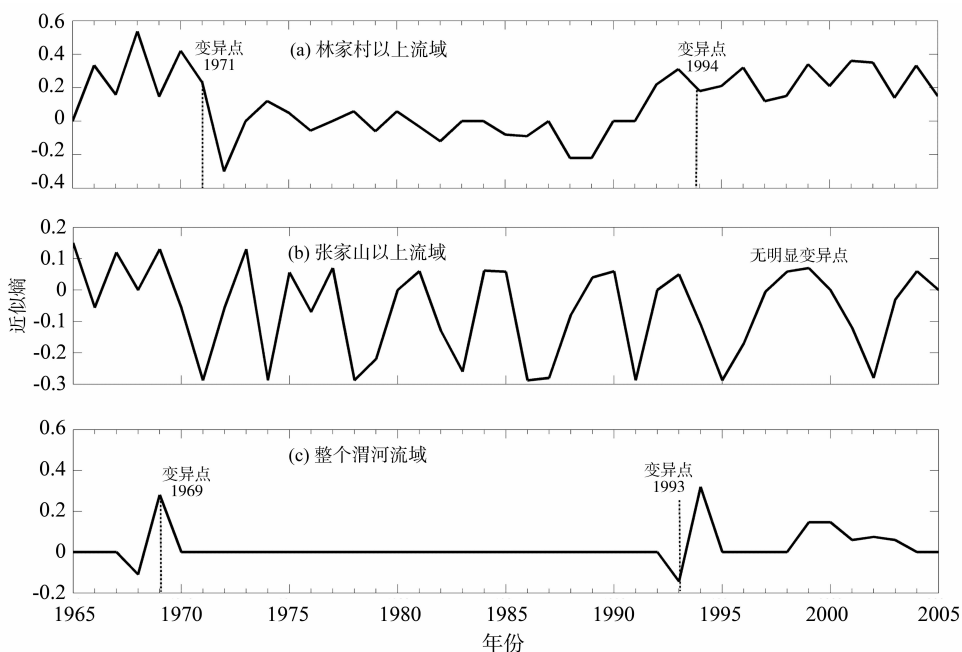


图 3 年径流的近似熵检验图

Fig. 3 The test chart of annual runoff based on approximate entropy method

变化不大，而 1995 - 2005 的年径流序列的变差系数与 1960 - 1972 年相比减少了 40.9%。③ 整个渭河流域的年径流序列变异前后参数的变化规律与林家村以上流域类似，3 个部分的均值与方差的差异性较大，1970 - 1994 年间的变差系数数值同 1960 - 1970 相比变化不大，而 1994 - 2005 的年径流序列的变差系数较 1960 - 1969 年减少了 25%。

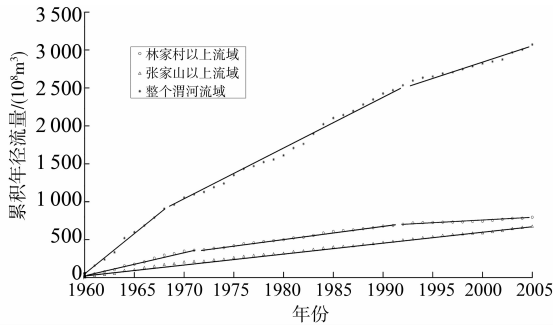


图 4 三个流域累积年径流量与年份的关系图  
Fig. 4 The relationship between accumulative runoff and year in the three basin

总的来说，被两变异点分割成的 3 个年径流序列在均值与方差上差异明显，并且均值、方差及变差系数有明显的减小趋势。由此可侧面证明变异点的正确性。

表 1 两流域年径流序列变异前后参数对比表

Table 1 The comparison of parameters of the annual runoff before and after the change points in the two basin

区域	年份区间	均值/亿 m <sup>3</sup>	方差	变差系数
林家村以上流域	A: 1960 - 1971	28.2	171.9	2.2
	B: 1972 - 1994	16.3	49.2	2.3
	C: 1995 - 2005	6.4	22.6	1.3
渭河流域	A: 1960 - 1969	91.5	1443.5	2.4
	B: 1970 - 1993	66.8	823.1	2.3
	C: 1994 - 2005	39.7	497.4	1.8

