

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.09.026

挠力河流域径流变化特征与影响因素分析*

邢贞相¹ 刘美鑫¹ 付强^{1,2} 官兴龙^{1,2} 葛宇生¹

(1. 东北农业大学水利与建筑学院, 哈尔滨 150030; 2. 黑龙江省高校节水农业重点实验室, 哈尔滨 150030)

摘要: 挠力河作为三江平原最大的流域,其径流变化过程对三江平原的社会经济发展、生态环境变化起着至关重要的作用。为获取该流域的径流量变化特征,首先采用线性趋势分析法和 Mann-Kendall 趋势检验法对流域 4 个代表性水文站径流序列进行趋势分析,然后采用滑动移除近似熵法(MC-ApEn 法)和 Mann-Kendall 突变检验法分别对径流进行突变检验,并对径流发生变化的原因进行了探讨。结果表明:挠力河流域上、中、下游径流量分布不均匀,且同一水文站径流年际变化较大,不利于挠力河流域水资源的开发利用;挠力河流域近 50 a 来径流量呈明显的减少趋势,其中宝清站、保安站、菜咀子站径流下降趋势明显;挠力河径流量在 1966 年发生突变,突变后径流呈明显的减少趋势,发生突变的主要原因是降雨量减少、农业开垦的扩张以及水利建设工程的日益增多;滑动移除近似熵法在进行径流突变分析的过程中,表现出精确度高、抗干扰能力强等特点,是一种适于径流序列突变检测的方法。

关键词: 挠力河流域 径流变化特征 MC-ApEn 法 Mann-Kendall 法

中图分类号: P338 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)09-0178-10

Analysis of Runoff Variation and Impacting Factors in Naoli River Basin

Xing Zhenxiang¹ Liu Meixin¹ Fu Qiang^{1,2} Gong Xinglong^{1,2} Ge Yusheng¹

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China

2. Key Laboratory of Water-saving Agriculture of Heilongjiang University, Harbin 150030, China)

Abstract: The Naoli River Basin is the largest basin on Sanjiang Plain. Its runoff variation plays a crucial role in the development of social economy and ecological environment change of Sanjiang Plain. In order to obtain the variation characteristics of runoff series, the linear trend analysis and Mann-Kendall test were used to analyze the trend of runoff series of four representative hydrological stations in Naoli River Basin. Then the moving cut data - approximate entropy (MC-ApEn method) and Mann-Kendall mutation testing were used to check the mutation characteristics of runoff series. Also the mutation reason of the runoff series was discussed. The results showed that the runoff volume of Naoli River was distributed unevenly and the annual runoff of the same hydrological station had great variation. It was not conducive to the full use of water resources in Naoli River Basin. Runoff series showed obvious reducing trend in the recent 50 years, and the runoff of the Baoqing Station, the Baoan Station and the Caizuizi Station decreased obviously. The runoff mutations of Naoli River occurred in 1966, after the abrupt change, there is an obviously decreasing trend of runoff which is large because of reduced precipitation, increased urban residents water consumption and the growing number of construction of water conservancy. The moving cut data - approximate entropy in the process of runoff mutation analysis showed the characteristics of high precision, strong anti-interference ability and so on and it is a method for detecting the mutations of nonlinear time series.

Key words: Naoli River Basin Runoff variation MC-ApEn method Mann-Kendall method

收稿日期: 2015-04-25 修回日期: 2015-06-17

* 国家自然科学基金资助项目(51109036, 51179032)、黑龙江省自然科学基金资助项目(E2015024)、水利部公益性行业科研专项资助项目(201301096)、黑龙江省级领军人才梯队后备带头人资助项目(500001)、黑龙江省博士后启动资金资助项目(LBH-Q12147)和东北农业大学研究生科技创新资助项目(yjscx14070, yjscx14071)

作者简介: 邢贞相, 副教授, 主要从事水资源分析与评价研究, E-mail: xingzhenxiang01@163.com

通讯作者: 付强, 教授, 主要从事水资源分析与评价研究, E-mail: fuqiangneau@sina.cn

approximate entropy, MC - ApEn) 是一种新的突变检测方法, 与传统的近似熵法相比, 更适用于非线性时间序列的动力学结构突变检测, 检验结果对于滑动移除窗口尺度的依赖性较小, 且能够更为精确地检测序列突变开始的时间^[15]。MC - ApEn 方法的计算步骤如下^[15]:

(1) 首先选择滑动移除数据的窗口长度 L 。

(2) 然后从待分析时间序列的第 i ($i=1, 2, \dots, N-L+1, N$ 为时间序列长度) 个数据开始连续移除 L 个数据, 再将剩余 $N-L$ 个数据按照原有的顺序连在一起得到一个新的时间序列。

(3) 利用近似熵方法计算新序列的近似熵 (ApEn) 值。

(4) 保持移除数据的窗口长度不变, 以步长 L 逐步移动窗口, 重复步骤(2)、(3), 直到原序列结束为止。

(5) 通过步骤(1)~(4)操作可得到一个随着窗口 L 移动的 ApEn 值序列。

(6) 基于不同动力学性质的数据复杂性大小不相同、而具有相同动力学性质的数据的复杂性差异不大这一特点, 结合步骤(5)中得到的 ApEn 序列判断突变点或突变区间。

近似熵^[20] (ApEn) 是一种有效的非线性时间序列分析方法, 其 ApEn 值算法如下:

(1) 假定长度为 N 的时间序列 $\{u(1), u(2), \dots, u(N)\}$, 对这一时间序列构造一组维数为 m 的向量 $\mathbf{X}(1), \mathbf{X}(2), \dots, \mathbf{X}(N-m+1)$, 其中

$$\mathbf{X}(i) = \{u(i), u(i+1), \dots, u(i+m-1)\} \quad (i=1, 2, \dots, N-m+1) \quad (1)$$

(2) 定义向量 $\mathbf{X}(i)$ 和 $\mathbf{X}(j)$ ($i \neq j$) 之间的距离 $d[\mathbf{X}(i), \mathbf{X}(j)]$ 为两者对应元素中差值最大的一个, 即

$$d[\mathbf{X}(i), \mathbf{X}(j)] = \max |u(i+k) - u(j+k)| \quad (k=0, 1, \dots, m-1) \quad (2)$$

