

变化环境下水文资料序列的可靠性与一致性分析

张利茹^{1,2,3}, 王兴泽⁴, 王国庆^{1,2}, 刘九夫^{1,2}, 李圣明⁵

(1.南京水利科学研究院 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,江苏 南京 210029;

2.水利部应对气候变化研究中心,江苏 南京 210029;

3.水利部南京水利水文自动化研究所 水利部水文水资源监控工程技术研究中心,江苏 南京 210012;

4.河海大学水文水资源学院,江苏 南京 210098; 5.湖北水总水利水电建设股份有限公司,湖北 武汉 430034)

摘要:由于气候变化和人类活动的双重影响,实测水文系列会发生一定程度变化,而水文资料的非一致性直接影响到水文模型参数的代表性,影响到水文模拟的精度和可靠性。选择黄河流域和淮河流域的两个典型支流,采用有序聚类法和 Mann-Kendall 检验法对其水文序列资料进行突变检测,结果表明,黄河流域黑石关站的水文序列在 1969 年以后发生了较大的变化,而淮河流域息县站的水文序列未发生明显变化,说明黑石关站水文序列自 1969 年以来受气候变化和人类活动等因素的影响比较大,在一定程度上破坏了该站水文序列的一致性。相比而言,息县站流域受气候变化和人类活动的影响比较小,水文序列的稳定性较好。

关键词:气候变化;人类活动;有序聚类法;Mann-Kendall 检验;可靠性

中图分类号:P333

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2015)02-0039-05

近年来,流域产汇流规律及水文资料系列一致性和代表性受到气候变化和人类活动的双重影响,水文预报工作面临着新的挑战。气候变化和人类活动对水文的影响是水科学研究中的热点问题之一。气候变化是通过气温、降水等因素的改变来影响陆地水文循环系统,从而影响水文径流过程。而人类活动对水文的影响,主要是通过水利工程、土地利用、水土保持、雨水集蓄等方式改变了流域下垫面,使产汇流机制发生了变化,从而导致水文循环发生变化。人类活动引起的水文循环状况和水量平衡要素在时间、空间和数量上的变化。人类土地利用方式的改变、在河流上兴修水工建筑物、大面积灌溉和排水,和都市化及工业化等活动,必然会在不同程度上改变土地的覆盖状态,进而影响到以土地为下垫面的水文循环和水资源形成过程。在气候变化和人类活动双重影响下得到的水文系列资料就发生了较大的变化,水文资料的非一致性直接影响到水文模型参数的代表性,进而影响到水文模拟的精度

和可靠度,因此,在对水文模型参数优选前应首先分析水文系列资料的一致性。

1 流域概况

黄河是我国第二大河,发源于青藏高原巴彦喀拉山北麓,流经九省区后注入渤海。干流河道长5464km,流域面积 $79.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ (包括内流区 $4.2 \times 10^4 \text{ km}^2$)。黄河被分成上游、中游和下游,分界点是河口镇和河南郑州的桃花峪。黄河中游河段流经黄土高原地区,支流带入大量泥沙,使黄河成为世界上含沙量最大的河流。本文选取黑石关水文站,一是因为它是黄河三-秦间主要支流——伊洛河的把口站,是国家重点水文站,主要承担着收集伊洛河流域水文资料和向黄河下游各级防汛指挥部门提供水情的任务,二是因为最新的研究结果表明,黄河流域径流锐减主要发生在黄河中游地区^[1],黑石关站流域水系见图1(a)。

淮河流域位于我国东部,介于长江、黄河之间,是

收稿日期:2014-02-11

基金项目:国家973重点基础研究发展计划项目(2010CB951103);国家自然科学基金项目(41330854,41371063);江苏省“333工程”培养资金资助项目(BRA2012203)

