近 50 年来渭河干流中段径流变化特征研究

裴金萍[1],马新萍[2]
(1.西北农林科技大学 水利与建筑工程学院,陕西 杨凌 712100;
2.西北大学 城市与环境学院,陕西 西安 710127)

摘　要: 利用渭河干流咸阳站 1960—2009 年径流及降水数据,采用 Kendall 秩相关系数、R/S 分析法、M－K 突变检验法等数理统计方法,分析了渭河干流中游四季径流变化趋势及突变特征,得出结果:(1) 渭河干流中游四季径流均呈极显著递减趋势,尤其是秋季径流减少最为明显,并且未来流量变化与现在保持相同的态势,即有持续递减的特征;(2) 渭河干流中游段年均流量的集中期主要分布在 8 月中旬左右,年降水量集中期主要分布在 7 月底左右,径流从降水开始经过停蓄、漫流、河槽集流,然后汇流至下游河道大概需要 32 d 左右的时间,径流对降水的滞后期在不断延长,50 年来渭河干流中游径流系数呈下降趋势;(3) 采用 M－K 突变检验法和滑动 t 检验法得出年均流量的突变时间点为 1987 年,春季与秋季突变时间一致,夏季突变时间与年均突变时间较为接近。

关键词: 渭河干流;径流变化;M－K 突变检验法;径流系数
中图分类号: P333　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1000-7601(2013)06-0214-06

Study on change characteristics of runoff in midstream of Weihe River in recent 50 years

PEI Jin-ping[1], MA Xin-ping[2]
(1. *College of water resources and Archtecture Engineering*, *Northwest A&F University*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*;
2. *College of Urban and Environmental Science* , *Northwest University*, *Xi'an*, *Shaanxi* 710127, *China*)

Abstract: Utilizing the runoff and precipitation data during 1960—2009 from Xianyang Station of main stream of Weihe River, and adopting the Mathematical Statistic Methods like Kendall's rank correlation coefficient, R/S analysis, and M－K mutation test, has analyzed the change trend and mutation characteristics of the seasonal runoff in the midstream of Weihe River. Obtained the results as that: (1) The runoff in each season of the midstream of Weihe River all has shown a significant decreasing trend, especially in the fall. And in future, the flow changes will be maintained the same trend that continued decreasing feature; (2) Concentrated period of the average annual flow at the middle reach of the Weihe River was mainly distributed around in mid-August, the concentrated period of annual precipitation was mainly distributed around the end of July. It was probably needed 32 days from rain after stopping storage, overland flow, flow into the river channel, then convergence to the downstream river, Runoff lag period to precipitation was continued to extend. The runoff coefficient has been shown a decrease trend in the past 50 years at the middle reach of the Weihe River; (3) Adopted the M－K mutation test method and the sliping t-test method , has obtained the mutation point time was 1987, the mutation time was more close in Spring and Autumn, but the summer mutation time was more close to the average annual mutation time.

Keywords: main stream of Weihe River; runoff change; M－K mutation test; runoff coefficient

河川径流及其流域内降水变化规律是水文水资源研究的重要内容,水文水资源研究是全球环境变化研究的基础,也是国民经济与各用水部门决策时必不可少的基础数据。气候变化是导致径流发生变化的最直接原因,气温和降水等气候因子均直接或间接地对流域径流产生影响。因此气候因子与径流之间关系的定量研究一定程度上能够揭示全球变化与区域环境之间的响应关系。

收稿日期: 2013-06-25
基金项目: 国家科技基础性专项重点项目(科技部)(2007FY110800)
作者简介: 裴金萍(1962—),女,内蒙古阿拉善人,副教授,主要从事农业水土工程等方面的研究。