(3) 对于每一个 i ($1 \leq i \leq N-m+1$) 定义

$$C_i^m(r) = (d[\mathbf{X}(i), \mathbf{X}(j)] \leq r) / (N-m+1) \quad (3)$$

式中, $C_i^m(r)$ 表示以 $\mathbf{X}(i)$ 为中心, 在维数为 m 、容许偏差为 r 的情形下 $d[\mathbf{X}(i), \mathbf{X}(j)]$ 小于 r 的概率, 从而表示所有 $\mathbf{X}(j)$ 与 $\mathbf{X}(i)$ 之间相互近似的程度, 即关联程度。

(4) 将 $C_i^m(r)$ 取对数, 再求其对所有的 i 的平均值, 记为 $\varphi^m(r)$, 即

$$\varphi^m(r) = \frac{1}{N-m+1} \sum_{i=1}^{N-m+1} \ln C_i^m(r) \quad (4)$$

将维数 m 加 1, 重复步骤(1)~(4), 计算 $C_i^{m+1}(r)$ 和 $\varphi^{m+1}(r)$ 。

理论上时间序列的近似熵为

$$\text{ApEn}(m, r) = \lim_{N \rightarrow \infty} (\varphi^m(r) - \varphi^{m+1}(r)) \quad (5)$$

(5) 一般而言, 此极限以概率 1 存在。实际工作中 N 不可能为无穷大。当 N 为有限值时, 得到 ApEn 的估计值, 记为

$$\text{ApEn}(m, r) = \varphi^m(r) - \varphi^{m+1}(r) \quad (6)$$

显然 ApEn 的值与维数 m 、容许偏差 r 的取值有关。Pincus 等^[20-22] 建议取 $m=2, r=k\sigma, k$ 为经验系数 ($k=0.1 \sim 0.25$), σ 为原始时间序列 $\{u(1), u(2), \dots, u(N)\}$ 的标准差。

2.2.2 Mann - Kendall 统计检验法

Mann - Kendall 统计检验法 (M - K 法) 是世界气象组织推荐并广泛使用的, 同时适用于时间序列趋势检验^[12-14] 和突变检验的方法^[18-19]。它不需要被检验样本服从一定的概率分布, 也不受少数样本异常值的干扰, 检测范围宽, 人为干扰少, 定量化程度高。因此, 适用于水文、气象等非正态分布的数据。

当 M - K 法用于趋势分析时, 具体步骤如下:

(1) 首先建立原假设 H_0 : 时间序列数据 (x_1, x_2, \dots, x_n) 是 n 个独立的随机变量同分布的样本, 没有趋势存在。构造统计量 S 为

$$S = \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{k=j+1}^n \text{sgn}(x_k - x_j) \quad (7)$$

$$\text{其中 } \text{sgn}(x_k - x_j) = \begin{cases} 1 & (x_k - x_j > 0) \\ 0 & (x_k - x_j = 0) \\ -1 & (x_k - x_j < 0) \end{cases} \quad (8)$$

(2) 当 $n > 10$, 正态分布的 M - K 统计量的计算式为

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & (S > 0) \\ 0 & (S = 0) \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & (S < 0) \end{cases} \quad (9)$$

式中 $\text{Var}(S)$ —— S 的方差

在给定的 α 置信水平上, 如果 $|Z| \geq Z_{1-\alpha/2}$, 则拒绝 H_0 假设, 认为序列 x_i 有明显的趋势。其中, 若 Z 值为正, 说明具有上升或增加趋势, 反之则呈下降或减少趋势。当 $|Z|$ 在大于等于 1.28、1.64 和 2.32 时, 表明分别通过置信度为 90%、95% 和 99% 的显著性检验。

当 Mann - Kendall 法用于突变检验时, 计算步骤如下:

(1) 对于时间序列 x_i , 构造一秩序列 r_i , 表示 $x_i > x_j$ ($1 \leq j \leq i$) 的样本累计数, 定义 s_k 为

$$s_k = \sum_{i=1}^k r_i \quad (k=2, 3, \dots, n) \quad (10)$$

(2) 假定时间序列随机独立, 定义统计量为

$$UF_k = \frac{s_k - E(s_k)}{\sqrt{\text{Var}(s_k)}} \quad (k=2, 3, \dots, n) \quad (11)$$

式中 $E(s_k)$ —— s_k 的均值

$\text{Var}(s_k)$ —— s_k 的均方差

UF_k 为标准正态分布, 给定显著性水平 α , 若 $|UF_k| \geq U_\alpha$, 则表明序列存在明显的趋势变化。

(3) 将时间序列 x 按逆序排列, 再重复步骤(1)~(2), 同时使

$$UB_k = -UF_k \quad (k=n, n-1, \dots, 1) \quad (12)$$

其中 $UB_1 = 0$

通过分析统计序列 UB_k 和 UF_k 可进一步分析序列 x 突变的时间节点, 显示突变的区域。若 UF_k 值大于 0, 则表明序列呈上升趋势; 小于 0 则表明呈下降趋势; 当它们超过任一临界直线时, 表明上升或下降趋势显著。如果 UB_k 和 UF_k 曲线出现交点, 且交点在两临界直线之间, 那么交点对应的时刻即为突变开始的时刻^[23]。

3 结果分析

3.1 径流统计参数分析

挠力河流域各水文站年径流量统计参数如表 1 所示。分析得出: 研究时段内, 最大的年径流量为下游菜咀子站 1960 年的 $5.613 \times 10^9 \text{ m}^3$, 最小值为上游保安站 1977 年的 $3.3 \times 10^7 \text{ m}^3$; 挠力河流域 4 个水文站平均年径流量在 $1.61 \times 10^8 \sim 1.517 \times 10^9 \text{ m}^3$ 之间, 其中位于下游的菜咀子站年径流量最大, 而位于上游的保安站年径流量最小; 年际变差幅度, 即上游的宝清站极值比最大, 中游的红旗岭站极值比最小; 变差系数 (C_v) 最大为挠力河下游的菜咀子站, 最小为中游的红旗岭站。

