

Trend and Mutability Analysis for River Runoff Time Series

Yanguo Jin¹, Chunqing Duan², Liangming Zhao¹, Xi Lei¹

¹Construction and Administration Bureau of South-to-North Water Diversion Middle Route Project, Beijing

²Beijing Water Affairs Centre for Suburbs, Beijing

Email: compassjin@126.com

Received: Jan. 4th, 2016; accepted: Jan. 19th, 2016; published: Jan. 28th, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

The river runoff time series has certain characteristics of trend and mutability, and the potential mutation point can be analyzed by discussing the variation regulation of those features, thus further grasping the runoff evolution law of runoff series. Taolinkou reservoir was selected as an example, and its trend and mutability properties of inflow runoff were analyzed, which clarifies the evolution characteristics of relative runoff series. It is shown that all kinds of runoff time series present the decrease trend year by year but no mutation obviously. The results can provide technical support and theoretical basis of subsequent model selecting of runoff forecasting, reservoir dispatching and water resources allocation.

Keywords

Runoff, Time Series, Trends, Mutability

河川径流时间序列的趋势性及突变性分析

靳燕国¹, 段春青², 赵梁明¹, 雷曦¹

¹南水北调中线干线工程建设管理局, 北京

²北京市郊区水务事务中心, 北京

Email: compassjin@126.com

收稿日期: 2016年1月4日; 录用日期: 2016年1月19日; 发布日期: 2016年1月28日

作者简介: 靳燕国(1983-), 男, 河北邢台人, 工程师, 硕士, 主要从事南水北调工程水量调度、工程管理等方面的研究。

文章引用: 靳燕国, 段春青, 赵梁明, 雷曦. 河川径流时间序列的趋势性及突变性分析[J]. 水资源研究, 2016, 5(1): 71-78.
<http://dx.doi.org/10.12677/jwrr.2016.51009>

摘要

河川径流时间序列呈现出一定的趋势性及突变性,通过探讨径流序列趋势性及突变性变化规律,分析潜在突变点,进而可以进一步掌握径流序列的径流演变规律。本文以桃林口水库为例,对其入库径流趋势性及突变性进行了分析,得到了相应的径流序列演变特点。通过分析可以看出,桃林口水库各径流序列呈现出逐年递减的趋势,且径流序列均没有发生显著突变。该结果可以对后续径流预报模型的选用、水库调度及水资源配置等工作提供技术支撑及理论依据。

关键词

径流, 时间序列, 趋势性, 突变性

1. 引言

水文序列的趋势性是指序列随时间呈现的增大或减小的变化特征,判断其趋势性是否显著,需要进行检验[1]。常用的趋势性检验方法有滑动平均法、累积滤波器、Spearman 秩次相关检验法、Kendall 秩次相关检验法等。当序列趋势较为明显的时候,对结果采用成熟的比较方法(例如线性倾向等)进行处理,可以通过曲线直观判断,且较为准确。但是,当结果并无显著的趋势变化,不同人采用同一方法得出的结果可能差异较大,通过观测所得的结果缺乏可靠性。受自然条件和人类活动的影响,水文情势会发生变异,从而使得水文序列的统计特征值发生变化,掌握径流突变特征,明确其在何时发生过何类突变,预估其未来变化趋势,研究径流序列的突变性,找到突变点是十分必要的。常用的水文时间序列突变点检验法[2] [3] 有:有序聚类分析法、最优信息二分割法、重标极差法、滑动 F 检验法、滑动 T 检验法、贝叶斯法、Mann-Kendall 秩次相关检验法等。上述有些方法的计算结果准确性对数据序列长度有较高要求,有些统计检验方法结果与置信水平相关。由于各种方法的适用前提和适用范围有所不用,得出的结论也可能存在差异。

