

基于 Mann – Kendall 法的径流丰枯变化过程划分

于延胜, 陈兴伟

(福建师范大学 地理科学学院, 福建 福州 350007)

摘要: 提出利用 Mann – Kendall 法, 将已有径流时间序列划分为若干个时间序列, 计算出每一个时间序列的 U 值, 以 $U - t$ 曲线的变化趋势来划分径流序列的丰枯变化过程; 以闽江流域竹岐站和白山水库的径流序列为例进行分析。结果表明: 闽江流域径流丰枯变化过程为 1946 – 1996 年, 白山水库丰枯变化较闽江流域频繁, 分别为 1946 – 1966 年和 1967 – 1975 年, 且第三个丰枯变化过程还没有完成。由于 Mann – Kendall 法属于非参数检验, 受样本的分布类型限制比较少、样本中可允许少量漏测值以及方法比较简单适用等特点, 因此, Mann – Kendall 法可以和应用差积曲线法划分丰枯变化过程的方法互为补充。

关键词: Mann – Kendall 法; 差积曲线; 丰枯变化过程; 径流序列

中图分类号: P333.9

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2013)01-0060-04

Division of variation process of high and low runoff based on Mann – Kendall method

YU Yansheng, CHEN Xingwei

(College of Geographical Science, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China)

Abstract: The paper presented a method to divide the variation of high and low flow by using the Mann – Kendall method. Firstly, a runoff time series were divided into several time series, and then, the U values of the series were calculated to obtain. Finally, the variation process of high and low runoff was determined according to the $U - t$ curve. The runoff series of Zhuqi gauge station in the Minjiang River watershed and Baishan reservoir were analyzed as example. The results showed that the annual stream flow sequence with variation process of high and low runoff was 1946 to 1996 in the Mingjiang River. The variation of high and low runoff in the Baishan reservoir was 1946 to 1966 and 1967 to 1975 respectively, and the third variation one wasn't completed up to now. The result also showed that the Mann – Kendall method was applicable in dividing the variation of high and low runoff.

Key words: Mann – Kendall method; different curve; variation process of high and low runoff; runoff series

0 引言

径流丰枯变化过程是径流年际变化中重要的水文特征, 研究径流的丰枯变化过程有着十分重要的意义。然而径流丰枯变化过程及其特征的研究必须以丰枯变化过程的划分为前提。目前, 划分径流丰枯变化过程的方法尚不多见, 其中, 穆兴民等^[1]用差积曲线研究了黄河天然径流年际变化过程, 张少文等^[2]用 Markov 过程划分黄河天然年径流长期的丰枯变化, 赵太想等^[3]提出了利用投影寻踪分类模型进行径流丰枯分类。然而差积曲线受样本值和均

值影响, 且不能有漏测值, Markov 和投影寻踪分类模型主要是将径流序列进行丰、特丰、枯和特枯年份的划分, 无法体现丰枯段的变化过程, 且划分方法比较复杂。

Mann – Kendall 法是 Mann 在 1945 年首次提出, 而后 Kendall 在 1975 年对该方法进行了改进, 形成了 Mann – Kendall 法。该方法属于非参数检验, 由于不受样本值、分布类型等的影响, 因此, 在水文学中有着十分广泛的运用。目前, Mann – Kendall 方法主要运用在两个方面, 其一, 它可以检验一个序列是否有显著的趋势特征, 如 Khaled H. Hamed、Don-

收稿日期: 2012-09-27; 修回日期: 2012-10-23

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(50979015); 福建省科技计划重大项目(2010Y4001)

作者简介: 于延胜(1983-), 男, 四川宣汉人, 硕士, 研究方向: 水文水资源。

通讯作者: 陈兴伟(1963-), 男, 教授, 博导, 研究方向: 水资源环境。

ald. H、Jiang. T、曹建廷、张建云和徐宗学等^[4-9];其二,它可以识别一个序列是否有突变点,但突变点的识别通常是与趋势检验一起分析,如王生雄、李红军和陈华等^[10-12]。本文尝试用 Mann - Kendall 法,来划分径流丰枯变化过程。