表 1 挠力河流域水文站年径流量

Tab. 1 Annual runoff in Naoli River Basin

水文站名称	最大值/ m^3	最小值/ m^3	平均值/ m^3	极值比	C_v
宝清	1.462×10^9	7.5×10^7	4.89×10^8	19.49	0.73
保安	5.55×10^8	3.3×10^7	1.61×10^8	16.81	0.72
红旗岭	6.51×10^8	9.8×10^7	2.23×10^8	6.64	0.49
菜咀子	5.613×10^9	3.11×10^8	1.517×10^9	18.05	0.84

此外, 通过各站年降雨量序列统计参数(表 2)发现, 上游保安站的降雨量最少, 下游菜咀子站的降雨量最多, 上游宝清站、中游红旗岭站的降雨量居中, 可见挠力河流域降雨空间分布不均匀。同时, 根据各站降雨径流相关分析(表 3), 发现各站降雨径流关系均为线性正相关(图 2), 即各站径流随降雨同步变化, 因而得出该流域径流空间分布不均匀, 即下

游径流量最大, 中游径流量最小, 上游径流量居中。

综合降雨径流相关分析得出的年径流量空间分布规律和各站年径流量差异较大的特点, 不难得出挠力河流域发生洪旱灾害的风险较大, 并可能导致挠力河流域供需矛盾日益突显。

为了进一步揭示挠力河流域径流的变化特征, 下文将对该流域的径流变化趋势和突变进行深入剖析。

表 2 挠力河流域水文站年降雨量

Tab. 2 Annual precipitation in Naoli River Basin

水文站名称	最大值/mm	最小值/mm	平均值/mm	极值比	C_v
宝清	1 114.7	305.3	530.12	3.65	0.27
保安	848.9	312.7	514.71	2.71	0.23
红旗岭	885.2	374.6	531.03	2.36	0.19
菜咀子	876	371.8	578.93	2.36	0.19

表 3 挠力河流域水文站降雨径流相关性检验

Tab. 3 Correlation test of rainfall-runoff in Naoli River Basin

水文站名称	相关系数	显著性水平 $\alpha=0.01$ 的相关系数检验临界值
宝清	0.7504 ^a	0.3385
保安	0.7465 ^a	0.3445
红旗岭	0.7647 ^a	0.4238
菜咀子	0.6111 ^a	0.3385

注: 上标 a 表示通过 $\alpha=0.01$ 的显著性检验。

3.2 径流趋势分析

采用线性趋势分析法^[24]对挠力河流域年径流序列进行趋势分析, 并采用 Mann-Kendall 趋势检验法对其进行显著性检验。

图 3 为挠力河 4 个水文站在研究时段内的年径流量的线性变化趋势。总体看, 挠力河流域年径流量呈现减少的趋势。其中, 菜咀子站年径流量下降趋势最明显, 并通过了 $\alpha=0.05$ 的显著性检验 ($|r| = 0.4996 > r_{\alpha=0.05} = 0.2632$), 下降速率为 $3.817 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{a}$; 宝清站年径流量的线性下降趋势次之, 也通过了 $\alpha=0.05$ 的显著性检验 ($|r| = 0.5179 > r_{\alpha=0.05} = 0.2632$), 下降速率为 $1.115 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{a}$; 保安站年径流量线性下降趋势较明显, 同样通过了 $\alpha=0.05$ 的显著性检验 ($|r| = 0.4025 > r_{\alpha=0.05} = 0.2759$), 下降速率为 $3.15 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$; 只有红旗岭站年径流量线性变化趋势不明显, 没有通过 $\alpha=0.05$ 的显著性检验 ($|r| = 0.0911 < r_{\alpha=0.05} = 0.2759$)。