渭河是黄河的第一大支流,其径流变化能在一定程度上反映区域性气候环境,区域性气候与全球气候变化之间的响应是目前地理学的研究热点。有许多学者通过流域径流变化的定量研究来反映气候环境变化,例如,侯钦磊[1]等应用 Kendall 秩相关系数、R/S 分析法得出渭河干流径流变化趋势现在处于极显著的递减状态($P < 0.001$),递减率处于 $-17.752(m^3 \cdot s^{-1})/10a$ 至 $-37.654(m^3 \cdot s^{-1})/10a$ 之间,未来的一段时间内将保持同一势态。刘燕等[2]通过研究证明渭河流域内河川径流与降水之间存在密切的正相关关系,降水量多的年份,河川径流丰富,反之较枯。王西琴等[3]分析了渭河上游天然径流与降水的相关关系,对降水与非降水因素对径流减少的贡献进行了定量分析,结果表明:降水与非降水因素共同作用使得渭河上游径流量不断减少,且从 20 世纪 70 年代开始,非降水因素的贡献率逐渐增强,成为影响渭河上游天然径流量减少的主要因素。此外,也有许多模型被用来模拟流域水文气候,汤富平等[4]以黄土高原岔巴沟流域的降雨径流观测数据对 CA 模型进行验证分析,结果表明, 结合 CA 模型与 GIS 技术可以较为有效地模拟流域次降雨径流过程。张利平等[5]对分布式水文模型 VIC 模型与 SWAT 模型进行研究,并将其应用于白莲河流域,模拟结果表明 SWAT 模型模拟的结果更接近实测值。

本文研究了渭河中游 1960—2009 年年际及四季径流的变化趋势,并定量分析了降水与径流的时间关系以及径流序列的突变情况,趋势可以反映径流序列总体的演变规律,突变则可以说明径流序列的某些统计规律何时发生变化[6],在这一定量化研究的基础之上对渭河干流中游地区水文与气候变化之间的关系进行分析探讨,力图揭示渭河流域气候-水文响应关系,为整体的全球变化研究提供基础数据参考。

1　数据来源与研究方法

1.1　研究区概况

渭河是黄河的第一大支流,发源于甘肃省渭源县乌鼠山。渭河干流全长 818 km,流域总面积 134 766 km^2,地理坐标为 104°00′E ~ 110°20′E,33°50′N ~ 37°18′N[7]。属于大陆性气候,多年平均气温 6℃ ~ 14℃,多年平均降水量 500 ~ 800 mm,属我国干旱半干旱地区,多年平均蒸发量为 1 000 ~ 2000 mm。

1.2　数据来源

本文选用渭河流域咸阳站月径流及月降水数据,数据来源于陕西省气象局。咸阳站位于渭河中游与下游的交界点,地理坐标 108°42′E,34°19′N,渭河流域咸阳站集水面积 46 827 km^2,多年平均流量为 120.11 $m^3 \cdot s^{-1}$,1960—2009 年最大水年为 1964 年(353 $m^3 \cdot s^{-1}$),最小水年为 1995 年(16.7$m^3 \cdot s^{-1}$)。

1.3　研究方法

本文采用 Kendall 秩相关系数、R/S 分析法、M-K 突变检验法等数理统计方法来定量分析渭河流域下游流量在年际、季节等时间尺度上的变化特征,并采用集中期和集中度来分析降水和径流在时间上的滞后关系。对于季节的定义:春、夏、秋、冬四季分别为 3—5 月、6—8 月、9—11 月和 12 月—翌年 2 月。

Mann-Kendall 非参数秩次相关检验法[8-9]可以对序列变化趋势进行定量说明,也可用来计算径流序列的突变点和可能突变点[10-11],再利用滑动 T 方法验证突变点真伪,增强突变分析结果的可信度[12-13],本文选取 $n = 5$、10、15 三个子序列长度反复比较,旨在避免任意选择子序列长度造成突变点飘移。

R/S 分析法(Rescaled Range Analysis,简称 R/S 分析)计算出的 Hurst 指数[14-15]能很好地揭示时间序列中的趋势性成分,并且能由 Hurst 指数值的大小来判断趋势性成分的持续性或者反持续性强度的大小,本文采用 hurst 指数来分析时间序列未来的变化情况。

集中度和集中期[16-17]是用逐月径流量(降水量)反映年内径流量(降水量)集中程度和最大径流(降水)出现时段的重要指标。本文通过计算降水和径流的集中度与集中期,来定量研究径流对降水的滞后效应。