利用赫斯特指数法的计算结果不依赖时间序列分部特征的特性,可以排除时间序列基础数据的干扰,对序列的趋势性得出较为满意的结果,本文采用赫斯特指数分析径流系列趋势性。采用 Mann-Kendall 秩次相关检验法用来分析降水、径流等时间序列的变化情况应用较广,序列中少数异常数据对计算结果影响较小,且计算简便,本文采用 Mann-Kendall 秩次相关检验法对径流系列、汛期径流和非汛期径流的突变性分别进行分析,采用滑动 T 检验法对突变点进行精确识别。

2. 趋势性分析

2.1. 赫斯特指数

上世纪 50 年代初,赫斯特提出了重标极差法,实现了对水文时间序列的长记忆性分析[3],其优点在于它不受序列分布特征的影响。燕爱玲等[4]将重标极差法引入径流时间序列分析之中,通过赫斯特指数来判断径流时间序列未来的趋势性

设有径流序列 $X_t (t=1,2,\dots,\tau)$, 其均值序列为:

$$y(\tau) = \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} x(t) \quad \tau = 1, 2 \quad (1)$$

累计离差:

$$F(t, \tau) = \sum_{n=1}^t [x(n) - y(\tau)] \quad 1 \leq t \leq \tau \quad (2)$$

极差:

$$R(\tau) = \max F(t, \tau) - \min F(t, \tau) \quad (3)$$

$$1 \leq t \leq \tau F(t, \tau) = 1, 2$$

标准差:

$$S(\tau) = \left\{ \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} [x(t) - y(\tau)]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad \tau = 1, 2 \quad (4)$$

极差和标准差之间存在一定的关系:

$$\frac{R(\tau)}{S(\tau)} = (C\tau)^H \quad (C \text{ 是常数}) \quad (5)$$

对式(5)两边取对数可得:

$$\log \left[\frac{R(\tau)}{S(\tau)} \right] = H \cdot \log \tau + H \cdot \log C \quad (6)$$

以 $\log \tau$ 为因变量, $\log [R(\tau)/S(\tau)]$ 为倚变量, 绘制散点图, 采用最小二乘法估计, 求得的直线斜率 H 即为赫斯特指数。

赫斯特指数的取值范围可以反映出时间序列的重要信息, 一般 $0 \leq H < 0.5$ 时, 时间序列呈反持续性; $H = 0.5$ 时, 时间序列为独立同分布的随机游走序列; $0.5 < H \leq 1$ 时, 时间序列呈持续性, 即序列在某一个时刻存在某种变化趋势, 在未来的某一段时间内, 序列会呈现出相同的趋势。赫斯特指数越接近 1, 证明这种状态持续性表现的越明显。

2.2. 具体应用

利用赫斯特指数分析桃林口水库年径流、汛期径流和非汛期径流数据, 并绘出以 $\log \tau$ 为自变量, 以 $\log [R(\tau)/S(\tau)]$ 为因变量的散点图, 通过最小二乘法求得赫斯特指数, 结果见表 1 和图 1~3。

可以看出, 桃林口水库年径流和汛期径流直线拟合效果较差, 非汛期径流之间拟合效果较好。桃林口水库年径流量序列的赫斯特指数为 0.4880, 汛期径流序列的赫斯特指数为 0.4915, 赫斯特指数小于 0.5, 均具有反持续性, 表明桃林口水库年径流和汛期径流序列的趋势会在未来有所上升, 但其赫斯特指数与 0.5 很接近, 因此这种下降趋势的反持续性并不是十分明显。桃林口水库非汛期径流序列的赫斯特指数为 0.5373, 说明其具有持续性, 非汛期序列在未来会继续下降, 但赫斯特指数距离 1 有一定距离, 因此, 这种持续性并不是十分明显。

3. 突变性分析

水文情势变化的影响因素较多, 其中某些因素的变异会促使水文序列统计特征值发生较大变化, 从而使水文时间序列偏离一致性[5]。常用的水文时间序列突变点检验法[3]有很多, 本文采用 Mann-Kendall 秩次相关检验