采用 M-K 趋势检验法对径流的变化趋势进行显著性检验, 结果如表 4 所示。由表 4 可知, 宝清、保安和菜咀子 3 个站的年径流序列减少趋势非常显

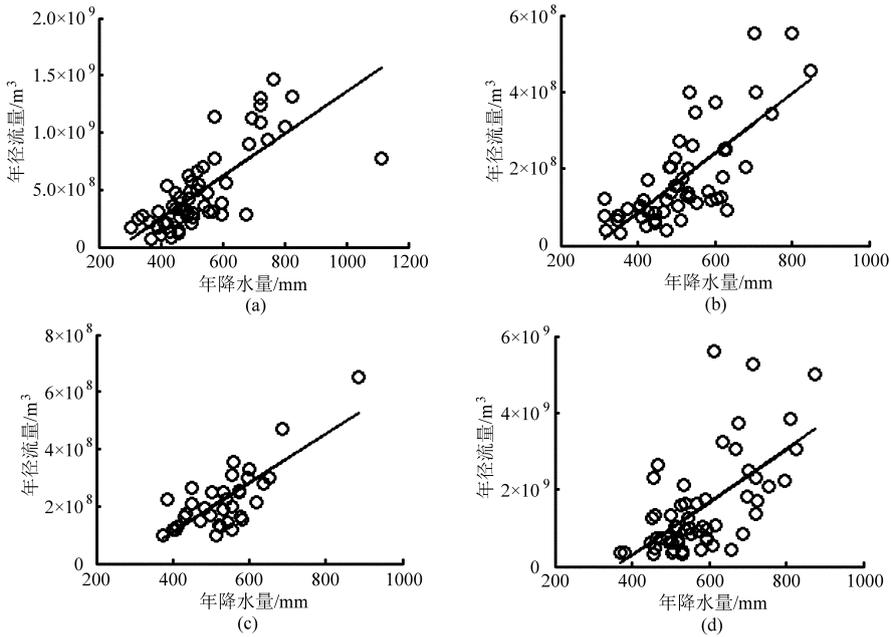


图2 挠力河流域降雨径流相关图

Fig. 2 Correlation diagram of rainfall-runoff in Naoli River Basin

(a) 宝清站 (b) 保安站 (c) 红旗岭站 (d) 菜咀子站

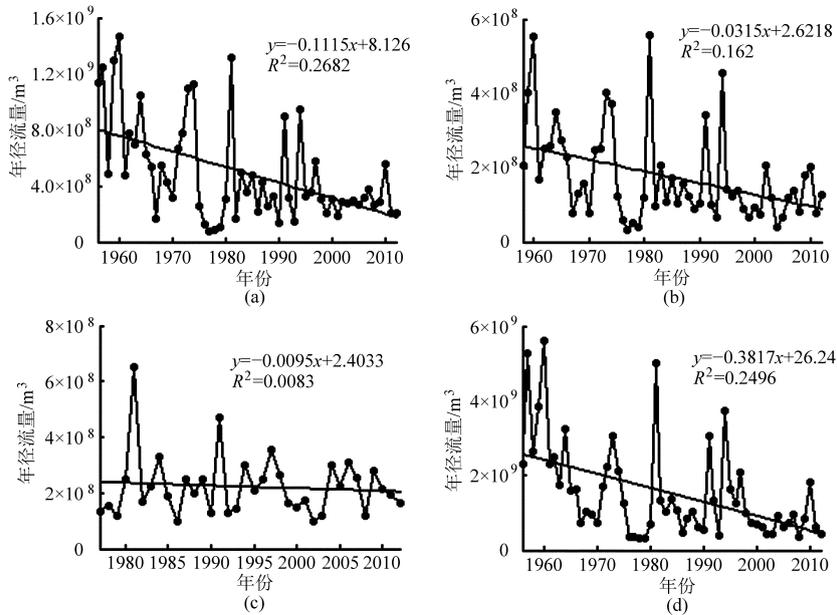


图3 挠力河流域年径流量序列线性变化趋势曲线

Fig. 3 Linear changing trend of annual runoff series in Naoli River Basin

(a) 宝清站 (b) 保安站 (c) 红旗岭站 (d) 菜咀子站

著,而红旗岭站的年径流序列无趋势变化。

表4 挠力河流域水文站年径流量 M-K 趋势检验

Tab. 4 M-K test of annual runoff in

Naoli River Basin

水文站名称	Z 值	$ Z_{\alpha} $ ($\alpha=0.01$)	趋势	显著性
宝清	-3.53	2.32	减少	非常显著
保安	-2.81	2.32	减少	非常显著
红旗岭	0	2.32	无趋势	无
菜咀子	-4.01	2.32	减少	非常显著

综合线性趋势法和 M-K 趋势检验法的分析结果可以得出,挠力河流域的年径流量近 50 a 来总体上呈明显的减少趋势。

3.3 径流突变分析

为深入分析径流序列内部的变化特征,从而构建准确的径流预测模型,径流突变特征是必须考虑的因素。本文选用滑动移除近似熵法(MC - ApEn)和 M-K 突变检验法分别对挠力河流域的月(年)径流序列进行突变分析。

3.3.1 月径流量突变分析

经过试算,本文 MC - ApEn 的滑动移除窗口长度为 12 个月,移动窗口步长 L 为 12 个月, $m = 2, r = 1.5\sigma$ (σ 为原始时间序列 $\{u(1), u(2), \dots, u(N)\}$ 的标准差),根据 2.2.1 节 MC - ApEn 的计算过程,分析得到挠力河流域各水文站径流量的近似熵值(图 4)。由图 4 可以看出:宝清站径流序列 ApEn 值明显的分为 2 个不同的变化过程,1956—1966 年的近似熵值较大,而 1967—2012 年的近似熵值相对较小,基于不同动力学性质的数据其复杂性不相同,近似熵值不相同,而具有相同动力学性质的数据的复杂性差异不大,近似熵值相同这一特点,表明径流序列的复杂性发生了变化,这也意味着宝清站径流在 1966 年发生突变,这与已有的研究结论相一致^[8];保安站和菜咀子站的径流序列分析结果同宝清站一样,即径流在 1966 年发生突变;红旗岭站径流序列近似熵值无明显的变化过程,一直处于较稳

定的波动状态,初步表明红旗岭站径流序列没有发生突变。这可能与其建站较晚有关,红旗岭站于 1977 年设立,对于 1977 年以前的径流资料没有统计。

为进一步分析红旗岭站数据序列较短是否会导致其突变特性与其他 3 个站的特性不一致的现象,将宝清、保安、菜咀子 3 站的径流序列长度均调整为与红旗岭站相同的 1977—2012 年,再次应用 MC - ApEn 对 3 站突变特性进行分析,分析结果如图 5 所示。据图 5 分析可知:宝清站、保安站和菜咀子站 ApEn 值之间的差异不大,变化十分稳定。据此可判断宝清、保安和菜咀子 3 站月径流序列在 1977—2012 年之间没有发生突变。这也进一步证明红旗岭站突变特性与其他 3 站(1977—2012 年)的突变特征相符这一事实。

综合以上 4 个代表站的径流突变分析结果,发现挠力河流域月径流序列在 1966 年发生突变,突变

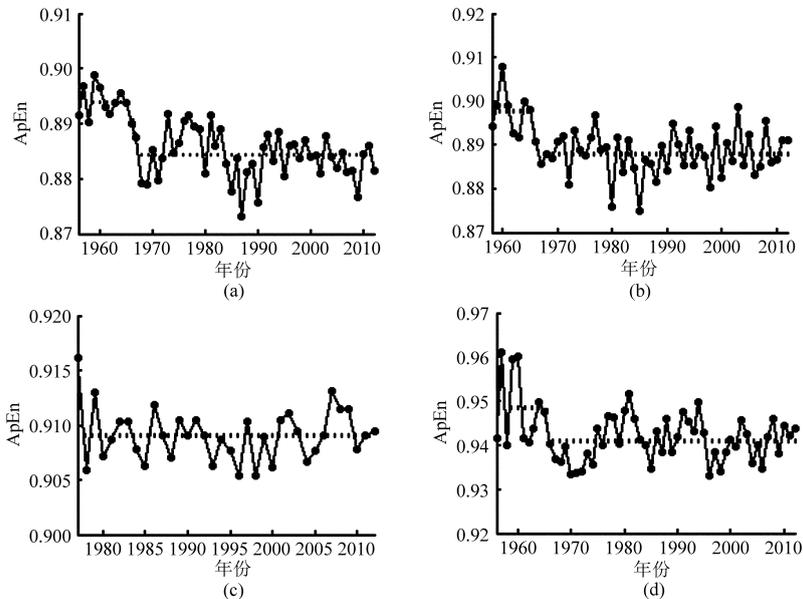


图 4 挠力河流域水文站月径流量 MC - ApEn 的突变分析结果

Fig. 4 MC - ApEn mutation analysis results of monthly runoff in Naoli River Basin