作者简介:张利茹(1981-),女,河南漯河人,博士研究生,主要从事流域水文模拟和气候变化等研究。E-mail:lrzhang@nhri.cn

我国第三大河,起源于桐柏山、伏牛山。淮河上游段主要位于河南省境内,山区、丘陵区居多,地势东低西高,高差悬殊。地处我国南北气候过渡带,冷暖气团活动频繁,天气系统复杂多变,降雨时空分布很不均匀,易形成暴雨洪水。年降水量 800~1 400mm,空间分布不均,年际变化较大。选取息县站以上淮河流域为研究对象,息县以上淮河上游区流域水系见图 1(b)。

2 选用资料及其可靠性分析

两个不同气候区典型流域重点控制水文站基本情况及资料年限见表 1。两个流域降水资料的处理是应用各典型流域内站点的日降水量资料,根据双泰森多

边形计算方法求得各子流域的面雨量。

水文模拟一般要求所使用的资料具有良好的一致性。由于近几十年来气候变化和大规模人类活动的影响,流域的下垫面情况变化显著,在一定程度上破坏了水文资料系列的一致性。因此应首先研究流域系列资料的一致性问题。针对以上两个流域资料的实际情况,分别建立了各个流域月降雨量和月径流深的关系,如图 2 所示。

由图 2 可知,息县站所对应流域的月降雨量和月径流深关系在研究时段内未发生明显变化,降雨量和径流量存在较好的一致性,其降雨径流相关系数达到 0.7013。而对于黑石关站所对应流域,其降雨量和径流