Table 1. Hurst indices of runoff series

表 1. 径流序列赫斯特指数表

径流序列	H	分析结果
年径流	0.4880	具有反持续性
汛期径流	0.4915	具有反持续性
非汛期径流	0.5373	具有持续性

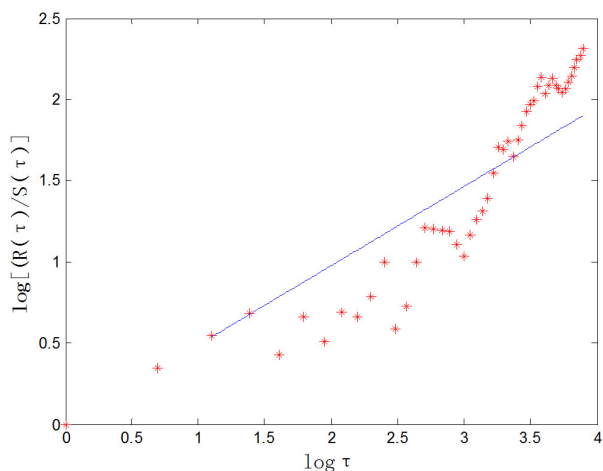


Figure 1. The analysis result for annual runoff
图 1. 年径流量持续性分析结果

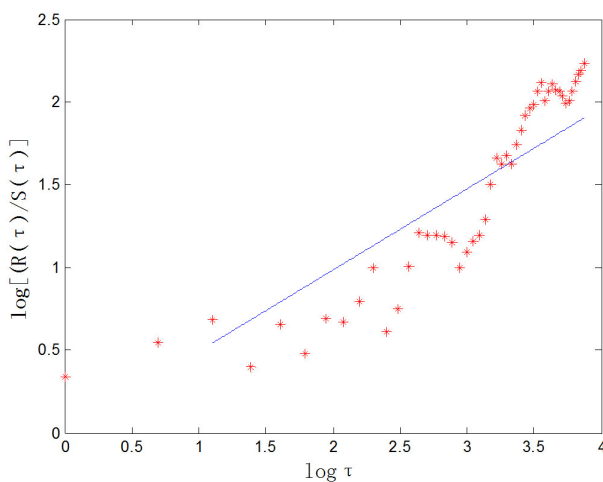


Figure 2. The runoff analysis results in the flood season
图 2. 汛期径流持续性分析结果

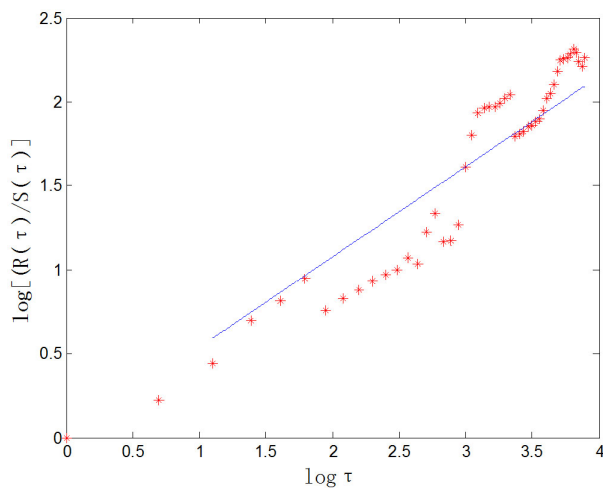


Figure 3. The runoff analysis results in the non-flood season
图 3. 非汛期径流持续性分析结果

法对桃林口水库径流系列进行突变性分析。

3.1. Mann-Kendall 秩次相关检验法

假设样本容量为 n 径流序列 X , 构造其秩序列:

$$S_k = \sum_{i=1}^k r_i, r_i = \begin{cases} 1, & x_i > x_j \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad j = 1, 2, \dots, i \quad (7)$$