2　结果与分析

2.1　径流季节变化趋势分析

图 1 和表 1 表明渭河咸阳站四季径流均呈递减趋势,递减率依次为:春季(3—5 月)29.113 $m^3 \cdot s^{-1} \cdot 10a^{-1}$、夏季(6—8 月)24.51 $m^3 \cdot s^{-1} \cdot 10a^{-1}$、秋季(9—11 月)51.275 $m^3 \cdot s^{-1} \cdot 10a^{-1}$、冬季(12 月—翌年 2 月)18.453 $m^3 \cdot s^{-1} \cdot 10a^{-1}$;Kendall 秩相关系数 M 值均大于临界检验值 $Ma = 2.57(a = 0.01)$,为极显著的递减趋势,秋季径流减少最为明显。用 R/S 分析法对渭河中游四季径流变化的未来趋势进行预测,计算后得到:渭河中游四季径流的 hurst 指数均大于 0.5,说明未来流量变化与现在保持相同的态势,即有持续递减的特征。四季径流流量中秋季的流量最大,而四季降水量最大的季节为夏季,这说明渭河干流中游径流对降水有滞后效应。

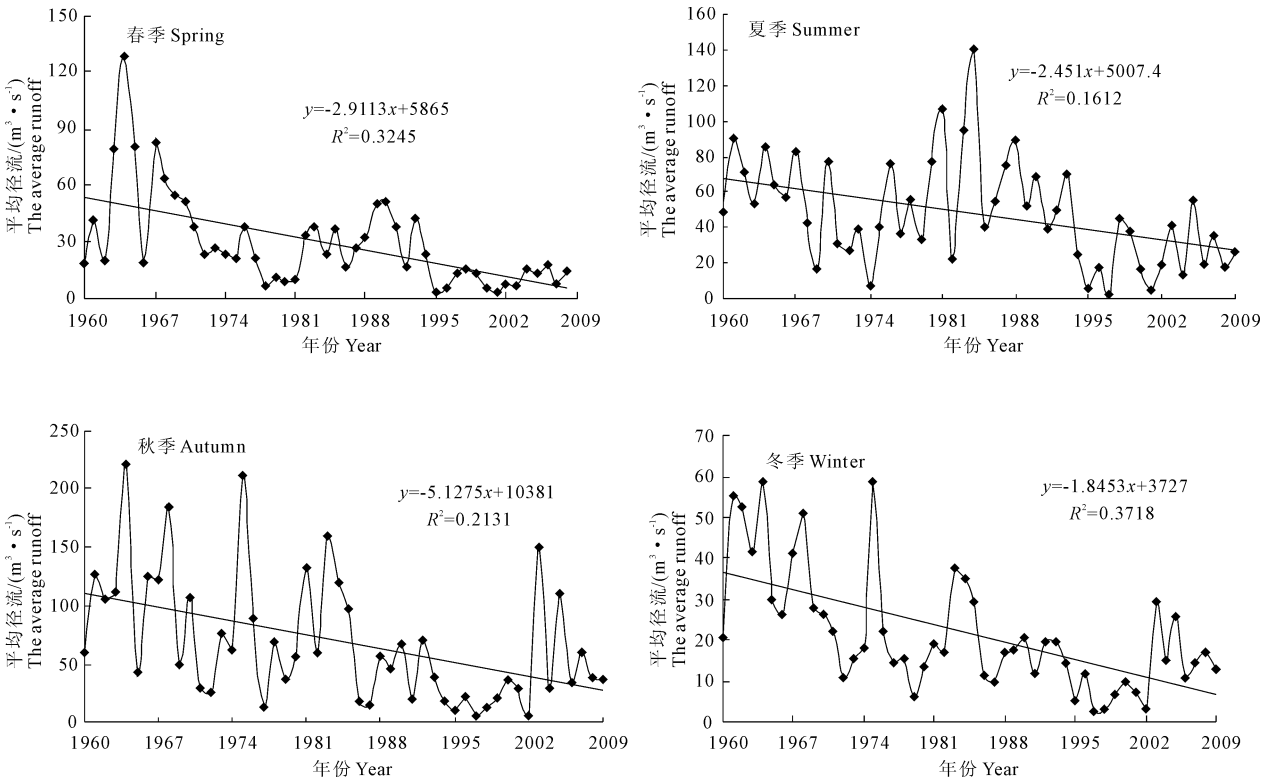

图 1 渭河咸阳站四季径流变化

Fig.1 The seasonal runoff change in Xianyang Station of Weihe River

表 1 渭河咸阳站四季径流变化趋势的定量检验

Table 1 The quantitative inspection of runoff variation tendency in four seasons in Xianyang Station of Weihe River