1 Mann - Kendall 法原理和划分步骤

1.1 Mann - Kendall 法原理

Mann - Kendall 检验具体原理^[13]如下。

假设 $X_i(t = 1, 2, \cdots)$ 为一时间序列,先确定其序列的对偶数的个数 p ,通常对偶数是先取 X_1 ,然后与 $X_2, \cdots, X_n$ 比较,当 $X_1 < X_2, \cdots, X_n$ 时, p 就加 1,再选择 X_2 与 $X_3, \cdots, X_n$ 比较,以此类推,最后求出 p 的值。对偶数 p 的计算公式如下。

$$p = \sum_{i=1}^k r_i, k = 2, 3, \cdots, n \tag{1}$$

式中: $r_i = \begin{cases} +1, & \text{当 } x_i < x_j \\ 0, & \text{当 } x_i \geq x_j \end{cases} \quad j = 1, 2, \cdots, i。$

再根据 p 值确定 τ ,进而得出 $Var(\tau)$ 和 U ,其公式如下:

$$\tau = \frac{4p}{n(n-1)} - 1 \tag{2}$$

$$Var(\tau) = \frac{2(2n+5)}{9n(n-1)} \tag{3}$$

$$U = \frac{\tau}{Var(\tau)^{1/2}} \tag{4}$$

当 $|U| > U_{0.05} = 1.96$ 时,表示序列趋势变化显著,反之则没有显著趋势。

1.2 划分丰枯变化过程的步骤

通常, Mann - Kendall 方法检验趋势和突变特征主要是针对整个序列。当一个序列给定时,利用 Mann - Kendall 方法计算出 U 值,再将计算出 U 值与假设的置信水平标准值进行比较,当 U 值大于标准值时,表明有显著的趋势和突变特征;反之,则没有显著的趋势和突变特征。 Mann - Kendall 方法的上述功能主要是以整个序列进行分析,较少将整个序列再分成若干个序列进行分析和探讨。实际上,可以通过将整个序列分成若干序列,探讨该方法的新功能。根据 Mann - Kendall 方法特点,划分丰枯变化过程的的主要步骤如下。

1.2.1 序列 U 值的计算 ①假设一时间序列 $X_1, X_2, \cdots, X_n$ 。由于 Mann - Kendall 方法要求至少要 10 个样本数据^[14],可以设 $t = 11$ 为基准,每次增加 1 个样本,从而构成若干个时间序列,也即是 $t \in$

$(11, n)$ 。整个序列就分成了 $n - 11$ 个时间序列。②当得出 $n - 11$ 个不同的时间序列后,再利用 1.1 所述的方法,计算出每一个时间序列的 U_t ,然后以 U_t 为纵坐标,作横坐标得到 $U - t$ 曲线图。

1.2.2 序列丰枯分段 时间序列在不同阶段性表现出不同的特征,同一阶段内的序列变化表现出相同的特征,因而,阶段的变化可以表现出序列的变化状况。又由于 1.2.1 得出整个序列的 U 值曲线图,该图有明显的阶段变化,且在一段时间内变化相同,而在另一时间段内变化则不同,因此,可以 U 值曲线体现序列的变化状况。

分 U 值曲线图的变化趋势发现,当 U 值曲线呈上升趋势时,对应为丰水段;当 U 值曲线呈下降趋势时,为枯水段;没有明显的变化,则为平水段。由此可以得到整个序列的丰枯变化过程。除此之外, U 值曲线还准确地体现丰水段、平水段和枯水段各段的时间长度及段与段之间的变化。