其中, 秩序列 S_k 是第 i 时刻数值大于 j 时刻数值个数的累计数。在时间序列随机独立的假定下, 定义统计量:

$$UF_k = \frac{S_k - E(S_k)}{\sqrt{\text{var}(S_k)}}, k = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

其中 $UF_1 = 0, E(S_k)$ 和 $\text{var}(S_k)$ 是累计数 S_k 的均值和方差, 在 X_1, X_2, \dots, X_n 相互独立, 且有相同连续分布时, 可由下式算出:

$$E(S_k) = \frac{n(n+1)}{4} \quad (9)$$

$$\text{var}(S_k) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{72} \quad (10)$$

UF_k 为标准正态分布, 为了便于对比上一节得出的趋势性结论, 给定显著水平 $\alpha = 0.05$ 作为临界线, 查找正态分布表, $U_{0.05} = 1.96$ 。若 $|UF_k| \geq U_{0.05}$, 则表明序列存在明显的趋势变化, 反之则没有显著趋势。

重组时间序列 X 的逆序列, 重复上述过程, 同时使 $UB_k = -UF_k, k = n, n-1, \dots, 1, UB_1 = 0$ 。将 UF_k 和 UB_k 两个统计量绘制成曲线, 若 $UF_k > 0$ 或 $UB_k > 0$, 则说明序列呈上升趋势, 反之说明序列呈下降趋势。当他们超过临界线的范围确定为出现突变的时间区域, 若两条曲线出现交点, 且交点在临界线之内, 那么交点对应的时刻便是突变开始的时间。

3.2. 径流序列突变性分析结果

根据 Mann-Kendall 秩次相关检验法计算桃林口水库年径流量序列的 UF_k 和 UB_k 两个统计量, 突变性检验分析结果如图 4 所示。根据 UF_k 和 UB_k 两个统计量曲线的交点, 可以初步判断, 突变点在 1992 年和 1997 年, 但两条曲线相交以后没有超过置信区间, 因此不是显著突变。

由上图可以看出桃林口水库年径流量序列的 UF_k 值曲线整体呈波动下降趋势。1957 年~1980 年整体呈上升趋势, 1981 年~2006 年呈下降趋势。从 UB_k 值曲线来看, 年径流量序列呈下降趋势, 这个结论与上一节得到的趋势性检验结果基本一致。

计算桃林口水库汛期径流序列的 UF_k 和 UB_k 两个统计量, 突变性检验分析结果如图 5 所示。根据 UF_k 和 UB_k 两个统计量曲线的交点, 可以初步判断, 突变点在 1999 年, 两条曲线相交后没有超过置信区间, 因此不是显著突变。

由上图可以看出桃林口水库汛期径流序列的 UF_k 值曲线整体呈波动下降趋势。1957 年~1982 年整体呈上升趋势, 1983 年~2006 年呈下降趋势。从 UB_k 值曲线来看, 汛期径流量序列呈下降趋势, 这个结论与上一节得到的趋势性检验结果基本一致。

计算桃林口水库非汛期径流序列的 UF_k 和 UB_k 两个统计量, 突变性检验分析结果如图 6 所示。根据 UF_k 和 UB_k 两个统计量曲线的交点, 可以初步判断, 突变点在 1989 年和 2002 年, 两条曲线相交以后超出置信区间, 突变是否显著需要进一步检验。

可以看出桃林口水库非汛期径流序列的 UF_k 值曲线整体呈波动下降趋势。1957 年~1983 年整体呈上升趋势,

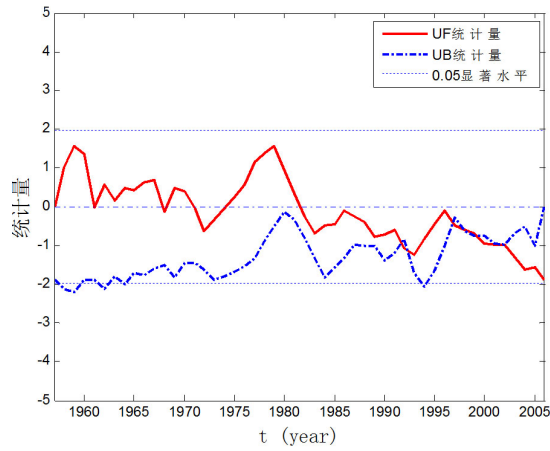


Figure 4. The annual runoff abrupt change detected results in Taolinkou reservoir