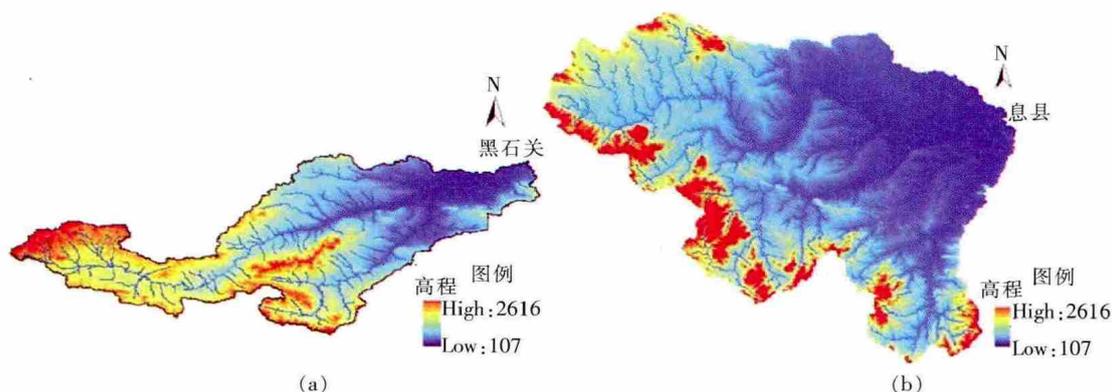


图1 研究流域水系图

Fig.1 River system in the study basins

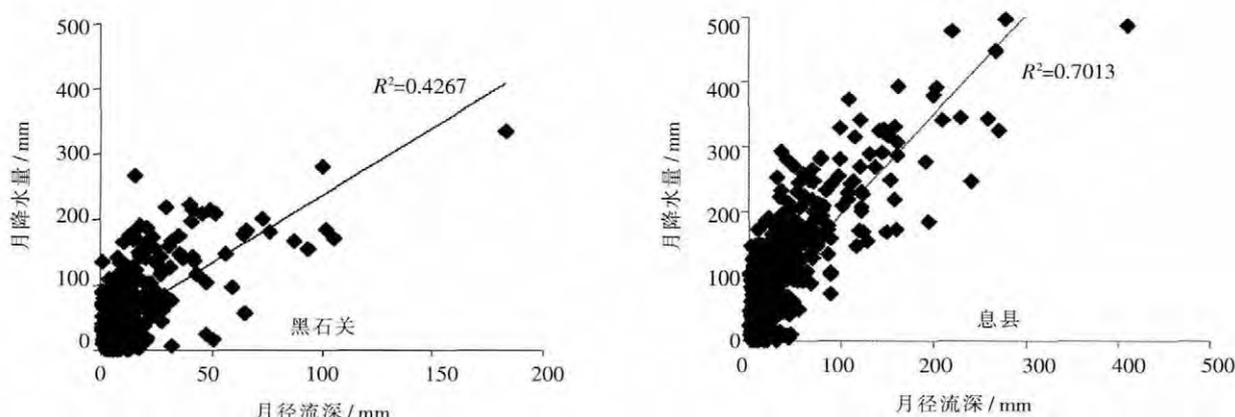


图2 月降雨量~月径流深关系图

Fig.2 The relationship between the monthly rainfall and runoff

表1 各典型流域水文站基本情况

Table 1 The basic information for hydrological stations in four different climate zones

流域	控制站	经纬度/°		控制面积/km ²	资料年限	多年平均径流量/m ³ ·s ⁻¹
		经度	纬度			
黄河流域	黑石关	112.93	34.72	18 563	1958~2010	84.8
淮河流域	息县	114.73	32.33	11 090	1951~2008	120.6

量相关系数仅为 0.4267,相关性较差,在用于水文序列模拟之前,应对其水文序列资料进行突变检测分析,分析资料系列的可靠性。

3 典型流域水文序列突变点分析

理论上,天然条件应界定为测站以上未受任何人类活动影响的情况,但在实际中,自从有了人类,地球自然系统就面临着人类活动的干预^[2]。我们认为是“天然条件”很难说是真正的天然条件。在实际情况下,一般界定为未大量兴建水利工程时的状况。例如黄河流域,在以往的水沙变化研究中,根据水土保持措施在 1970 年以后比较显著这一事实,人为划定 1970 年作为水文序列变化的转折年份^[3,4],实际上,不同地区水土保持具体实施的时间不一,流域下垫面情况各异,流域上人类活动干预的程度也不一样,而且,人类活动产生的水文效应有一定的滞后性,因此仅靠水土保持实施年份来划分水文序列是否显著变化是合理但缺乏理论支撑的。

3.1 水文序列突变点分析方法

3.1.1 有序聚类分析方法

以有序分类来推估最可能的突变点 τ , 实质是寻求最优分割点,使同类间的离差平方和较小而类与类之间的离差平方和较大。

对于水文序列 x_1, x_2, \dots, x_n , 最优二分割法的要点如下:

设可能的突变点为 τ , 则突变前后的离差平方和分别为

$$V_\tau = \sum_{i=1}^{\tau} (x_i - \bar{x}_\tau)^2; V_{n-\tau} = \sum_{i=\tau+1}^n (x_i - \bar{x}_{n-\tau})^2 \quad (1)$$

式中: $\bar{x}_\tau, \bar{x}_{n-\tau}$ 分别为 τ 前后两部分的均值。

这样总离差平方和为

$$S_n(\tau) = V_\tau + V_{n-\tau} \quad (2)$$

那么,当 $S = \min\{S_n(\tau)\} (2 \leq \tau \leq n-1)$ 时的 τ 为最优二分割点,可推断为最可能的突变点。

一般地,若序列有两个明显的阶段性过程,则总离差平方和的时序变化呈现单谷底现象;若有两个或两个以上的明显阶段性过程,则总离差平方和的时序变化则有两个以上的谷底,这样,可以根据谷底发生的时间划分序列变化的阶段。

3.1.2 Mann-kendall 法

Mann-Kendall 法是由 Mann 于 1945 年提出的非参数统计检验方法,在时间序列分析时, Mann-Kendall

法是世界气象组织推荐的非参数检验方法,并已经广泛地用来分析降水、径流和气温等要素时间序列的变化情况。其原理叙述如下:

对于具有 n 个样本量的时间序列 x , 构造一秩序列

$$S_k = \sum_{i=1}^k r_i \quad (k=2, 3, 4, \dots, n) \quad (3)$$

上式中

$$r_i = \begin{cases} +1 & \text{当 } x_i > x_j \\ 0 & \text{否则} \end{cases} \quad (j=1, 2, \dots, n)$$