(a) 宝清站 (b) 保安站 (c) 红旗岭站 (d) 菜咀子站

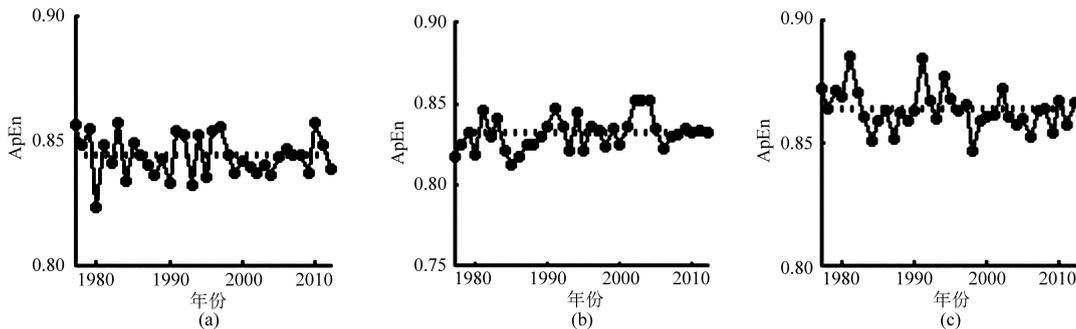


图 5 挠力河流域水文站 1977—2012 年月径流突变分析结果

Fig. 5 MC - ApEn mutation analysis results of monthly runoff in Naoli River Basin during 1977—2012

(a) 宝清站 (b) 保安站 (c) 菜咀子站

后径流呈明显的下降趋势。

选用 M-K 检验法对挠力河水文站月径流量进行分析,突变检验结果如图 6 所示。据图 6 分析可知:宝清站 UF 和 UB 2 条曲线在 1966 年处出现交点,且交点在临界线之间,则 1966 年是宝清站径流突变开始的时间,径流表现为下降的趋势。同时由 UF 曲线可知,从 1974 年开始宝清站月径流量有明显的下降趋势,并且远远的超过了显著性水平 $\alpha = 0.05$ 的临界线,表明径流下降趋势是显著的;保安站 UF 和 UB 曲线只存在 1966 年一个突变点,年径流量具体表现

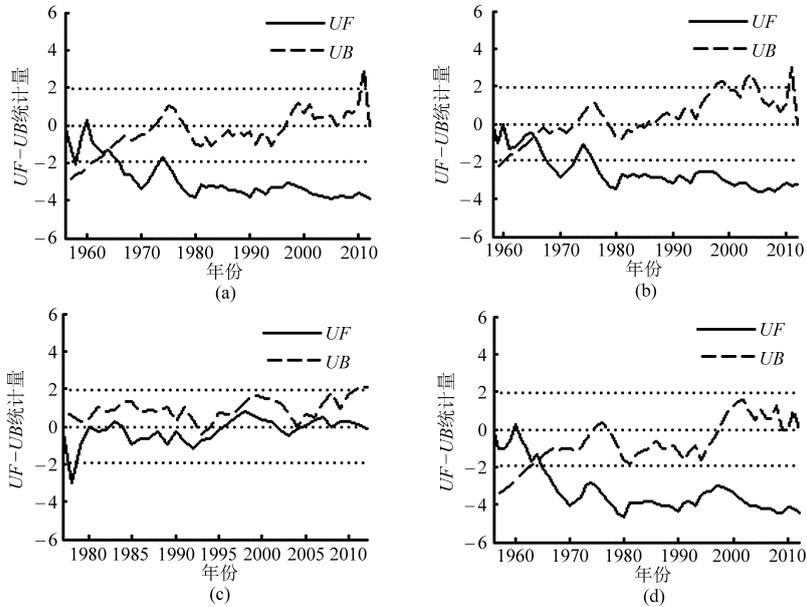


图 6 挠力河流域水文站月径流量 M-K 突变分析结果

Fig. 6 M-K mutation analysis results of monthly runoff in Naoli River Basin

(a) 宝清站 (b) 保安站 (c) 红旗岭站 (d) 菜咀子站

综合以上 4 个代表站月径流量 M-K 突变检验分析,表明挠力河流域月径流量在 1966 年发生突变。该结论与 MC-ApEn 突变检验结论相同。

3.3.2 年径流量突变分析

为进一步揭示挠力河径流量的突变特性,分别用 MC-ApEn 法和 M-K 法对流域的年径流量进行分析。从 MC-ApEn 法对流域年径流量的突变分析(图 7)发现,宝清、保安、菜咀子 3 站年径流量在 1966 年发生突变,而红旗岭站年径流量没有突变发生。同时从 M-K 法对流域的年径流量突变分析(图 8)发现,挠力河流域 4 个水文站在显著性水平 $\alpha = 0.05$ 的临界线之间均没有突变点,但从 UF 曲线的变化趋势可以看出,挠力河年径流量呈现下降的趋势。

综合以上月径流和年径流的突变分析过程发现,MC-ApEn 法作为新的突变检验方法,能准确地检验出月径流和年径流序列的突变节点;相比之下,M-K 突变检验法只能检验出月径流序列中突变最大的时间节点,且无法检验出年径流序列(与月径