季节 Seasons	*M*	趋势 Trends	*Ma*	显著性 Significance	Hurst 指数 Hurst index	未来趋势 Future trend
春 Spring	-6.025	递减 Decline	2.57	极显著 Very significant	0.69	减少 Decrease
夏 Summer	-5.791	递减 Decline	2.57	极显著 Very significant	0.65	减少 Decrease
秋 Autumn	-6.745	递减 Decline	2.57	极显著 Very significant	0.71	减少 Decrease
冬 Winter	-5.791	递减 Decline	2.57	极显著 Very significant	0.66	减少 Decrease

2.2 径流与降水的集中期与集中度

从集中期变化曲线中可以看出,渭河中游径流对降水有滞后的效应,从分布的时间范围上来看年均流量的集中期主要分布在 8 月中旬左右,年径流量的集中期主要分布在 7 月底左右。径流的形成受到流域内气候和下垫面的影响,是流域内各种自然地理因素综合作用的产物。从降水到形成径流需要经历停蓄阶段、漫流阶段和河槽集流阶段 3 个特征阶段,由于每次降水的强度和持续性不同,加之流域下垫面的影响,径流的形成需要时间,因此经过计算,渭河中游径流对降水平均每年滞后天数为 32 d,这说明渭河干流中游段从降水开始经过停蓄、漫流、河槽集流,然后汇流至下游河道大概需要 32 d 左右的时间。从图 2 还可以看出降水量集中期有提前的趋势,其滞后期也逐渐变长,图 3 反映了径流对降水的滞后期有逐渐延长的趋势。1960—2009 年各年代径流降水滞后天数分别为 24 d、26 d、16 d、21 d、40 d

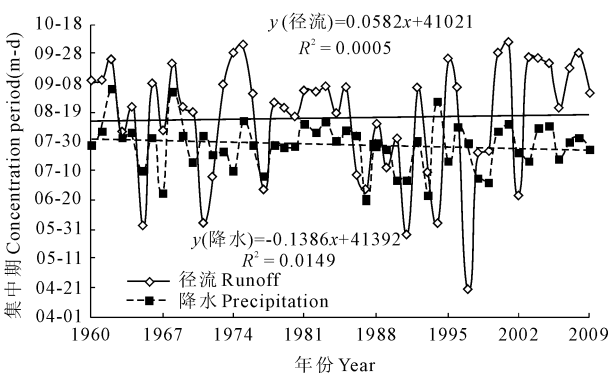

图 2 年降水与年均径流集中期变化

Fig.2 The concentration period change of annual precipitation and average annual runoff

除 20 世纪 80 年代和 90 年代外,其余各年代径流降水滞后天数均有逐渐增加的趋势。这说明降水经过停蓄、漫流、河槽集流,然后汇流至下游形成径流的时间在逐渐增大。

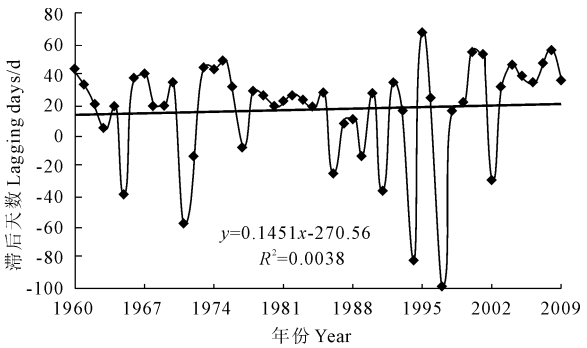

图 3　径流与降水集中期的滞后天数

Fig.3　The lag days between runoff and precipitation concentration period

径流系数可以说明降水量跟径流之间的关系,图 4 是渭河干流中段径流系数的年际变化,年径流系数整体上呈递减趋势,且 $r = 0.488 > 0.354 = \alpha_{0.01}(50)$($P < 0.01$),表明递减趋势极显著,说明降水量转化为径流的部分在逐年减少,被植物截留、填洼、入渗和蒸发的部分增加。