图 4. 桃林口水库年径流突变性检验结果

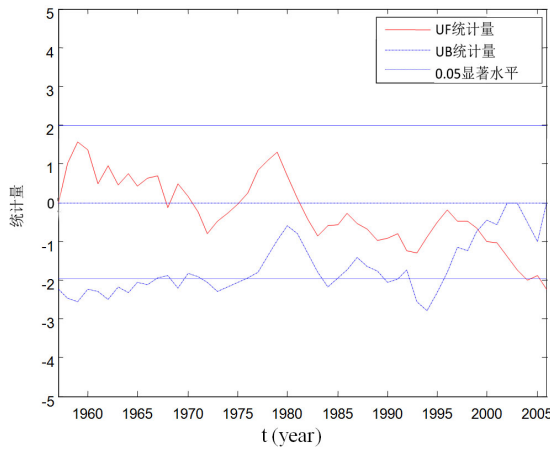


Figure 5. The runoff abrupt change detected results in the flood season at Taolinkou reservoir

图 5. 桃林口水库汛期径流突变性检验结果

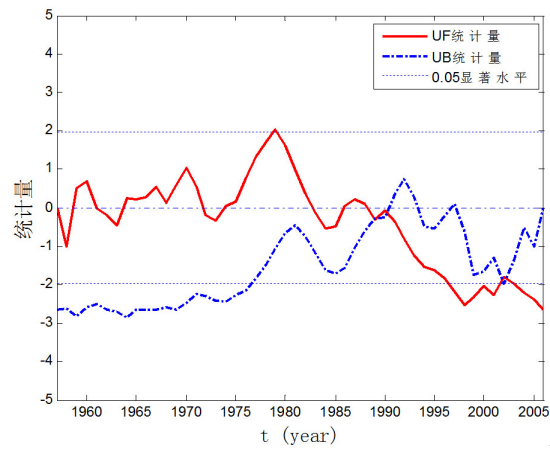


Figure 6. The runoff abrupt change detected results in the non-flood season at Taolinkou reservoir

图 6. 桃林口水库非汛期径流突变性检验结果

Table 2. The results of slide T test

表 2. 滑动 T 检验结果

径流	年份	统计量 T	临界值	判别结果	显著性
非汛期径流	1989	2.01	2.101	$ T < T_{\alpha/2}$	不显著
	2002	-2.00	2.160	$ T < T_{\alpha/2}$	不显著

1984 年~2006 年呈下降趋势。从 UB_k 值曲线来看, 非汛期径流量序列整体呈下降趋势, 这个结论与上一节得到的趋势性检验结果基本一致。

3.3. T 检验法进行突变点的精确识别

通过 Mann-Kendall 秩次相关检验法得出得到桃林口水库非汛期年径流的突变点为 1989 年和 2002 年, 并且超过置信区间, 下面将采用滑动 T 检验法对突变点进行精确识别, 判断其是否发生显著突变。

已知的径流序列 $x_t (t = 1, \dots, n)$, 分别取突变点前后相邻的连续 n_1 和 n_2 年径流值计算统计量 T 值。

$$T = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{S \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \quad (11)$$

$$S = \sqrt{\frac{(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2}{n_1 + n_2 - 2}} \quad (12)$$

式中, \bar{x}_1, \bar{x}_2 , s_1 和 s_2 分别为连续 n_1 和 n_2 年的均值和标准差。

计算出统计量 T, 给定显著水平 $\alpha = 0.05$, 自由度 $n = n_1 + n_2 - 2$ 查 t 分布表得到 $T_{\alpha/2}$ 值。当 $|T| > T_{\alpha/2}$ 时, 表明序列在该点存在显著性变异, 则该点为突变点。