为下降的趋势,并且这种下降趋势在 1979 年以后也超过了显著性水平 $\alpha = 0.05$ 的临界线,表明径流下降趋势显著;菜咀子站 UF 曲线和 UB 曲线在 1966 年存在交点,且在显著性水平 $\alpha = 0.05$ 的 2 条临界线之间,则推测 1966 年即为突变时间的节点。同时由 UF 曲线可以看出,1966 年左右发生突变以后, UF 曲线呈现下降趋势,并且超过显著性水平 $\alpha = 0.05$ 的临界线,表明菜咀子站月径流量下降趋势显著;红旗岭站 UF 曲线和 UB 曲线在显著性水平 $\alpha = 0.05$ 的临界线没有交点,即没有突变点。

流序列相比,长度较短)的突变点。因此,M-K 方法对于短序列突变检验具有一定的局限性。

3.4 径流变化的影响因素分析

3.4.1 人类活动的影响

人类活动对挠力河径流的影响主要表现为 2 方面:

(1) 农业开垦。挠力河流域从 1956 年以来经历了 3 次大规模的农业开垦,这种大规模的开垦致使挠力河流域大片天然湿地被盲目的开垦^[25],流域下垫面条件改变,流域蒸发加剧,致使径流量减少,另一方面,农田灌溉面积的增加引起了农业用水的增加^[9],直接造成径流量的减少。

(2) 水利工程建设。随着挠力河流域社会经济的迅猛发展,人类的生产生活用水大量增加,挠力河流域兴建成许多用于灌溉、防洪、发电等综合利用的大型水利枢纽工程,如龙头桥水库、蛤蟆通水库、清河水库等^[26]。水库的建立,使得流域上中下游之间联通性减弱,改变了天然径流过程。同时,河面逐年

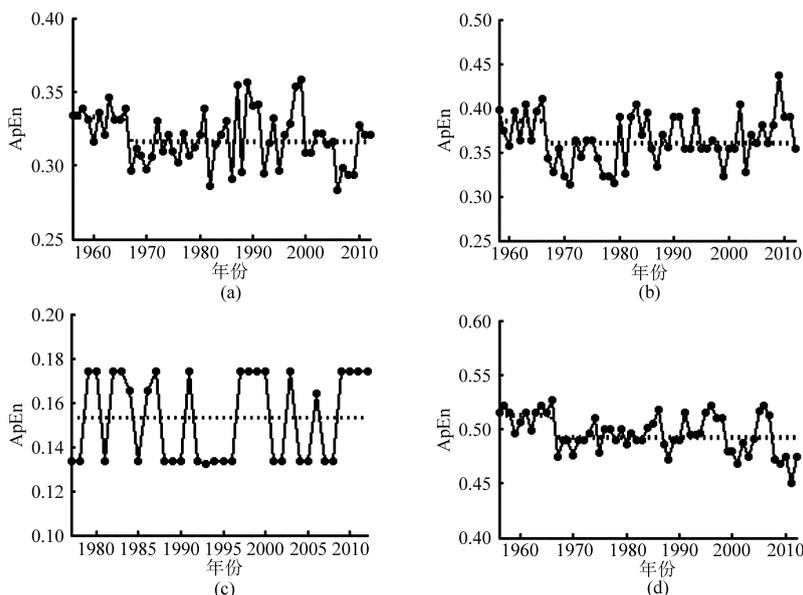


图7 挠力河流域水文站年径流量 MC - ApEn 的突变分析结果

Fig. 7 MC - ApEn mutation analysis results of annual runoff in Naoli River Basin

(a) 宝清站 (b) 保安站 (c) 红旗岭站 (d) 菜咀子站

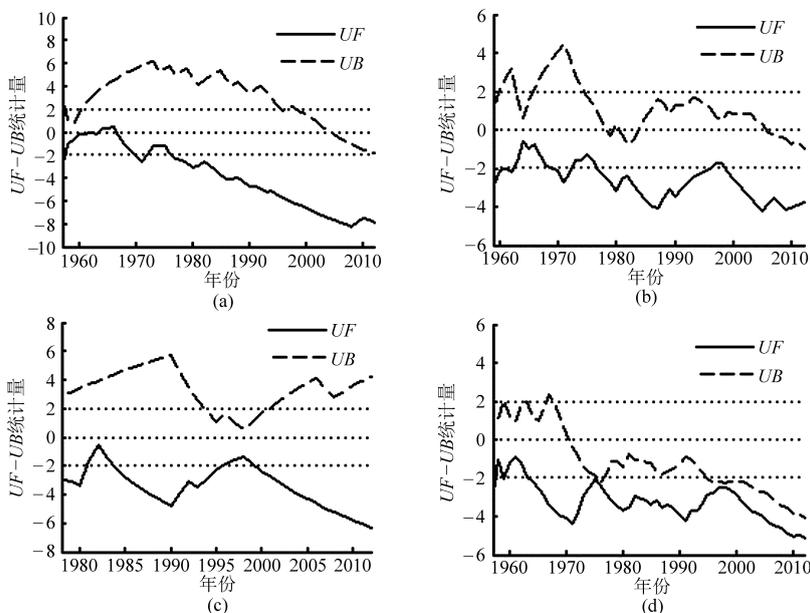


图8 挠力河流域各水文站年径流量 M - K 突变分析结果

Fig. 8 M - K mutation analysis results of annual runoff in Naoli River Basin

(a) 宝清站 (b) 保安站 (c) 红旗岭站 (d) 菜咀子站

缩减,致使径流量减少。

3.4.2 气候变化的影响

降雨是径流产生的关键驱动力^[11],为分析降雨量对径流量的影响,应用线性趋势分析法对挠力河流域降雨进行趋势分析(图9),发现降雨变化与径流变化一致,均呈下降趋势,再结合降雨径流正相关关系和降雨产流的水文特性,可得出挠力河流域降雨量的减少是除农业开垦和水利工程建设以外导致径流减少的另一主要因素。

综合以上分析,初步推测挠力河流域径流量在1966年发生突变的原因可能是人类活动和气候变

化共同导致的。

4 结论

(1) 挠力河流域上游、中游、下游径流量分布不均匀,下游的年径流量偏多;上游的年径流量次之,且左右两岸水文站的径流量差别较大;中游的年径流量居中。此外,同一水文站的径流量年际变化也较大。可见挠力河流域年径流量的时空分布不均对水资源的开发利用是十分不利的。