2 实例研究

2.1 实例一:闽江流域竹岐站径流序列丰枯的划分

2.1.1 闽江流域竹岐站概况 闽江流域位于 $116^{\circ}23' \sim 119^{\circ}35'E, 25^{\circ}23' \sim 28^{\circ}16'N$,是我国东南沿海最大的河流,地处亚热带季风气候区,全长 541 km,流域面积为 $60\,992\text{ km}^2$,其中,福建省境内面积为 $59\,922\text{ km}^2$,占流域面积的 98.2%。闽江流域径流十分丰富,流域面积比闽江大 11 倍多的黄河,水量却只及闽江的 92%,多年平均径流量 $1\,980\text{ m}^3/\text{s}$ 。闽江流域竹岐站位于闽江下游,控制流域面积 $54\,500\text{ km}^2$,控制面积占整个流域面积的 89.6%。了解该站的径流特征,对于了解闽江流域中、上游的径流变化有着十分重要意义。

2.1.2 径流序列丰枯变化过程的划分 利用闽江流域竹岐站近 70 年的径流序列(1936 - 2004 年),根据 1.2 所述步骤,计算所得闽江流域竹岐站径流序列的 $U - t$ 变化曲线为图 1 所示。

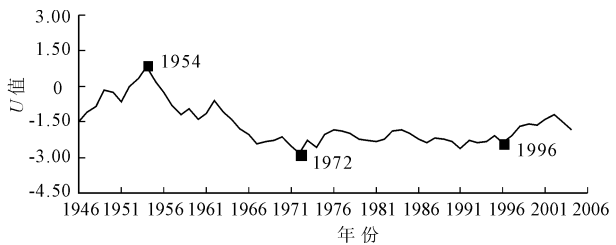


图 1 闽江流域竹岐站 1936 - 2004 年径流序列 U 曲线图

由图 1 可得,因为 Mann - Kendall 法要求要有 10 个样本数据,闽江流域竹岐站径流序列的 U 值是从 1946 年开始。径流序列在 1946 - 1954 年是丰水段,1955 - 1972 年是枯水段,1973 - 1996 年是平水段,此后进入新一轮丰枯变化的水文周期。由此可见,闽江流域竹岐站径流序列丰枯变化过程为 1946 - 1996 年。

为了证明 Mann - Kendall 法结果的可信性,再利用差积曲线进行佐证。图 2 所示的结果与图 1 的结果完全吻合,表明 Mann - Kendall 法可以应用于径流序列的丰枯划分。

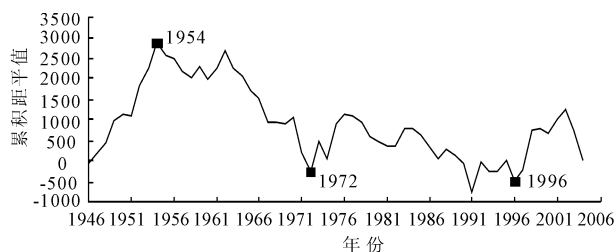


图 2 江流域竹岐站 1946 - 2004 年径流序列差积曲线图

2.2 实例二:白山水库入库径流序列丰枯划分

为了进一步的证明其方法的适用性,再以我国东北地区的白山水库为例进行分析。由于两流域地理位置差异较大,气候与下垫面条件有很大不同,具有一定的代表性。

2.2.1 白山水库概况 白山水库^[15]坐落在长白山脚下,第二松花江上游,位于头道松花江与二道松花江汇合口以下 12 km,吉林省桦甸县和靖宇县交界处。第二松花江上游又有两源:南源头道江、北源二道江,均发源于白头山。两源在吉林靖宇县交界。从两江口到丰满电站坝址,为第二松花江的上游江段,长 208 km,集水面积 24 237 km²。段内有较大支流蛟河和辉发河汇入,已建有梯级水电站白山、红石和丰满电站,其中,白山水库是一座以发电为主,兼有防洪、养殖等综合利用的大型水利工程。白山水库流域面积 19 000 km²,地处高寒山区,属温带大陆性季风气候,多年入库平均流量为 239 m³/s,了解该站径流的丰枯变化过程对水库水资源的利用的重要的作用。

2.2.2 径流序列丰枯变化过程的划分结果分析 同理,利用白山水库入库径流序列(1933 - 2000),得出白山水库径流序列^[16]的 $U - t$ 曲线如图 3。

