

秃尾河年径流变异点综合诊断研究

杨筱筱^{1,2}, 王双银¹, 王建莹¹, 杨会龙¹

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 江西省水文局, 江西 南昌 330002)

摘要: 研究流域水文水资源的演变规律, 可为流域水资源开发利用和保护以及区域社会经济的可持续发展提供重要的决策依据。本研究以秃尾河流域出口水文站高家川站 1956—2004 年年平均流量和年降水量资料为主, 对该流域径流和降水的趋势性和跳跃性进行了分析诊断, 结果表明该流域降水的趋势性和跳跃性不显著; 而径流具有非常显著的减小趋势, 经多种方法综合诊断, 最终确定了该流域径流在 1978 年发生跳跃变异, 最后结合实际水文调查资料从成因上对结果进行了合理性论证。综合诊断有效地解决了单一检验方法检验结果可信度较差, 多种检验方法检验结果不一致的问题, 对复杂的时间序列变异点的识别与检验有一定的效果。

关键词: 变异点; 综合诊断; 秃尾河

中图分类号: P333 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7601(2014)02-0234-05

Research on the comprehensive diagnosis of change point of tuwei river's yearly runoff

YANG Xiao-xiao^{1,2}, WANG Shuang-yin¹, WANG Jian-ying¹, YANG Hui-long¹

(1. College of Water Resources and Architecture Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. Jiangxi Bureau of Hydrology, Nanchang, Jiangxi 330029, China)

Abstract: Research on evolution of hydrology and water resources in river basin can provide an important decision basis for the utilization and protection of basin water resources and regional sustainable development of economy and society. In this study, the watershed runoff and precipitation trends and variability are analyzed according to the annual flow and precipitation data in 1956—2004 of Tuwei River Watershed outlet station-Gaojiachuan station. The results show that the precipitation trend and variability is not obvious, and the runoff decreased significantly. It is determined eventually that the jump variation of runoff occurred in 1978 by comprehensive diagnosis with various methods. The rationality of results is reasoned according to its origin combined with actual survey. Comprehensive diagnosis effectively solves poor reliability for single test and inconsistency between various tests, and has certain effects for identification and test to variation point of complex time series.

Keywords: variation point; comprehensive diagnosis; Tuwei River

长期以来, 基于长序列观测样本的规律及成因分析是人们认识水文规律及其与影响因素交互关系的基本途径。降水和下垫面情况等因素均影响着径流的形成^[1], 这些因素的变化会破坏径流一致性。径流变异分析作为识别非一致性序列的有效手段, 可为分析径流物理成因及其水文效应提供理论基础。目前, 识别检验水文时间序列的变异方法很多^[2], 但是存在单一方法检验结果不可靠、多种方法检验结果不一致等问题, 使得水文时间序列变异识

别检验缺乏确定性和系统性^[3]。

秃尾河流域处于毛乌素沙地与黄土高原过渡带, 水土流失较严重, 20 世纪 70 年代初陕西省政府在秃尾河流域开展了大规模的水土保护综合治理工作: 封山育林、退耕还林, 改善生态环境; 改变耕作方式, 减少耕地冲刷侵蚀; 修建淤地坝, 拦蓄径流和泥沙。这些措施改变了流域下垫面条件, 使得流域径流特性发生了很大改变。本研究采用我国学者谢平提出的水文变异诊断系统对秃尾河流域年径流序列

收稿日期: 2013-07-05

基金项目: 西北农林科技大学基本科研业务费专项资金(QN2009088); 陕西省水利科技计划项目“陕北秃尾河流域水资源演变形势研究”

作者简介: 杨筱筱(1986—), 女, 陕西渭南人, 硕士, 研究方向为水资源利用与保护。E-mail: wangxiaxiaodd@163.com

通信作者: 王双银(1969—), 男, 甘肃镇原人, 副教授, 主要从事水文分析和水库调度方面研究。E-mail: wshy0806@nwsuaf.edu.cn。