(2) 采用线性趋势分析法和 M - K 趋势检验法 2 种方法对年径流量进行趋势分析,结果表明挠力

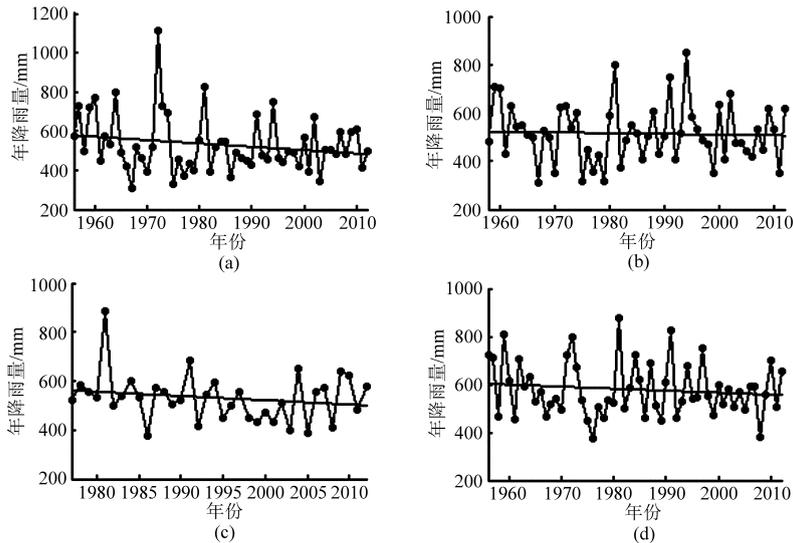


图9 挠力河流域年降雨量序列线性变化趋势曲线

Fig. 9 Linear trend analysis of annual precipitation series in Naoli River Basin

(a) 宝清站 (b) 保安站 (c) 红旗岭站 (d) 菜咀子站

河流域近 50 年来径流量呈显著的减少趋势,其中宝清站、保安站、菜咀子站径流量下降趋势十分明显,而红旗岭站径流量总体无明显变化趋势,这与该站设站时间较晚有关。

(3) 利用滑动移除近似熵法和 M-K 突变检验法分别对挠力河流域的径流序列进行突变分析,结果表明挠力河流域径流序列在 1966 年发生突变,且突变后径流表现为下降的趋势,并对影响径流变化的因素进行初步分析,其主要原因可能是人类活动

和气候变化共同导致的。

(4) 滑动移除近似熵法作为新的突变检验方法,在挠力河径流量的突变分析过程中,表现出很强的适用性和有效性,并能准确地检测出径流序列所有的突变节点;而 M-K 突变检验法由于其对时间序列长度的依赖性,并不能准确地确定时间序列的突变时间节点,同时其本质上只适应于序列存在趋势突变的情况,如果序列本身无明显的趋势变化,则其无法准确判别序列中的突变结构。

参 考 文 献

- 李二辉,穆兴民,赵广举. 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 Erhui, Mu Xingmin, Zhao Guangju. Temporal changes in annual runoff and influential factors in the upper and middle reaches of Yellow River from 1919—2010[J]. Advances of in Water Science, 2014, 25(2): 155-163. (in Chinese)
- 康艳,蔡焕杰,宋松柏. 水文系统复杂性模型研究及应用[J]. 水力发电学报, 2013, 32(1): 5-10.
Kang Yan, Cai Huanjie, Song Songbai. Study and application of complexity model for hydrological system[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013, 32(1): 5-10. (in Chinese)
- 王彦君,王随继,苏腾. 1955—2010 年松花江流域不同区段径流量变化影响因素定量评估[J]. 地理科学进展, 2014, 33(1): 65-75. (in Chinese)
Wang Yanjun, Wang Suiji, Su Teng. Quantification of impacts of precipitation and human activities on runoff changes in different sections of Songhua River during 1955—2010[J]. Progress in Geography, 2014, 33(1): 65-75. (in Chinese)
- 李占玲,徐宗学. 黑河上游山区径流变化特征分析[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(9): 51-56.
Li Zhanling, Xu Zongxue. Characteristics of runoff time series for the upper reaches of Heihe Tiver Basin[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2012, 26(9): 51-56. (in Chinese)
- 侯钦磊,白红英,任园园,等. 50 年来渭河干流径流变化及其驱动力分析[J]. 资源科学, 2011, 33(8): 1505-1512.
Hou Qinlei, Bai Hongying, Ren Yuanyuan, et al. Analysis of variation in runoff of the main stream of the Weihe River and related driving forces over the last 50 years[J]. Resources Science, 2011, 33(8): 1505-1512. (in Chinese)
- 李丽娟,郑红星. 华北典型河流年径流演变规律及其驱动力分析——以潮白河为例[J]. 地理学报, 2000, 55(3): 309-317. (in Chinese)
Li Lijuan, Zheng Hongxing. Characteristics and driving forces of annual runoff changes for rivers in north China—a case study in the Chaobaihe River[J]. Acta Geographica Sinica, 2000, 55(3): 309-317. (in Chinese)
- 冯夏清,章光新,尹雄锐. 乌裕尔河流域径流特征分析[J]. 自然资源学报, 2009, 24(7): 1286-1296.
Feng Xiaqing, Zhang Guangxin, Yin Xiongwei. Analysis of the characteristics of runoff in Wuyuerhe River Basin[J]. Journal of Natural Resources, 2009, 24(7): 1286-1296. (in Chinese)
- 刘贵花,栾兆擎,阎百兴,等. 三江平原挠力河上游径流演变趋势及其驱动因素[J]. 地理科学, 2011, 31(8): 952-957.