可见,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:

$$UF_k = \frac{[S_k - E(S_k)]}{\sqrt{\text{var}(S_k)}} \quad (k=1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

其中 $UF_1=0; E(S_k), \text{var}(S_k)$ 是累计数 S_k 的均值和方差,在 x_1, x_2, \dots, x_n 相互独立,且有相同分布时,它们可以下面公式表示

$$E(S_k) = \frac{k(k+1)}{4} \quad (6)$$

$$\text{var}(S_k) = \frac{k(k-1)(2k+5)}{72} \quad (7)$$

UF_i 为标准正态分布,它是按时间序列 x 顺序 x_1, x_2, \dots, x_n 计算出的统计量序列,由下式算出。

给定显著性水平 α , 查正态分布表,若 $|UF_i| > U_\alpha$, 则表明序列存在明显的趋势变化。

按时间序列 x 逆序 x_n, x_{n-1}, \dots, x_1 , 再重复上述过程,同时使 $UB_k = -UF_k, k=n, n-1, \dots, -1, UB_1=0$ 。

通过分析统计序列 UF_k 和 UB_k , 不仅可以进一步分析序列 x 的趋势变化,还可以明确突变的时间,指出突变的区域。分析绘出的 UF_k 和 UB_k 曲线图,若 UF_k 或 UB_k 的值大于 0, 则表明序列呈上升趋势,小于 0, 则表明呈下降趋势。两统计序列构成的曲线分别记为 UF 和 UB , 当它们超过临界直线时,表明上升或下降趋势显著。如果超过显著性的临界值,则说明发生突变的几率很大。如果两条曲线出现交点,且交点在临界直线之间,那么交点对应的时刻就是突变开始的时刻。

3.2 研究流域水文序列资料突变分析

为了准确识别流域水文序列发生显著变化的变异点,首先对两个流域水文序列分别采用有序聚类法分析流域年径流序列发生变化的突变点。图 3 给出黑石关站和息县站水文序列有序聚类法的具体分析结果。

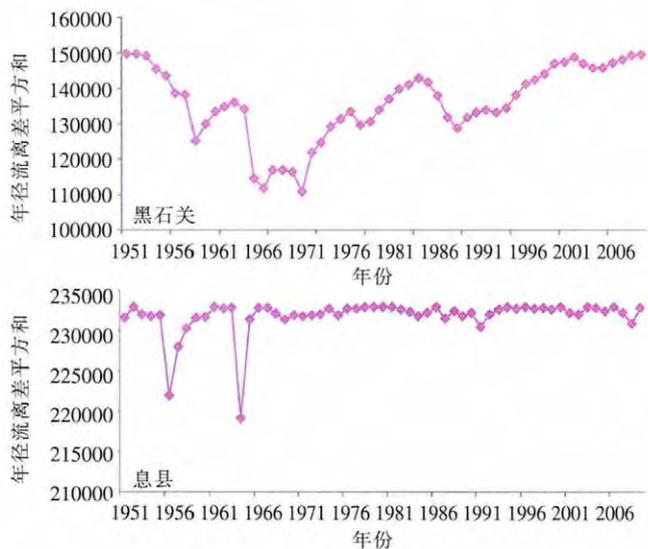


图3 各典型流域年径流离差平方和变化过程

Fig.3 Variation trend test for the annual runoff in various catchments

由图3可以看出,黄河流域黑石关站年径流离差平方和在1969年达到最小值,因此,初步认为这一年份是黑石关站流域水文序列显著变化的转折年份。而对于淮河流域的息县站,年径流离差平方和在1965年达到最小值,但在这一年份后的年径流离差平方和总体趋于平稳状态,水文序列资料变化不显著。

为了更精确地确定资料的一致性和代表性,进一步对两个流域采用Mann-Kendall非参数检验法来检验流量资料系列是否发生突变、突变开始的时间及突变区域。以显著性水平0.05的临界值±1.96为判别标准。图4给出黑石关站和息县站流域Mann-Kendall检验法的具体分析结果。