进行变异诊断分析,确定其可能的变异点以及变异形式,探寻径流的相对变异规律,为研究变化情况下流域水文水资源演变过程及其原因提供可靠依据。

1 水文变异

通过对特定区域特定时段水文时间序列进行分析可认识气候、自然地理条件以及人为因素等综合作用对该地区水文要素的影响程度。水文时间序列变异是研究水文时间序列的一项重要内容,主要包括趋势和跳跃分析。趋势是水文序列稳定而规则的运动,是水文序列缓慢渐变的一种形式;跳跃是水文序列急剧变化的一种形式^[4]。

采用假设检验对水文序列的趋势或跳跃成分进行统计推断时,趋势推断较简单,结论也比较一致;而跳跃推断比较复杂,其发生的时间以及跳跃幅度可能由于所采用的检验方法不同而得出不同的结论^[5]。给定水文时间序列 $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$,假设变异点可能发生的位置为 $k(1 \leq k \leq n)$,则变异点将原序列分割成两部分,分别组成变异前序列和变异后序列^[6]。这两个序列的统计特征,如均值、方差、变差系数和偏态系数等有明显不同。水文时间序列的变异分析的主要任务就是识别和检验变异最有可能发生的时间和形式。采用以下公式来反映水文时间序列变异现象:

$$\begin{cases} X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\} \\ X_k = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_k\} \\ X_{k+1} = \{x_{k+1}, x_{k+2}, x_{k+3}, \dots, x_n\} \end{cases}$$

2 水文序列变异诊断系统

水文变异诊断由初步诊断、详细诊断和综合诊断3个部分组成。

2.1 初步诊断

初步诊断主要是检测水文时间序列是否存在趋势性和是否存在变异。对水文序列进行分析时,可以采用过程线法、滑动平均值法来检验序列是否存在趋势,Hurst系数法^[7]来检验序列是否存在变异以及变异程度。若序列不存在变异,则采用成因分析法对其进一步分析;若序列变异存在,则对变异成分进行详细诊断。

过程线法是通过点绘水文时间序列,通过目估判断序列的趋势是否明显,该方法计算方便,判断直观,但只能判别趋势显著的序列。由于水文序列的随机波动,直接从过程线难以判断其趋势,可采用滑动平均值法消除波动影响,使原序列光滑化,再判断

序列的趋势。

Hurst系数法是通过计算水文序列的Hurst系数 H 来判断序列是否变异及其变异程度。Hurst系数能从整体上反映序列长期相关性,这种长期相关性有可能导致水文序列变异,因而Hurst系数能从时间角度整体上对水文序列的变异进行表征。一般认为 $H=0.5$ 时,表明其过程是随机的; $H>0.5$ 时,原序列未来的变化趋势与过去的变化趋势相同,即原序列具有正持续效应; $H<0.5$ 时,原序列未来的变化趋势与过去的变化趋势相反,即原序列具有反持续效应。通常根据Hurst系数 H 与布朗运动增量函数之间的关系判断序列的变异程度^[7]。

2.2 详细诊断

详细诊断主要是针对水文时间序列的趋势成分和跳跃成分进行的,即采用多种方法对这两种成分进行检验。本研究采用三种方法对趋势成分进行详细诊断:相关系数检验法、Spearman秩次相关检验法、Kendall秩次相关检验法^[8];采用7种方法对跳跃成分进行详细诊断:Mann-Kendall检验法、有序聚类分析法、Lee-Heghinian检验法、 R/S 检验法、滑动 F 检验法、滑动 T 检验法、滑动游程检验法^[5]。这些方法在变异点检测中采用的指标各不相同,判断变异点的依据也不相同,大致可分为三类:以构造的指标最大为判别标准、以是否通过给定显著性水平为判别标准、以是否超过临界值为判别标准。详细诊断实质上是从不同角度系统全面的对序列变异程度、变异位置进行检验。

2.3 综合诊断

变异综合诊断是在对水文时间序列进行多种方法的详细诊断后,通过趋势综合、跳跃综合以及变异形式的选择得到变异结论,再根据流域的人类活动情况和气候变化特征对径流过程变异点的诊断结果进行综合分析判断,从成因上揭示变异点发生的合理性。