在 1989 年前后分别取 $n_1 = n_2 = 10$, 即 1979 年~1988 年和 1989~1998 年, 在 2002 年前取 $n_1 = 10$, 即 1992 年~2001 年, $n_2 = 5$, 即 2002 年~2006 年。自由度 $n = 18$ 时, $T_{\alpha/2} = 2.101$, $n = 13$ 时, $T_{\alpha/2} = 2.16$ 。经过计算, 滑动 T 检验结果如表 2 所示。突变点 1989 年和 2002 年均没有通过显著性检验, 因此非汛期径流没有发生显著突变。

4. 结论

本文对桃林口水库的年径流、汛期径流和非汛期径流的发展趋势和突变性进行检验, 采用 Mann-Kendall 检验法可知, 桃林口水库的年径流、汛期径流及非汛期径流序列都存在显著的下降趋势, 可以看出桃林口水库各径流序列呈现出逐年递减的趋势, 这主要与降水的变化趋势有关, 与实际情况相符; 采用重标极差法对三种序列趋势性的持续性进行检验, 发现年径流和汛期径流序列的趋势性存在反持续性, 非汛期径流趋势性存在持续性, 根据所求出的赫斯特取值可以看出, 无论是持续性还是反持续性, 均不明显; 采用 Mann-Kendall 秩次相关检验法检验三种径流序列突变性, 可以确定桃林口水库年径流序列的突变点为 1992 和 1997 年, 汛期径流的突变点为 1999 年, 非汛期径流序列的突变点为 1989 年和 2002 年。对于超过临界区间的突变点, 采用滑动 T 检验法进行精确识别后发现, 非汛期径流所得的两个突变点均没有通过显著性检验, 没有发生显著突变。三种径流序列均没有发生显著突变, 因此无需考虑剔除突变点。

通过本文研究可知, 桃林口水库的径流序列呈现出一定的趋势性及突变性, 通过研究其变化特性, 进而分析桃林口水库的径流演变规律, 对以后的径流预测及水库调度工作提供借鉴及技术支持。

参考文献 (References)

- [1] 吕静渭. 泾河流域径流变化规律与预报模型研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西北农林科技大学, 2010.
LV Jingwei. Study On The runoff change characteristic and forecast model in Jingheriver basin. Xi'an: North West Agriculture and Forestry University, 2010. (in Chinese)
- [2] 雷红富, 谢平, 陈广才, 李晶. 水文序列变异点检验方法的性能比较分析[J]. 水电能源科学, 2007, 25(4): 36-40.
LEI Hongfei, XIE Ping, CHEN Guangcai and LI Jing. Comparison and analysis on the performance of hydrological time series change-point testing methods. Water Resources and Power, 2007, 25(4): 36-40. (in Chinese)
- [3] 肖志国. 几种水文时间序列周期分析方法的比较研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 河海大学, 2006.
XIAO Zhiguo. Comparison of different analysis methods for the periodicity of hydrological time series. Nanjing: Hohai University, 2006. (in Chinese)
- [4] 燕爱玲, 黄强, 刘招, 王义民. R/S 法的径流时序复杂特性研究[J]. 应用科学学报, 2007, 25(2): 214-217.
YAN Ailing, HUANG Qiang, LIU Zhao and WANG Yimin. Complicated property of runoff time series studied with R/S method. Journal of Applied Sciences, 2007, 25(2): 214-217. (in Chinese)
- [5] 王孝礼, 胡宝清, 夏军. 水文时序趋势与变异点的 R/S 分析法[J]. 武汉大学学报(工学版), 2002, 35(2): 10-12.
WANG Xiaoli, HU Baoqing and XIA Jun. R/S analysis method of trend and aberrance point on hydrological time series. Engineering Journal of Wuhan University, 2002, 35(2): 10-12. (in Chinese)