### 3.4 径流变异的归因分析

3.4.1 气候变化的影响 采用 Mann-Kendall 法求算变点前后降雨和潜在蒸发的变化趋势，其结果如表 2 所示。

由表 2 可知，林家村以上流域与渭河流域的降雨和潜在蒸发变点前后的变化趋势相似。降雨先减小后变大，但在整个时间序列表现为不显著地下降趋势。潜在蒸发量先增大后减小再增大，在整个时间序列表现为不显著的上升趋势。从常规分析上可知渭河流域与径流联系密切的降雨与潜在蒸发等气象因子均未发生显著变化，人类活动对径流变异的影响或许更强。然而，渭河流域地处中国大陆性季风区，受西太平洋副热带高压系统的影响。1971 年时，西太平洋副热带高压系统有所减弱并发生一个 El Niño 事件致使中国大部分地区的大气环流及气候发生变异，从而导致渭河流域当年降雨量剧减<sup>[17]</sup>，而此时恰好是林家村以上流域年径流序列的第一个变异点所对应的年份。而 1994 年时，另外一个 ENSO 事件发生，此时西太平洋副热带高压系统异常强大，导致渭河流域当年的降雨量较年平均降雨量减少了 14.9%<sup>[18]</sup>，而此时恰好对应于林家村以上流域及整个渭河流域年径流序列的第 2 个变异点。

3.4.2 人类活动的影响 20 世纪 70 年代初，渭河流域修建了不少水利工程，如 1970 年修建的羊毛湾水库和冯村水库，1972 年修建的大峪水库和石门水库。这些水库的修建，极大地改变河川径流的时空分布规律，破坏天然的径流规律，从而导致径流序列变异。除了兴建水利工程外，流域下垫面的变化也改变河川径流的演变规律。50 年代末 60 年代初，由于经济困难与政治运动的缘故，大量的树木遭到破坏，尤其在 1958 年的“大炼钢铁”时期，集中砍伐了大量的林木，从而造成了严重的水土流失，由此也使得 1960 - 1970 年间的径流量较大<sup>[19]</sup>。但是，随着水土保持措施的开展，尤其是 70 - 80 年代，渭河流域对水土流失开展了一系列有组织、有计划、有步骤的防治工作，并取得了很好的成效，从而在一定程度上减小了渭河流域的水土流失量。因此，在 1973 - 1994 年间河川径流较 1960 - 1970 年有一定的减少。此外，随着人口的迅速增加以及经济的高速发展，渭河流域的工业用水和农业用水增长迅速。其中，1990 - 2000 年间，

表 2 变点前后降雨和潜在蒸发的变化趋势

Table 2 The trend of precipitation and potential evaporation before and after change points

区域	林家村以上流域				渭河流域			
	1960 - 2005	1960 - 1971	1972 - 1994	1995 - 2005	1960 - 2005	1960 - 1969	1970 - 1993	1994 - 2005
降雨	-1.76	-0.92	-0.51	1.71	-1.06	-0.31	-0.12	0.93
潜在蒸发	1.14	2.01	-1.64	0.16	0.45	0.78	-1.66	0.16

国民经济各行业用水增加了 17.1 亿  $m^3$ , 年均增长率为 3.2%, 远高于全国平均 1.1% 和黄淮海流域的 0.3%。90 年代后的渭河流域国民经济平均用水量为 42.62 亿  $m^3$ , 比 90 年代前增加了 52.6%。大量地开采与开发地表水和地下水, 是渭河流域径流序列变异的又一重要因素。

## 4 结论

为了探究渭河流域河川径流变异情况, 本文采用 1960–2005 年林家村、张家山以及华县 3 个水文站的日径流数据, 将研究区域划分为林家村以上流域、张家山以上流域以及整个渭河流域 3 个部分。基于启发式分割算法与近似熵方法对各流域的年径流序列进行了变异诊断, 并利用累积年径流量与年份的关系图对变异结果进行判定分析, 得到主要结论如下:

1) 启发式分割算法与近似熵方法均具有较好的检验均值突变点的能力, 具有较强的抗噪抗干扰的能力, 十分适应于非线性非稳态的径流序列的变异诊断, 能够准确地找到其变异点。

2) 林家村以上流域存在 2 个变异点, 分别是 1971 和 1994 年; 张家山以上流域无变异点存在; 整个渭河流域存在两个变异点, 分别是 1969 和 1993 年。

3) 对于林家村以上流域和整个渭河流域而言, 被两个变异点分割成 3 个子序列的线性趋势线的斜率随着年份的增大而不断减小, 由此说明在这两个流域, 其径流量有明显的减小趋势。

4) 造成渭河流域河川径流变异的主要原因是气候变化与日益增长的人类活动。其中, 气候变化主要是 1971 年的 El Niño 事件和 1994 年的 ENSO 事件的发生致使当时渭河流域降雨量剧减, 从而引起径流量的显著减少。人类活动则具体包括水利工程建设、流域下垫面的改变以及由于人口和经济的增长而大量开采与开发地下水和地表水, 由此而使得河川径流发生变异。

## 参考文献:

[1] 邓建伟, 宋松柏, 卢书超. 石羊河流域年径流序列的变异诊断[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2006, 34(4): 121–124.

[2] 李艳, 陈晓宏, 张鹏飞. 北江流域径流序列年内分配特征及其趋势分析[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2007, 46(5): 113–116.

[3] 丁晶, 刘权授. 随机水文学[M]. 北京: 中国水利水电

出版社, 1997.

- [4] 王孝礼, 胡宝清, 夏军. 水文序列趋势与变异点的 R/S 分析法[J]. 武汉大学学报: 工学版, 2002, 35(2): 10–12.
- [5] 詹道江, 叶守泽. 工程水文学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000.
- [6] AUSTIN F S L, SYLVA M H. A shift of the mean level in a sequence of independent normal random variable-A Bayesian Approach [J]. Technometrics, 1997, 19(4): 503–506.
- [7] 肖宜, 夏军, 申明亮, 等. 差异信息理论在水文时间序列变异点诊断中的应用[J]. 中国农村水利水电, 2001(11): 28–30.
- [8] 陈广才, 谢平. 水文变异的滑动 F 识别与检验方法[J]. 水文, 2006, 26(2): 57–60.
- [9] 陈广才, 谢平. 基于启发式分割算法的水文变异分析研究[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2008, 47(5): 122–125.
- [10] BERNAOLA-GALVÁN P, IVANOV P C, AMARAL L A N, et al. Scale invariance in the nonstationarity of human heart rate[J]. Physical Review Letters, 2001, 87: 168105.
- [11] 王启光, 张增平. 近似熵检测气候突变的研究[J]. 物理学报, 2008, 57(3): 1976–1982.
- [12] 张宏利, 陈豫, 任广鑫, 等. 近 50 年来渭河流域降水变化特征分析[J]. 干旱地区农业研究, 2008, 26(4): 236–241.
- [13] 李海彬, 张小峰, 胡春宏, 等. 基于 B-G 分割算法的河川年输沙量突变分析[J]. 水利学报, 2010, 41(12): 1387–1391.
- [14] 封国林, 龚志强, 董文杰. 基于启发式分割算法的气候突变检测研究[J]. 物理学报, 2005, 54(11): 5494–5499.
- [15] 龚志强. 基于非线性时间序列分析方法的气候突变检测研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2006.
- [16] 拜有存. 基于差异信息理论的渭河年径流变异点诊断[J]. 人民黄河, 2009, 31(7): 29–30.
- [17] BAI H, MU X M, WANG F, et al. Analysis on evolution law of meteorological and hydrological drought and wetting [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2012, 30: 237–241.
- [18] ZHANG H L, CHEN Y, REN G X. The characteristics of precipitation variation of Weihe River Basin in Shaanxi Province during recent 50 years [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2008, 26: 236–240.
- [19] 张淑兰, 王彦辉, 于澎涛, 等. 定量区分人类活动和降水量变化对泾河上游径流变化的影响[J]. 水土保持学报, 2010, 24(4): 53–58.