趋势综合是将各种趋势检验方法得到的结论进行综合。如果某一方法判别出序列趋势显著,则其显著性为1,反之为-1。将所有检测方法的显著性求和,得到趋势综合显著性,若其大于等于1,则认为趋势显著,否则不显著。采用不同的方法对变异成分进行检测,得到的变异点位置有一定的差异,跳跃综合就是要对这些变异点进行权重综合,以综合权重最大的点位作为最有可能跳跃点。

可按照以下方法计算综合权重:设原水文时间序列在跳跃详细诊断过程中共找到 m 个可能的变异点 $\{z_1, z_2, \dots, z_m\}$,每一个可能变异点 z_i 在通过 n

种方法被检测的次数为 t , 则权重 $R_i = \frac{t}{n}$ 。

2.4 诊断结论

水文诊断系统虽然可以克服单一检验方法可信度差、多种检验方法检测结果不一致等问题,但其主要是从数学和统计的角度出发得到的结论,需要经过实地水文调查和成因分析的验证才能确定最终可靠的结果。

3 秃尾河年径流序列变异分析

3.1 流域概况

秃尾河发源于陕西省神木县瑶镇乡宫泊海子,自西北向东南流经瑶镇、公草湾、古今滩、高家堡,在

万镇的河口岔村注入黄河^[9],是黄河中游河口镇至龙门区间水土流失最严重的多沙支流之一,干流全长 139.6 km,流域面积 3 295 km²。流域内矿产丰富,经济发展速度快,其经济结构以传统农业为主。改革开放以来,煤炭开采业迅速发展,同时带动了流域内运输、建筑等及服务性行业的发展,秃尾河成为当地社会发展的重要水源之一^[10]。

3.2 变异诊断

采用水文变异诊断系统对秃尾河流域 1956—2004 年的年降水量系列和年平均流量系列以及年径流系数进行初步诊断。点绘秃尾河流域 1956—2004 年的流域年降水量和年平均流量过程线及 5 年、10 年滑动平均值过程线,如图 1 所示。

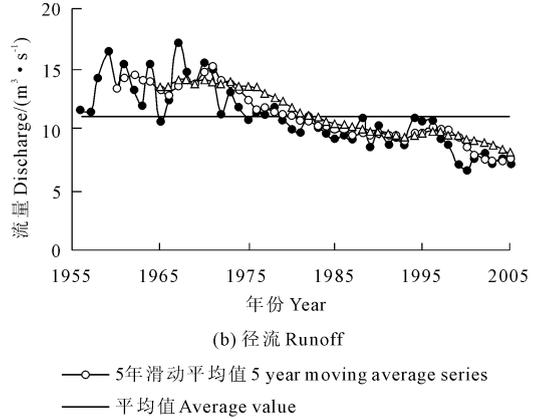
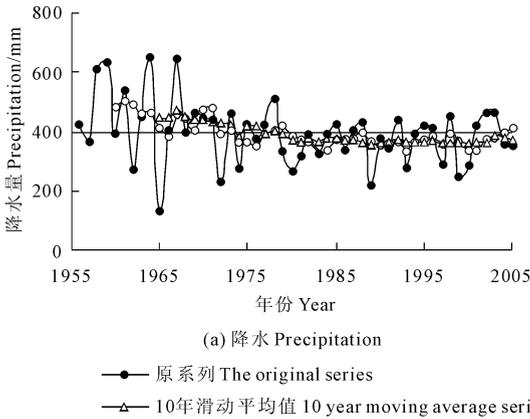


图 1 秃尾河流域年降水及年径流过程

Fig. 1 The procedure lines of the annual precipitation and annual runoff in Tuwei River Basin

从图 1 可以看出,秃尾河流域年降水量和年平均流量均有减少趋势,但是年降水量变化趋势不显著,而年平均流量趋势显著。采用 Hurst 系数法对年降水和年径流进一步检验,年降水序列的 Hurst 系数 $h_\alpha < H = 0.6795 < h_\beta$,其变异程度为弱变异;年平均径流序列的 Hurst 系数 $H = 1 > 0.924$,属于巨变异;年径流系数序列的 Hurst 系数 $h_\beta < H = 0.7501 < 0.839$,其变异程度为中变异。

