

秦岭北麓典型流域年径流序列的突变分析

马瑞婷, 黄领梅, 沈冰

(西安理工大学 西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地, 陕西 西安 710048)

摘要: 运用 Mann-Kendall 检验法和有序聚类分析法, 基于秦岭北麓典型流域 1955-2010 年的年径流变化特征, 旨在揭示该地区年径流序列的突变特性。结果表明: 56a 来灞河、大峪河、沔河、涝河、黑河年径流量呈下降的趋势, 且在 1955-1983 年的年径流模数变化具有同步性, 而 1983 年之后的同步性较差; 除大峪河无突变点外, 其余四条流域年际径流序列的突变点在 80 年代后期。文中五条典型流域的年径流序列突变分析可为水资源配置提供参考。

关键词: Mann-Kendall 检验法; 有序聚类分析法; 径流变化; 同步性分析; 突变分析

中图分类号: TV121.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2016)02-0076-04

Mutation analysis of annual runoff series in typical basin of northern region of Qinling mountains

MA Ruiting, HUANG Lingmei, SHEN Bing

(State Key Lab Cultivation Base of Northwest Arid Ecology and Hydraulic Engineering,
Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Based on the annual runoff variation characteristics in typical basins of northern regions of the Qinling Mountains from 1955 to 2010, the paper used Mann-Kendall test and ordered cluster analysis to reveal the mutation characteristics of the region's annual runoff series. The results showed that the annual runoff of Bahe river, Dayuhe river, Fenghe river, Laohe river and Heihe river had downward trend for 56 years, and the change of annual runoff modulus had synchronism from 1955 to 1983, the synchronism is poor after 1983. Except that Dayuhe River has no mutation point, the mutation point of annual runoff series in other four basins took place in the late 1980s. The result can provide reference for the development and utilization of water resources.

Key words: Mann-Kendall test; ordered cluster analysis; runoff change; synchronized analysis; mutation analysis

秦岭是西安的供水水源地, 其流域径流量的变化可能对西安市用水安全造成一定的影响。它是我国地理上的南北分界线, 黄河、淮河与长江支流汉江、嘉陵江水系的分水岭。腹地处于陕西省西南部, 东连豫鄂, 西接甘陇, 南望巴蜀, 北瞰关中^[1]。年均气温 12~17℃, $\geq 10^\circ\text{C}$ 的年积温 3 700~4 900℃, 年均降水量 600~1 200 mm^[2]。近半个世纪以来秦岭整体气候呈现变暖的趋势, 这体现了秦岭山地在全球气候变化研究中的区域响应^[3]。而径流是水文的重要过程, 同时径流变化与气候变化在很大程度上

也存在着响应关系^[3-4]。许多学者对秦岭地区的径流变化情况做出了研究, 吴景霞^[5]选取黑河流域的黑峪口水文站径流量资料, 对流域水文要素的时程变化特征进行了分析, 得出黑河流域径流年内分配不均匀, 年际之间变化大且径流 20 世纪 90 年代后递减趋势明显。马新萍等^[6]通过对秦岭灞河流域径流量变化及其影响分析, 得出灞河年径流量呈显著下降趋势, 人类活动是导致灞河流域径流发生变化的主要因素, 降水变化是次要原因。葛芬莉^[7]针对 20 世纪 90 年代渭河水量锐减, 对陕西省渭河南

收稿日期: 2015-09-15; 修回日期: 2015-10-13

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50939004); 陕西省教育厅重点实验室项目(12JS067)

作者简介: 马瑞婷(1991-), 女, 甘肃白银人, 硕士研究生, 主要从事水文学及水资源研究。

通讯作者: 黄领梅(1972-), 女, 四川乐至人, 副教授, 主要从事水文学及水资源研究。

岸秦岭山区及其控制站支流区、代表区典型年 90 年代降水、径流系数进行计算,进一步说明 90 年代渭河水量减少的主要原因是降水。

鉴此,本文通过分析秦岭北麓的 5 条典型河流,即灞河、大峪河、沔河、涝河、黑河的径流突变,为水资源配置提供参考。

1 研究区概况

西安市位于中国大陆腹地黄河流域中部的关中盆地,地理位置为 $33^{\circ}42' \sim 34^{\circ}44'$, $107^{\circ}40' \sim 108^{\circ}55'$, 辖境东西长约 204 km,南北宽约 116 km。北临渭河,南依终南山,周围曲流环绕,有“八水绕长安”之说。