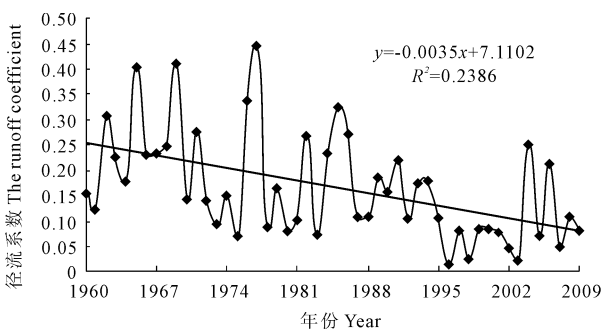

图 4　1960—2009 年径流系数变化

Fig.4　Changes of runoff coefficient during 1960—2009

2.3　突变点分析

通过采用 M－K 突变检验法得出 *UF* － *UB* 图。从图中可以看出渭河干流四季径流的突变时间,春季突变时间点为 1977 年,夏季突变时间为 1993 年,秋季突变时间为 1977 年、1978 年,冬季突变时间为 1972 年,年平均径流的突变时间点为 1987 年。滑动 t 检验法从 $n = 5$、10、15 短、中、长等三种不同时间尺度对突变点检测,认定两种方法验证的结果为可信突变年份,结果见表 2,从表中可以看出春季、夏季和年平均流量的时间突变点均通过了信度检验,秋季突变点通过了 15 a 尺度上的信度检验,冬季的突变时间没有通过信度检验,由于滑动 t 检验法 5 a 时间尺度上 1995 年的信度较高,所以将冬季的时间突变点定为 1995 年。

表 2　突变点信度检验表

Table 2　Mutation point of reliability test table

季节 Seasons	n			突变年份 Mutations year
	5	10	15	
春 Spring	3.86**	2.914**	2.554**	1977
夏 Summer	2.408*	3.879***	4.101***	1993
秋 Autumn	—	—	2.027*	1977
冬 Winter	4.722***	—	—	(1995)
年平均 Annual average	2.145*	1.849*	2.69*	1987

注:*、**、*** 分别代表信度水平超过 0.1、0.05、0.01.

Note: *, ** and *** representing the reliability level of more than 0.1, 0.05 and 0.01.

综上,与年平均突变时间较为接近的是夏季径流流量,春季与秋季突变时间一致,均为 1977 年,夏季突变时间最晚,为 1993 年,冬季突变时间尚不确定。另外,年平均径流突变前后的平均值分别为 155.09 $m^3 \cdot s^{-1}$ 和 78.66 $m^3 \cdot s^{-1}$,突变后流量比突变前减少了 76.43 $m^3 \cdot s^{-1}$,春、夏、秋、冬四季流量突变后比突变之前均减少了 80.80、106.15、137.07、39.72 $m^3 \cdot s^{-1}$,其中秋季径流减少量最多。对比突变前后径流系数的变化,突变前(1960—1987 年)平均径流系数为 0.37,突变后(1987—2009 年)为0.24,说明突变后更多的降水转变为蒸发、入渗等。

3　讨　论

近 50 年来渭河流域干流中段流量变化整体呈递减趋势,径流变化突变时间与秦岭地区整体气候变化突变时间[18-19]基本一致,说明该段流域径流变化与整体气候变化较为对应,其分析结果能够反映环境变化情况。

通过数据分析,该段流域径流对降水存在滞后效应,并且滞后期逐年增长,即径流形成的过程更加复杂化,径流形成的过程往往涉及大气降水、土壤下渗、壤中流、地下水、蒸发、填洼、坡面流和河槽汇流,是气象因素和流域自然地理条件综合作用的过程。该段流域处于关中地区经济发展较快的地区,人类活动对下垫面条件的改变较为严重,这对径流的形成有一定的阻滞作用。马新萍,等[20]研究结果显示 20 世纪 80 和 90 年代径流降水滞后天数较其余年代滞后天数短,也有研究说明 20 世纪 80、90 年代人类活动影响较为强烈。所以,径流与降水滞后期的变化与人类活动影响有很大关系。