由以上分析可知,流域 Hurst 系数大小关系为:年径流 > 年径流系数 > 年降水量。在不考虑外界其它因素的影响下,年径流量仅受到降水过程的影响,两者的变化程度应一致。因此,年径流过程变异除了受到降水过程的影响,其变化主要是由于流域下垫面改变而引起的,需要对其进行详细诊断。

采用相关系数检验法、Spearman 秩次相关检验法、Kendall 秩次相关检验法对秃尾河流域年平均流量序列趋势成分进行详细诊断;采用 7 种方法对变异成分进行详细诊断(见图 2~图 7 和表 1)

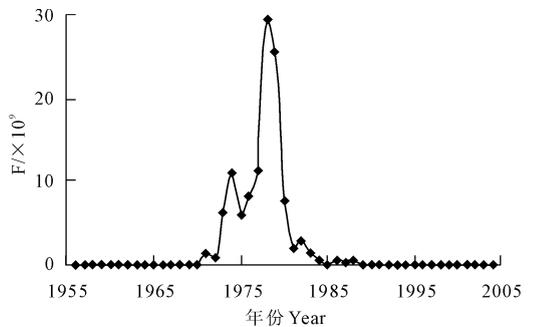


图 2 Lee - haghinan 法

Fig. 2 Lee - haghinan method for annual runoff

从表 2 可以看出,年平均流量序列趋势显著,但变异点检测不一致,其可能变异点有 1973 年、1978 年、1979 年和 1988 年。由于确定的变异点除 1988 年以外其他均发生在 70 年代,不能直接确定年径流序列发生变异的年份,需要进一步检验。按照变异点确定综合权重的方法计算得到变异点 1978 年的综合权重为 0.43,且大于其他变异年份的权重,由此确定序列最有可能的变异点为 1978 年。