由图4黑石关站UF曲线可知,黑石关站径流量自1963年以来有一明显的递减趋势,1972年以后这

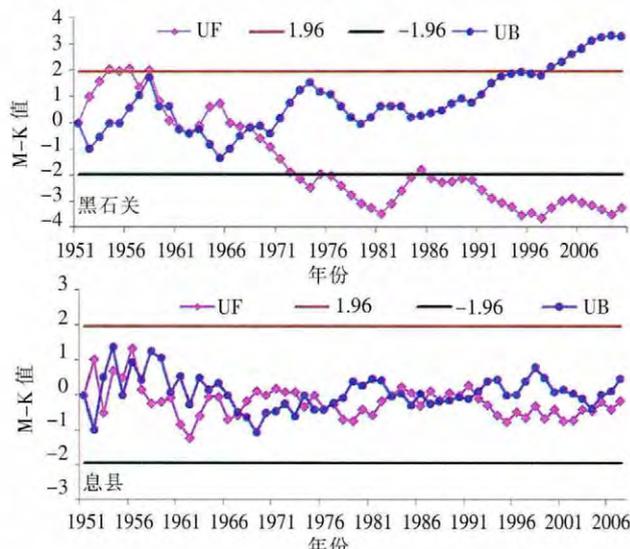


图4 各典型流域MK检验变化过程

Fig.4 Variation trend test for the annual runoff in various catchments

种递减趋势均大大超过显著性水平0.05的临界线,说明黑石关站径流量递减趋势十分显著。由图4黑石关站UF和UB曲线在1969年出现交点,且交点在临界线之间,则认定1969年是黑石关流域水文序列发生突变开始的时刻。而从息县站UF曲线可知,其M-K值均落在显著性水平0.05的临界值±1.96的范围内,说明系列无明显变化趋势,这一研究结果与有序聚类法的研究结果相一致。

为了验证上述两种突变检测方法的分析结果,对突变点前后的降雨径流关系分别进行分析,黑石关站的突变年份选择两种突变检验法的共有突变年份,也就是1969年。而息县站的突变检验年份选择有序聚类法的突变检测结果,即1965年。图5分别给出了两个典型流域突变年份前后的降雨径流关系。

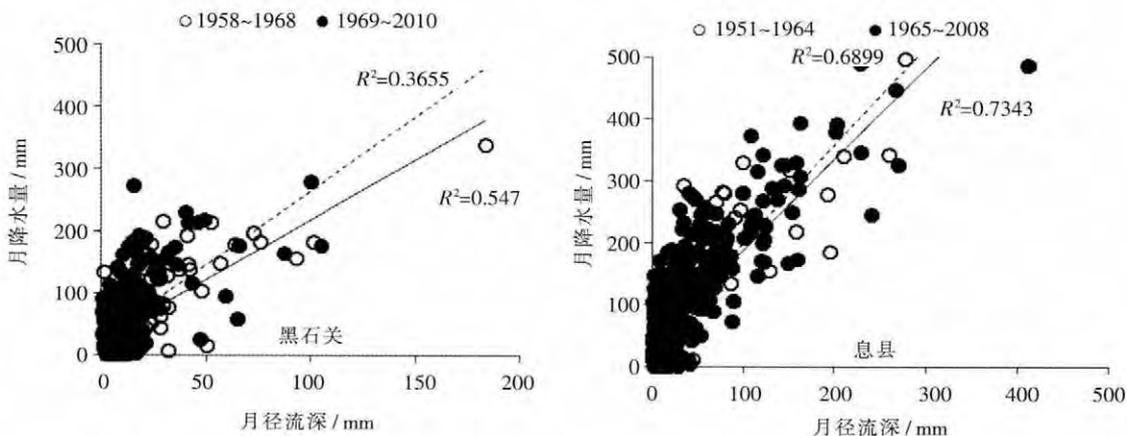


图5 突变年份前后的月降雨量~月径流深关系图

Fig.5 The relationship between the monthly rainfall and monthly runoff

由图 5 知,黑石关站突变年份 1969 年前的月降雨-径流关系系数是 0.547,而突变年份之后的月降雨-径流关系系数更差,仅为 0.366,这说明黑石关站流域自 1969 年以来水文序列资料的一致性遭到很大的破坏,资料不能直接用于水文模型的参数率定,应首先对资料进行还原分析。而息县站突变年份 1965 年前后的月降雨-径流关系系数相差不是很大,分别为 0.734 和 0.690,说明该流域还未遭到大规模的气候变化和人类活动的影响,水文序列资料的一致性和代表性还比较好,可直接用于水文模型参数的率定。