同理,由图 3 可以看出,白山水库入库径流序列的 U 值是从 1943 年开始。径流序列在 1945 年发生了转折,因而可得 1946 - 1952 年为枯水段,其后丰水

段的末期较难判断,因为 1964 年和 1966 年的 U 值非常接近,且 1964 年的 U 值还略高,但通过计算 1965 年和 1966 年都为丰水年,且 1966 年以后, U 曲线下趋势明显,因此,将 1966 年作为丰水段的末期而不是 1964 年,也即是 1953 - 1966 年为丰水段,且没有平水段。以后又进入下一个丰枯变化。1967 - 1970 年为枯水段,1971 - 1975 年为丰水段,该过程也没平水段,这是第二个丰枯变化过程。相似地,第三个丰枯变化过程的枯水段为 1976 - 1985 年,1985 年以后,径流变化进入平水段,由于从已有的序列中丰水段没有出现,因此从 1985 年以后可作为另一个丰枯变化过程。白山水库入库径流序列经历了丰枯变化过程表明该区的径流丰枯变化较闽江流域频繁。同理,利用差积曲线方法也可以得到相同的结果(如图 4)。

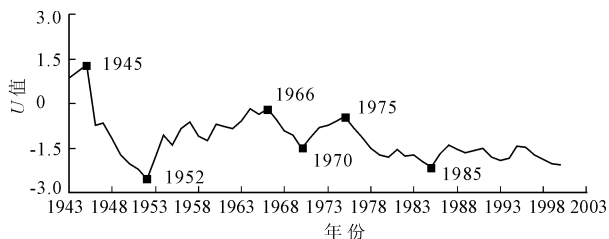


图 3 白山水库 1943 - 2000 年入库径流序列 U 值曲线图

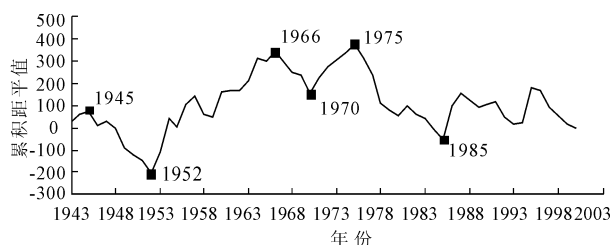


图 4 白山水库 1943 - 2000 年入库径流序列差积曲线图

3 结 语

提出了利用 Mann - Kendall 法进行径流序列丰枯变化过程划分的方法,应用结果表明:(1)闽江流域竹岐站径流序列丰枯变化过程为 1946 - 1996 年;白山水库径流序列的丰枯变化较闽江流域频繁,分别为 1946 - 1966 年和 1967 - 1975 年,且第三个丰枯变化过程还没有完成。

(2) 应用 Mann - Kendall 法划分径流序列的丰枯变化过程,是在 Mann - Kendall 法主要用于检验序列趋势特征和突变特征的基础上,对其功能的扩展,扩展了 Mann - Kendall 法的应用范围。

(3) 由于 Mann - Kendall 方法要求样本序列至少要有 10 个样本数据,因此,该方法没有完整地反映径流序列,也即说,序列前 10 年的丰枯变化过程

无法得知,表明 Mann-Kendall 法划分丰枯变化过程也存在着不足。但由于 Mann-Kendall 法属于非参数检验,由于受限制比较少,如不要求样本的分布类型、样本中可允许少量漏测值,以及方法比较简单适用,而差积曲线受样本值影响较大,如果因某种原因,有漏测值,那么就无法计算其后的累积距平值。因此,Mann-Kendall 法和应用差积曲线法划分丰枯变化过程的方法互为补充。

参考文献:

- [1] 穆兴民,李靖,王飞,等. 黄河天然径流量年际变化过程分析[J]. 干旱区资源与环境, 2003,17(2):1-5.
- [2] 张少文,张学成,王玲,等. 黄河天然年径流长期丰枯状态变化特性研究[J]. 人民黄河, 2005,27(5):9-10.
- [3] 赵太想,王文圣,周秀平. 一种径流丰枯分类的新方法研究[J]. 人民黄河, 2006,28(5):12-13.
- [4] Khaled H Hamed. Trend detection in hydrologic data: the Mann-Kendall trend test under the scaling hypothesis[J]. Journal of Hydrology, 2008,349:350-363.
- [5] Donald H Burn, Mohamed A Hag Elnur. Detection of Hydrologic trends and variability[J]. Journal of hydrology, 2005,255:107-122.
- [6] Jiang T, Zhang Q, Blender R, et al. Yangtze delta floods and droughts of the last millennium: Abrupt changes and long term memory[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2005,10:131-141.
- [7] 曹建廷,秦大河,罗勇,等. 长江源区 1956-2000 年径流量变化分析[J]. 水科学进展, 2007,18(1):29-34.
- [8] 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.
- [9] 徐宗学,张楠. 黄河流域近 50 年降水变化趋势分析[J]. 地理研究, 2006,25(1):27-35.
- [10] 王生雄,魏红义,郑晓梅. 渭河流域径流趋势及突变分析[J]. 水资源研究, 2008,29(3):1-3.
- [11] 李红军,江志红,魏文寿. 近 40 年来塔里木河流域旱涝的气候变化[J]. 地理科学, 2007,27(6):801-806.
- [12] 陈华,郭生练,郭海晋,等. 汉江流域 1951-2003 年降水气温时空变化趋势分析[J]. 长江流域资源与环境, 2006,15(3):340-345.
- [13] 丁晶,邓育仁. 随机水文学[M]. 成都:成都科技大学出版社. 1988.
- [14] Mann-Kendall test for detecting trends[EB/OL]. [2011-03-03]. <http://www.minitab.com.au/support/macros/default.aspx?Action=display&cal=timeseries#92>.
- [15] 松花江概述[DB/OL]. [2012-05-20]. <http://baike.baidu.com/view/4214.htm>.
- [16] 王德智. 水文中长期预报的系统理论与方法研究[D]. 武汉:武汉大学,2003.
- [7] 江田汉,邓莲堂. Hurst 指数估计中存在的若干问题[J]. 地理科学, 2004,24(2):177-182.
- [8] 门宝辉,刘昌明,夏军,等. R/S 分析法在南水北调西线一期工程调水河流径流趋势预测中的应用[J]. 冰川冻土, 1994,27(4):568-573.
- [9] 姜晓艳,刘树华,马明敏,等. 东北地区近百年降水时间序列变化规律的小波分析[J]. 地理研究, 2009,26(2):354-362.
- [10] 张少文,丁晶,廖杰,等. 基于小波的黄河上游天然年径流变化特性分析[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2004,36(3):32-37.
- [11] 凌红波,徐海量,张青青,等. 新疆玛纳斯河年径流时序特征分析[J]. 中国沙漠, 2011,31(6):1639-1646.
- [12] 凌红波,徐海量,史薇,等. 西北干旱区典型绿洲气候因子非线性特征研究——以新疆石河子地区为例[J]. 中国沙漠, 2010, 30(4):968-975.
- [13] 凌红波,徐海量,张青青,等. 1957-2007 年新疆天山山区气候变化对径流的影响[J]. 自然资源学报, 2011,26(11):1908-1917.
- [14] Chen Y, Pang Z, Hao X, et al. Periodic changes of stream flow in the last 40 years in Tarim River Basin, Xinjiang, China[J]. Hydrological processes, 2008, 22(21):4214-4221.
- [15] 施雅风,沈永平,胡汝骥. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号,影响和前景初步探讨[J]. 冰川冻土, 2002, 24(3):219-226.
- [16] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京:气象出版社, 1999.
- [17] 姜世中. 黄河源区达日至玛曲段近 50 年径流量变化趋势分析[J]. 地理研究, 2008, 27(1):221-228.

(上接第 59 页)