本次研究区主要集中在西安市行政管辖范围内的秦岭北麓的五个典型流域,即灞河、大峪河、沔河、涝河、黑河,都属于黄河流域渭河水系^[8]。选取西安市秦岭北麓从东到西的典型流域的水文站,分别为马渡王、大峪、秦渡镇、涝峪口、黑峪口水文站,具体位置见图 1,各流域及其相应的水文站的基本情况见表 1。

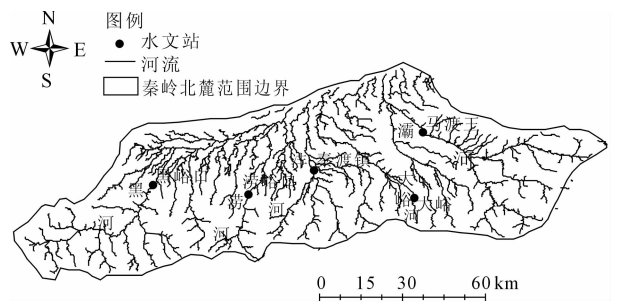


图 1 研究区水文站分布图

表 1 研究区水文站基本情况

河流	河长/ km	流域面 积/km ²	站名	集水面 积/km ²	至河口 距离/km	建站 年份
灞河	104.1	2581	马渡王	1601	30	1952
大峪河	29.2	87.6	大峪	53.9	14	1952
沔河	78.0	1460	秦渡镇	566	36	1935
涝河	82.0	663	涝峪口	347	40	1944
黑河	125.8	2258	黑峪口	1481	35	1938

西安市多年平均水资源总量为 $23.47 \times 10^8 \text{ m}^3$, 人均水资源占有量 244 m^3 , 仅相当于全国平均水平的 11.6%。随着城市规模的不断扩大、城市需水量迅速增长,保障供水已是支撑西安发展的重要任务。黑河引水系统是西安发展的主要水源来源,该引水工程是一项跨流域引水、综合利用的大型水利工程。工程以西安市城市供水为主,兼有农业灌溉、发电、

防洪等综合效益。黑河供水系统由黑河城市引水渠道工程、石头水库补充水源渠道工程、石砭峪水库备用水源渠道工程、沔峪河径流引水工程、田峪河径流引水工程、甘峪水库引水工程和就峪河径流引水工程共 7 处组成。黑河引水系统运行多年,为西安的发展做出了巨大贡献。

2 研究方法

本文根据秦岭北麓典型流域水文站 1955 – 2010 年共计 56a 的逐年径流量资料,对其年径流序列进行突变分析,即找到突变点。

用于检验时间序列趋势突变的统计方法很多,每种方法有各自的优缺点。然而非参数检验法优点是不需要样本遵从一定的分布,也不受少数异常值的干扰^[9],故文中选择两种非参数检验方法即 Mann – Kendall 检验法和有序聚类分析法。

Mann – Kendall 检验法是世界气象组织推荐并被广泛用于实际研究的非参数检验方法,是时间序列趋势分析方法之一^[10]。另外 Mann – Kendall 检验法因其计算方便、检测范围广且不要求被分析样本遵从一定分布,同时也不受其它异常值的干扰,更适合用于类型变量和顺序变量,此方法也可对水文序列进行突变检验^[10–12]。

本文应用 Mann – Kendall 检验法对时间序列突变点进行分析,采用有序聚类分析法来进行突变点检验。有序聚类分析法是用来提取水文序列的突变点的一种有效方法^[13]。Mann – Kendall 检验法和有序聚类分析法的基本原理和相关计算公式参见参考文献^[9–13]。