- Liu Guigua Luan Zhaoqing, Yan Baixing, et al. Tendency and driving forces of runoff changes for upper stream of Naoli River in the Sanjiang Plain. [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2011, 31(8): 952–957. (in Chinese)
- 9 姚允龙, 吕宪国, 王蕾. 1956年—2005年挠力河径流演变特征及影响因素分析[J]. *资源科学*, 2009, 31(4): 648–655. Yao Yunlong, Lü Xianguo, Wang Lei. Tendency and periodicity of annual runoff of Naoli River from 1956 to 2005[J]. *Resources Science*, 2009, 31(4): 648–655. (in Chinese)
- 10 张素梅, 王宗明, 张柏, 等. 三江平原挠力河上游流域水文过程及其驱动力模型研究[J]. *地球信息科学学报*, 2010, 12(1): 143–152. Zhang Sumei, Wang Zongming, Zhang Bai, et al. A driving force model of hydrological processes in upstream basin of the Naoli River Sanjiang Plain[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2010, 12(1): 143–152. (in Chinese)
- 11 刘正茂, 吕宪国, 夏广亮, 等. 近50年挠力河流域上游径流深变化过程及其驱动机制研究[J]. *水文*, 2011, 31(3): 44–50. Liu Zhengmao, Lü Xianguo, Xia Guangliang, et al. Runoff depth variation process of upper reaches of Naoli River Basin and its driving mechanism in recent 50 years[J]. *Journal of China Hydrology*, 2011, 31(3): 44–50. (in Chinese)
- 12 Huang Jin, Sun Shanlei, Zhang Jinchi. Detection of trends in precipitation during 1960—2008 in Jiangxi Province, Southeast China[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2013, 114(1): 237–251.
- 13 张晓晓, 张钰, 徐浩杰. 1960—2010年洮河流域径流变化趋势及影响因素[J]. *兰州大学学报: 自然科学版*, 2013, 49(1): 38–43. Zhang Xiaoxiao, Zhang Yu, Xu Haojie. Analysis of runoff tendency and its influencing factors in the Tao River Basin from 1960 to 2010[J]. *Journal of Lanzhou University: Natural Sciences*, 2013, 49(1): 38–43. (in Chinese)
- 14 占车生, 乔晨, 徐宗学, 等. 渭河流域近50年来气候变化趋势及突变分析[J]. *北京师范大学学报: 自然科学版*, 2012, 48(4): 399–405. Zhan Chesheng, Qiao Chen, Xu Zongxue, et al. Climate change and mutation analysis in Weihe River Basin in the last 50 years [J]. *Journal of Beijing Normal University: Natural Science*, 2012, 48(4): 399–405. (in Chinese)
- 15 何文平, 何涛, 成海英, 等. 基于近似熵的突变检测新方法[J]. *物理学报*, 2011, 60(4): 820–828. He Wenping, He Tao, Cheng Haiying, et al. A new method to detect abrupt change based on approximate entropy[J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(4): 820–828. (in Chinese)
- 16 金红梅, 何文平, 侯威, 等. 不同趋势对滑动移除近似熵的影响[J]. *物理学报*, 2012, 61(6): 501–509. Jin Hongmei, He Wenping, Hou Wei, et al. Effects of different trends on moving cut data-approximate entropy[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(6): 501–509. (in Chinese)
- 17 金红梅, 何文平, 张文, 等. 噪声对滑动移除近似熵的影响[J]. *物理学报*, 2012, 61(12): 613–621. Jin Hongmei, He Wenping, Zhang Wen, et al. Effect of noises on moving cut data-approximate Entropy[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(12): 613–621. (in Chinese)
- 18 Stefan Becker, Marco Gemmer, Tong Jiang. Spatiotemporal analysis of precipitation trends in the Yangtze River catchment[J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2006, 20(6): 435–444.
- 19 Xu Z X, Takeuchi K, Ishidaira H. Monotonic trend and step changes in Japanese precipitation[J]. *Journal of Hydrology*, 2003, 279(1): 144–150.
- 20 Pincus S M. Approximate entropy as a measure of system complexity[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1991, 88(6): 2297–2301.
- 21 谢中凯, 刘国华. 近似熵在混凝土结构损伤识别中的应用[J]. *浙江大学学报: 工学版*, 2013, 47(3): 456–467. Xie Zhongkai, Liu Guohua. Application of approximate entropy in concrete structures damage identification [J]. *Journal of Zhejiang University: Engineering Science*, 2013, 47(3): 456–467. (in Chinese)
- 22 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): 1976–1983. Wang Qiguang, Zhang Zengping. The research of detecting abrupt climate change with approximate entropy [J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, 57(3): 1976–1983. (in Chinese)
- 23 周念清, 杨硕, 沈新平, 等. 洞庭湖流域降雨序列突变性和多尺度特征分析[J]. *同济大学学报: 自然科学版*, 2014, 42(6): 867–872. Zhou Nianqing, Yang Shuo, Shen Xinping, et al. Mutation and multi-scale characteristics analysis of rainfall series in Dongting Lake watershed[J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2014, 42(6): 867–872. (in Chinese)
- 24 易浪, 任志远, 崔宇, 等. 陕西省1961年—2011年气温和降水变化趋势及突变分析[J]. *华中师范大学学报: 自然科学版*, 2014, 48(4): 593–600. Yi Lang, Ren Zhiyuan, Cui Yu, et al. Analysis on the change trends and catastrophe of temperature and precipitation in Shaanxi Province from 1961 to 2011[J]. *Journal of Huazhong Normal University: Natural Science*, 2014, 48(4): 593–600. (in Chinese)
- 25 侯伟, 张树文, 张养贞, 等. 三江平原挠力河流域50年代以来湿地退缩过程及驱动力分析[J]. *自然资源学报*, 2004, 19(6): 725–731. Hou Wei, Zhang Shuwen, Zhang Yangzhen, et al. Analysis on the shrinking process of wetland in Naoliriver Basin of Sanjiang Plain since the 1950s and its driving forces[J]. *Journal of Natural Resources*, 2004, 19(6): 725–731. (in Chinese)
- 26 刘正茂, 孙永贺, 吕宪国, 等. 挠力河流域龙头桥水库对坝址下游湿地水文过程影响分析[J]. *湿地科学*, 2007, 5(3): 201–207. Liu Zhengmao, Sun Yonghe, Lü Xianguo, et al. Influence of longtouqiao reservoir on hydrological processes of wetlands below the dam the Naoli River Basin[J]. *Wetland Science*, 2007, 5(3): 201–207. (in Chinese)