4 结论和展望

由于环境变化以及经济社会的发展,水文资料序列的一致性和代表性遭到破坏,直接由水文序列资料得到的模型参数就失去了原有的物理意义,因此,变化环境下的水文序列资料不能直接用于水文模型参数的率定,应首先对水文序列资料进行突变检测分析,然后再进行还原分析计算。尤其是近年来,缺乏资料地区在变化环境下的水文模拟的重要性显得更为

突出,由于无法获得足够的资料系列满足模型参数率定的要求,通过参数移植或流域下垫面地理信息的直接提取或通过建立水文模型参数与下垫面要素之间的关系来获取的水文序列资料的可靠性分析显得尤为重要。

参考文献:

- [1] 张建云,贺瑞敏,齐晶,等. 关于中国北方水资源问题的再认识[J]. 水科学进展, 2013,24(3):303-310. (ZHANG Jianyun, HE Ruimin, QI Jing, et al. A new perspective on water issues in North China [J]. Advances in Water Science, 2013,24(3):303-310. (in Chinese))
- [2] 李艳. 水文特征变异的尺度研究-理论、指标体系和评价方法[D]. 广州: 中山大学, 2007. (LI Yan. Study on scale of hydrological characteristic variation [D]. Guangzhou: Sun Yat-sen University, 2007. (in Chinese))
- [3] 陈霖巍. 黄河治理与水资源开发利用 [M]. 郑州: 黄河水利出版社, 1998. (CHEN Jiwei. The Yellow River Governance and Development and Utilization of Water Resources [M]. Zhengzhou: Yellow River Water Conservancy Press, 1998. (in Chinese))
- [4] 李勇,董雪娜,张晓华,等. 黄河水沙特性变化研究[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2004. (LI Yong, DONG Xuena, ZHANG Xiaohua, et al. Study on the Variation of the Yellow River Water and Sediment Characteristics [M]. Zhengzhou: Yellow River Water Conservancy Press, 2004. (in Chinese))

Consistency and Reliability Analysis of Hydrological Sequence in Environment Change

ZHANG Liru^{1,2,3}, WANG Xingze⁴, WANG Guoqing^{1,2}, LIU Jiufu^{1,2}, LI Shengming⁵

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing 210029, China; 2. Research Centre for Climate Change, MWR, Nanjing 210029, China; 3. Nanjing Automation Institute of Water Conservancy and Hydrology, Nanjing 210012, China; 4. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 5. Hubei Shuizong Water Resources & Hydropower Construction Co.LTD, Wuhan 430034, China)

Abstract: Because of the double impact of climate change and human activities, the hydrological sequence changed, so that the inconsistency directly impacted the representativeness of the hydrological data and the hydrological model parameters and affected the hydrological modeling accuracy and reliability. This paper selected two typical watersheds in the Yellow River Basin and Huaihe River Basin respectively, using the cluster method and Mann-Kendall test method for the hydrological sequence burst detection. It is found that the hydrological sequence data of the Heishiguan Station in the Yellow River Basin changed greatly after 1969, but the hydrological sequence data of the Xixian Station in the Huaihe River Basin had no obvious change. This result indicates that the hydrological sequence of the Heishiguan Station was greatly affected by the climate change and human activities after 1969, and the consistency of the hydrological sequence was destroyed in some extent. In contrast, the Xixian Station was less affected by climate change and human activities, and the stability of the hydrological sequence is better.

Key words: climate change; human activity; orderly cluster method; M-K test; reliability