3 结果与分析

3.1 年径流趋势分析

采用非参数 Kendall 秩次检验方法分析秦岭北麓典型流域的年径流系列的变化趋势,结果见表 2。

由表 2 可知: Z 值均小于 0,表明 5 站的年径流量序列总体上呈减少趋势。灞河马渡王站、沔河秦渡镇站、涝河涝峪口站和黑河黑峪口站的 $|Z| > Z_{\alpha/2}$, 表明其年径流量序列的减小趋势显著;而大峪河大峪水文站的 $|Z| < Z_{\alpha/2}$, 表明其年径流量序列的减小趋势不显著。

3.2 径流同步性分析

图 2 为 5 个水文站年径流模数的变化过程。图 2 用以分析秦岭北麓典型流域年径流量变化的同步性。

表 2 各水文站年径流量变化趋势及检验

水文站	Z 值	$Z_{\alpha/2}$ 值	趋势显著水平	整体趋势的变化 速率/ 10^8 m^3	趋势	显著性	H_0
马渡王	-3.15	1.96	0.9992	-0.0523	递减	显著	拒绝
大峪	-1.32	1.96	0.9069	-0.0013	递减	不显著	接受
秦渡镇	-2.35	1.96	0.9907	-0.0203	递减	显著	拒绝
涝峪口	-2.45	1.96	0.9929	-0.0101	递减	显著	拒绝
黑峪口	-4.08	1.96	1.0000	-0.0825	递减	显著	拒绝

注: Z 为标准正态分布统计变量; 显著性水平 α 为 0.05; H_0 为原假设, 指年径流量变化趋势不显著。

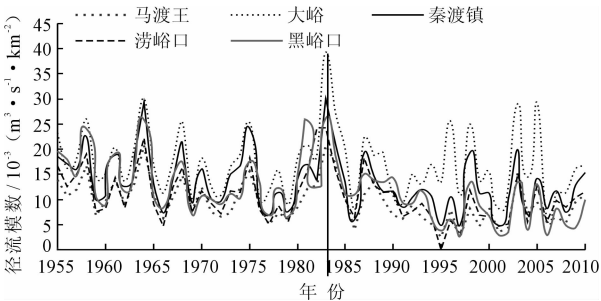
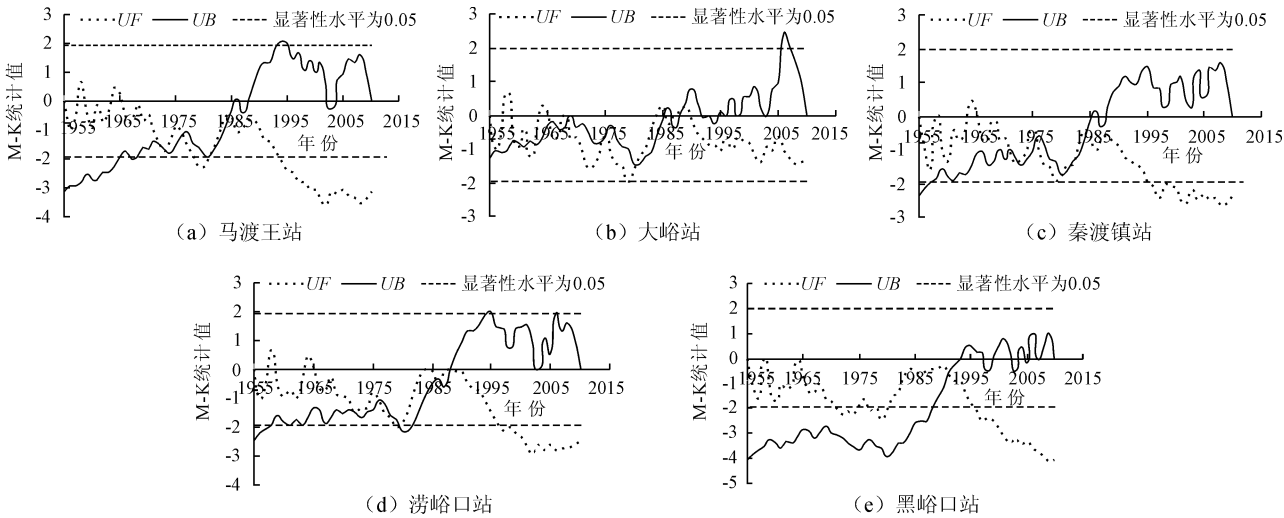