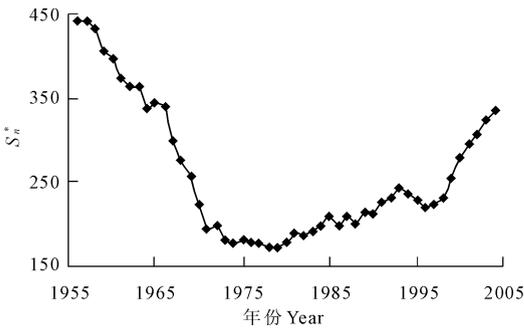


图 3 有序聚类法

Fig.3 Orderly clustering method for annual runoff

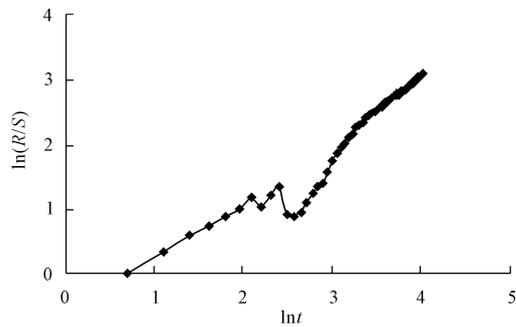


图 4 $\ln \tau$ 与 $\ln [R(\tau)/S(\tau)]$ 关系

Fig.4 Relationship of $\ln \tau$ and $\ln [R(\tau)/S(\tau)]$ for annual runoff

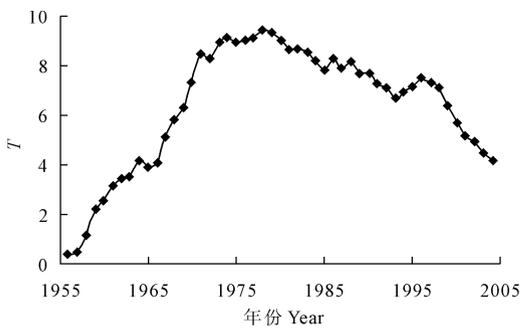


图 5 滑动 T 检验法

Fig.5 Sliding T Test method

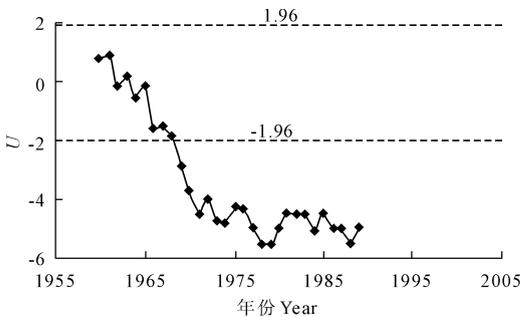


图 6 滑动游程检验法

Fig.6 Sliding run test method

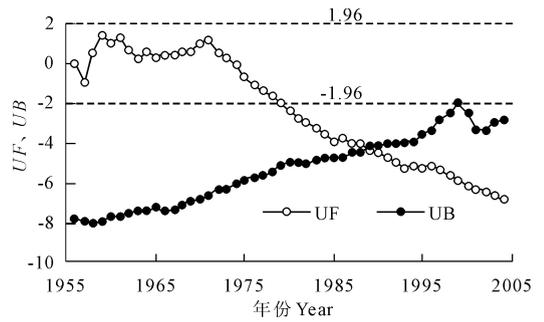


图 7 Mann-Kendall 检验法

Fig.7 Mann-Kendall test method

表 1 秃尾河流域年平均流量序列变异详细诊断结果

Table 1 Detail diagnosis results of series variation for annual mean stream flow in Tuwei River Basin

诊断方法 Diagnostic methods	检验结果 Test results	诊断方法 Diagnostic methods	检验结果 Test results
相关系数检验法 Correlation coefficient test method	趋势显著 Significant trend	Mann-Kendall 检验法 Mann-Kendall test	无 None
Spearman 秩次相关检验法 Spearman rank correlation test method	趋势显著 Significant trend	R/S 检验法 R/S test	1973
Kendall 秩次相关检验法 Kendall rank correlation test method	趋势显著 Significant trend	滑动 F 检验法 Sliding F test	1988
Lee-Heghinian 检验法 Lee-haghinan method	1978	滑动 T 检验法 Sliding T test	1978
有序聚类检验法 Orderly clustering method	1978	滑动游程检验法 Sliding run test	1979

3.3 成果合理性论证

在实际调查分析中,可根据以下因素来帮助确定下垫面显著变化的年份:① 引起下垫面变化的水利建设和其他人类活动情况;② 水资源开发利用水平;③ 水质污染及环境地质灾害情况^[6]。

文献[11]认为随水土保持措施面积的增大径流量逐渐减少,与天然产流量相比,水土保持使流域径流量平均减少 10% ~ 22%。根据实地水文调查发现,秃尾河流域水土保持面积在 50 ~ 60 年代很少,从 70 年代末期开始水土保持面积大规模增加(见表 2),流域下垫面发生了一系列的改变,直接影响到流域径流的形成。因此,从成因角度来看,确定秃尾河流域年平均流量的变异点为 1978 年是合理的,同时也可确定其变异形势为跳跃变异。

表 2 各年代末水土保持措施面积增加倍数表

Table 2 Increased areas of the soil and water conservation measures in the end of each decade

年份 Year	梯田 Terraces	林地 Woodland	草地 Meadow	坝地 Dam land
1959	0.0	0.0	0.0	0.0
1969	9.5	2.0	3.5	7.1
1979	29.7	5.9	10.8	33.4
1989	43.6	28.7	20.1	52.5
1996	64.2	39.2	26.3	73.9

4 结 论

采用水文诊断系统对秃尾河流域年径流序列进行了变异分析,初步确定其变异点为 1978 年,变异形式为跳跃变异。该系统通过对传统数学检验方法的检验结果进行综合分析,有效地解决了单一检验方法检验结果可信度较差,多种检验方法检验结果不一致的问题,对复杂的时间序列变异点的识别与检验有一定的效果。同时,结合实际的水文调查分析,对所确定的变异点从物理成因上进行论证,提高了结果的可信度,为进一步研究变化情况下流域水文水资源情势演变提供了理论依据。

参 考 文 献:

- [1] 穆兴民,张秀勤,高 鹏,等.双累积曲线方法理论及在水文气象领域应用中应注意的问题[J].水文,2010,30(4):47-51.
- [2] 熊立华,于坤霞,董磊华,等.水文时间序列变点分析的可靠性检验[J].武汉大学学报(工学版),2011,44(2):137-141.
- [3] 夏 军.水问题的复杂性与不确定性研究与发展[M].北京:中国水利水电出版社,2004.
- [4] 谢 平,窦 明,朱 勇,等.流域水文模型——气候变化和土地利用/覆被变化的水文水资源效应[M].北京:科学出版社,2010:140.
- [5] 谢 平,陈广才,雷红富,等.变化环境下地下水水资源评价方法[M].北京:科学出版社,2009:135-149.
- [6] 谢 平,陈广才,李 德,等.水文变异综合诊断方法及其应用研究[J].水电能源科学,2005,23(2):11-14.
- [7] 谢 平,陈广才,雷红富.基于 Hurst 系数的水文变异分析方法[J].应用基础与工程科学学报,2009,17(1):32-39.
- [8] 周 芬.Kendall 检验在水文序列趋势分析中的比较研究[J].人民珠江,2005,(2):35-37.
- [9] 李占斌,符素华,鲁克新.秃尾河流域暴雨洪水产沙特性的研究[J].水土保持学报,2001,15(2):88-91.
- [10] 范念念.秃尾河水沙冲淤特征与变化趋势分析[J].西北水电,2008,(3):1-3.
- [11] 穆兴民,李 靖,王 飞,等.基于水土保持的流域降水—径流统计模型及其应用[J].水利学报,2004,(5):122-128.

(上接第 216 页)

- [8] 姚爱华,冯佰利,柴 岩,等.不同耕作方式对小杂粮产量及水分利用效率的影响[J].干旱地区农业研究,2008,26(1):97-101.
- [9] 蒲金涌,姚小英,辛昌业,等.甘肃糜子(*Panicum miliaceum* L.)生态气候适宜性研究[J].干旱地区农业研究,2010,28(1):223-232.
- [10] 贾根良,代惠萍,冯佰利,等.PEG 模拟干旱胁迫对糜子幼苗生理特性的影响[J].西北植物学报,2008,28(10):2073-2079.
- [11] 冯晓敏,张永清.水分胁迫对糜子植株苗期生长和光合特性的影响[J].作物学报,2012,38(8):1513-1521.
- [12] 张盼盼,冯佰利,王鹏科,等.糜子芽期抗旱性指标鉴定与利用研究[J].河北农业科学,2010,14(11):22-27.
- [13] 王星玉,王 纶,崔彩霞,等.黍稷种质资源描述规范和数据库标准[M].北京:中国农业出版社,2006:38-49.
- [14] 邓聚龙.灰色系统基本方法[M].武汉:华中理工大学出版社,1987:95-128.
- [15] 杜尧东,宋丽莉,邵 洋.春小麦水分敏感指数与有限水量生育期的最优分配[J].华南农业大学学报(自然科学版),2003,24(4):1-4.
- [16] 房全孝,陈雨海.节水灌溉条件下冬小麦耗水规律及其生态基础研究[J].华北农学报,2003,18(3):18-22.
- [17] 陈晓远,高志红,罗远培.考虑土壤水分影响的小麦根、冠干物质积累及其相互关系模型[J].生态学报,2005,25(8):1921-1927.
- [18] 白向历,孙世贤,杨国航,等.不同生育时期水分胁迫对玉米及生长发育的影响[J].玉米科学,2009,17(2):60-63.
- [19] 樊修武,池宝亮.谷子杂交种与常规种水分利用效率及耗水规律差异[J].山西农业科学,2011,39(5):428-431,452.
- [20] 白莉萍,隋方功,孙朝晖,等.土壤水分胁迫对玉米形态发育及产量的影响[J].生态学报,2004,24(7):1556-1560.
- [21] 张卫星,朱德峰.水分亏缺对水稻生长发育、产量和稻米品质影响的相关研究[J].中国稻学,2007,(5):1-4.