图 2 各水文站的年径流模数趋势分析对比图

由图 2 可知,5 个水文站最大年径流模数出现在 1983 年左右。以 1983 年为分界线,将研究序列分为两段,第 1 段为 1955 - 1983 年,第 2 段为 1983 - 2010 年。可以得出第 1 段中各水文站的年径流模数具有很好的同步性,5 个水文站的峰谷值对应的同步率可达 90% 以上,峰值出现时间基本相同;



注: UF 表示顺序时间序列的秩序列; UB 表示逆序时间序列的秩序列。

图 3 西安市秦岭北麓典型流域年径流量序列的 M - K 检验

在图 3 中,由灞河马渡王站的 UF 曲线可知其年径流量序列总体上存在减小趋势;由 UF 曲线与 0.05 显著性水平置信线的位置关系可知,1994 - 2010 年的年径流量序列的减小趋势显著;在 0.05 显著性水平下,UF 和 UB 两条曲线有多个交点,综

而在第 2 段中 5 个水文站年径流模数的同步性较差,可能是因为秦岭北麓各流域的年径流量受气候变化和下垫面等因素的综合影响,导致其径流量在年际分配上的不确定性增大。

综上可知,五个流域的最大年径流模数均出现在 1983 年左右,且在 1983 年之前具有很好一致性,由此可初步判定 1983 年是研究序列的分界点。为此,采用目前常用的系列突变分析方法进一步确认研究序列的突变点。

3.3 径流突变分析

3.3.1 Mann - Kendall 检验法 径流突变是普遍存在的一个重要现象。首先采用 Mann - Kendall 检验法对 5 个水文站的年径流量序列进行突变分析,结果见图 3。

合分析各交点位置后确认 1984 年左右为突变点。由大峪河大峪站的 UF 曲线可知其年径流量序列总体上存在减小的趋势;UF 曲线均未超过 0.05 显著性水平置信线,减小趋势不明显;在 0.05 显著性水平下,UF 和 UB 两条曲线有多个交点,综合分析

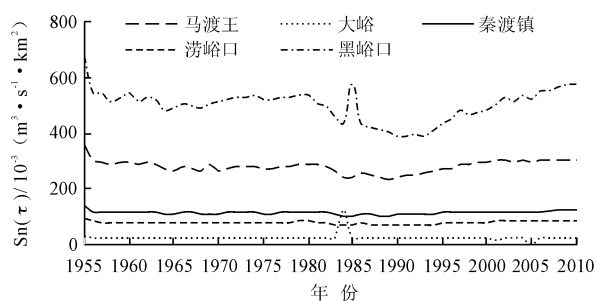
各交点位置后判断无突变点。

由沔河秦渡镇站的 UF 曲线可知其年径流量序列总体上存在减小的趋势;由 UF 曲线与 0.05 显著性水平置信线的位置关系可知,1996 - 2010 年的年径流量序列的减小趋势显著;在 0.05 显著性水平下, UF 和 UB 两条曲线有多个交点,综合分析各交点位置后确认 1984 年左右为突变点。

由涝河涝峪口站的 UF 曲线可知其年径流量序列总体上存在减小的趋势;由 UF 曲线与 0.05 显著性水平置信线的位置关系可知,1997 - 2010 年的年径流量序列的减小趋势显著;在 0.05 显著性水平下, UF 和 UB 两条曲线有多个交点,综合分析各交点位置后确认 1988 年为突变点。

由黑河黑峪口水文站的 UF 曲线可知其年径流量序列总体上存在减小的趋势;由 UF 曲线与 0.05 显著性水平置信线的位置关系可知,1996 - 2010 年的年径流量序列的减小趋势显著;在 0.05 显著性水平下, UF 和 UB 两条曲线有一条相交点,综合分析该交点位置后判断 1991 年为突变点。

3.3.2 有序聚类分析法 采用有序聚类分析法计算 5 个水文站年径流量序列的突变点,与 Mann - Kendall 检验法的结果进行对照。绘制年径流模数 $Sn(\tau)$ 的曲线见图 4, $Sn(\tau)$ 对应的最低点 τ 即为本文要推求的突变点。



注: $Sn(\tau)$ 表示总离差和; τ 表示最优分割点。

图4 各水文站的年径流模数 $Sn(\tau)$ 变化曲线图

由图 4 可知灞河马渡王站、沔河秦渡镇站、涝河涝峪口站和黑河黑峪口站的突变点分别为 1984 年、1984、1989、1990 年;大峪河大峪水文站无突变点,但在 1984 年发生了异常变化。

3.3.3 径流突变的成因分析 经过 Mann - Kendall 检验法和有序聚类分析法的检验,虽然两种方法在年径流突变点的检验中结果不尽一致,但是相差较小。综合两种检验方法,同时结合各水文站年径流量序列的实际变化情况,可以确定灞河马渡王站、沔河秦渡镇站、涝河涝峪口站、黑河黑峪口站年径流发

生突变的年份分别是 1984、1984、1988 和 1990 年,而大峪河大峪水文站无突变点。

可以看出秦岭北麓典型流域年径流量序列突变点发生在 20 世纪 80 年代后期左右,且时间序列突变具有一致性,说明突变不是由于局部地区的人类活动引起的^[3]。整体而言,秦岭北麓的降水呈下降的趋势,但是 1979 - 1984 年表现为降水的增加,并且幅度较大,而降水量的下降主要集中在 1984 年以后,特别是 20 世纪 90 年代以后^[14]。说明秦岭北部径流的变化很大程度上与降水量有关系,从而也造成了径流量的突变点集中发生在 20 世纪 80 年代后期。秦岭北麓在 1951 年以来一直有升温现象,但 20 世纪 50 - 80 年代升温幅度较小,而 80 年代以后,升温幅度较大,同时秦岭北麓气温突变发生在 1989 年^[14],与年际径流量序列的突变时间基本一致,可以说明秦岭北部地区径流时间序列的突变与气温突变也有较为密切的联系。

4 结 论

秦岭北麓的降雨减少与气温突变使得其流域的年径流量发生了相应的变化。采用 Mann - Kendall 检验法和有序聚类分析法,分析秦岭北麓 5 个典型流域的突变,得出如下结论:

(1) 秦岭北麓典型流域的年径流变化趋势基本一致,整体上均呈减小趋势,且灞河、沔河、涝河、黑河的年径流量减小的趋势显著,涝河的年径流量减小的趋势不显著。

(2) 该五条流域的年径流模数在 1955 - 1983 年期间的同步性很好,而在 1983 - 2010 年的同步性较差。

(3) 灞河、沔河、涝河、黑河年径流发生突变的年份分别是 1984、1984、1988 和 1990 年,而大峪河无突变点。其主要原因与降水量和温度的变化有关。

参考文献:

- [1] 孙 华. 近 30 年来秦岭南北坡植被指数时空差异及其对区域气候的响应[D]. 西安:西北大学,2010:2.
- [2] 蒋 冲,王 飞,穆兴民,等. 气候变化对秦岭南北植被净初级生产力的影响(I):近 52 年秦岭南北气候时空变化特征分析[J]. 中国水土保持科学,2012,10(5):56 - 63.
- [3] 马新萍,白红英,冯海鹏,等. 52a 来秦岭南北径流变化对比及影响因素[J]. 干旱区地理,2013,36(6):1032 - 1040.

(下转第 85 页)

- [3] 赵慧颖,乌力吉,郝文俊. 气候变化对呼伦湖湿地及其周边地区生态环境演变的影响[J]. 生态学报,2008,28(3):1064-1071.
- [4] 赵慧颖,李成才,赵恒和,等. 呼伦湖湿地气候变化及其对水环境的影响[J]. 冰川冻土,2007,29(5):795-801.
- [5] 王志杰,李畅游,张生,等. 基于水平衡模型的呼伦湖湖泊水量变化[J]. 湖泊科学,2012,24(5):667-674.
- [6] 王志杰,李畅游,贾克力,等. 呼伦湖水面蒸发量计算及变化特征分析[J]. 干旱区资源与环境,2012,26(3):88-95.
- [7] 张娜,乌力吉,刘松涛,等. 呼伦湖地区气候变化特征及其对湖泊面积的影响[J]. 干旱区资源与环境,2015,29(7):192-197.
- [8] 张国庆,XIE HongJie,姚檀栋,等. 基于 ICESat 和 Landsat 的中国十大湖泊水量平衡估算[J]. 科学通报,2013,58(26):2664-2678.
- [9] 李畅游,张生,李卫平,等. 内蒙古呼伦湖水量平衡计算与分析[J]. 湖泊科学,2012,24(2):273-281.
- [10] 张岩,李畅游,张生,等. 呼伦湖冰封期污染特征分析及对水处理的意义[J]. 生态环境学报,2011,20(8-9):1289-1294.
- [11] 韩向红,杨持. 呼伦湖自净功能及其在区域环境保护中的作用分析[J]. 自然资源学报,2002,17(6):684-690.
- [12] 呼伦湖渔业有限公司编写委员会. 呼伦湖志(续志一,1987-1997)[M]. 呼和浩特:内蒙古文化出版社,1998.
- [13] 孙标,李畅游,张生,等. 基于空间信息技术的呼伦湖流域研究[J]. 环境污染与防治,2010,32(8):5-9+19.
- [14] 李翀,叶柏生,杨玉生,等. 呼伦湖水位变动与20世纪初干涸缘由探讨[J]. 水文,2007,27(3):43-45.
- [15] 孙标. 基于空间信息技术的呼伦湖水量动态演化研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2010.

(上接第79页)

- [4] 孙美平,李忠勤,姚晓军,等. 近50a来乌鲁木齐河源区径流变化及其机理研究[J]. 干旱区地理,2012,35(3):430-437.
- [5] 吴景霞. 西安黑河流域水文要素变化特征分析[J]. 水利科技与经济,2008,14(11):874-875.
- [6] 马新萍,白红英,侯钦磊,等. 1959年至2010年秦岭灞河流域径流量变化及其影响因素分析[J]. 资源科学,2012,34(7):1298-1305.
- [7] 葛芬莉. 渭河水量减少原因及其南岸秦岭山区降水、径流变化分析[J]. 西北水利发电,2004,20(21):146-149.
- [8] 张静. 五十年来秦岭北麓(西安段)自然资源变化轨迹研究[D]. 西安:陕西师范大学,2006:7.
- [9] 张敬平,黄强,赵雪花. 漳泽水库径流时间序列变化特征与突变分析[J]. 干旱区资源与环境,2014,28(1):131-135.
- [10] 雷璐,孙春敏. Mann-Kendall 检验方法在增江径流趋势分析中的应用[J]. 中国科技信息,2012,4(19):39+73.
- [11] Kahya E, Kalayc S. Trend analysis of stream flow in turkey [J]. Journal of Hydrology, 2004, 289(1-4):128-144.
- [12] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京:气象出版社,2007:296.
- [13] 徐栋,张萍. 泾河流域径流量序列变化趋势和突变分析[J]. 中国科技论文在线,2009(3):6-10.
- [14] 宋佃星,延军平,马莉. 近50年来秦岭南北气候分异研究[J]. 干旱区研究,2011,28(3):492-498.