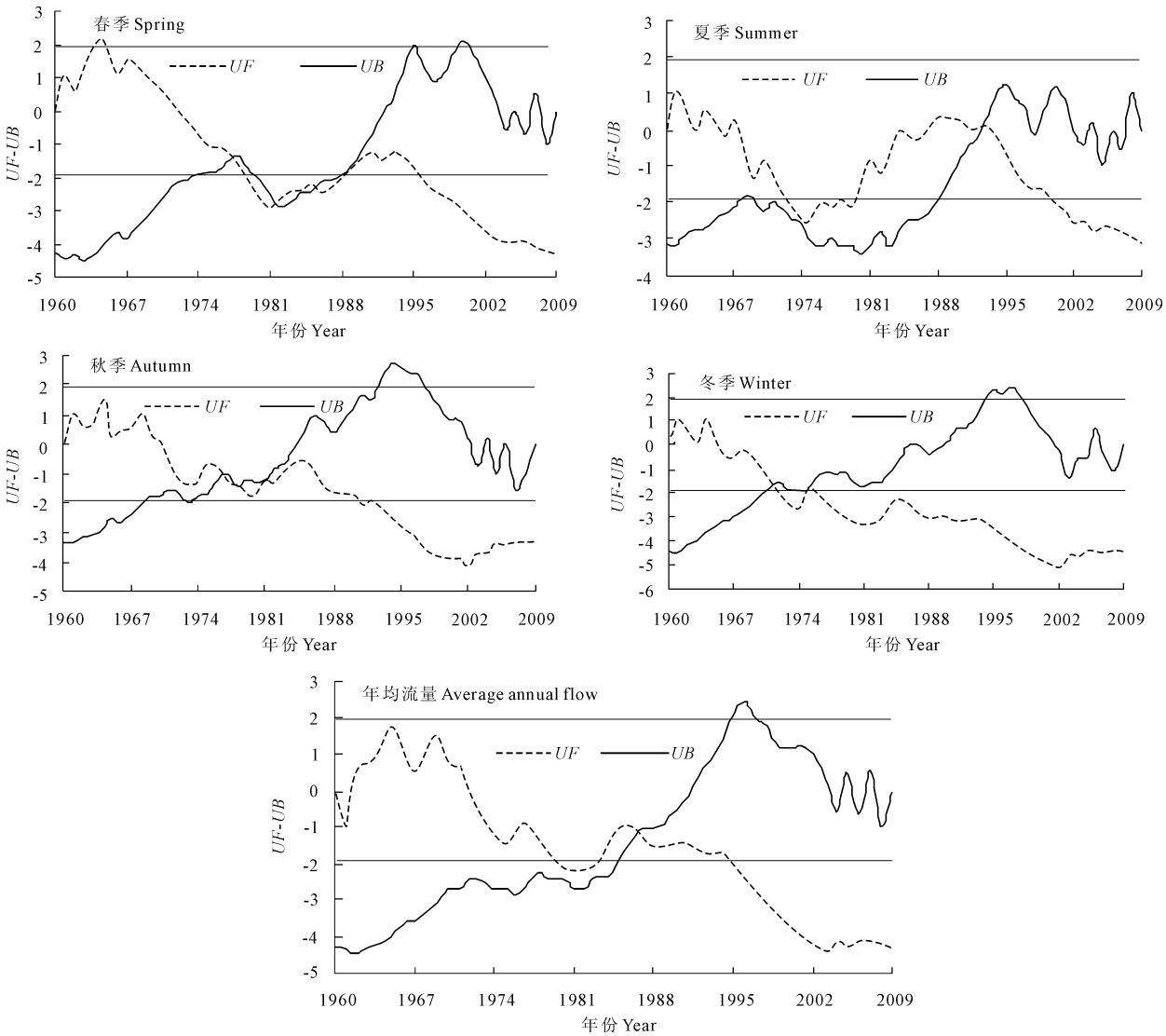

图 5 时间序列突变点分析

Fig.5 The time series mutation – point analysis

此外,径流系数也呈下降趋势,说明 50 年来降水转化为径流的部分逐渐减少,更多的降水被蒸发和入渗。研究证明,近 50 a 来,关中和陕南地区气候总体呈“暖干化”趋势,年均气温明显升高,而年降水量普遍减少[18],因此径流系数的减少可认为与气温升高、蒸发增强有很大关系。

径流变化受综合自然环境的影响,20 世纪 80 年代以来,人类活动对自然地理环境的影响越来越明显,渭河干流中段处于陕西省关中地区,是全省经济发展十分重要的区域,是人类活动对自然环境影响的典型研究区,并且该研究对可持续发展的实现具有重要意义。本文通过定量化分析得出:该流域径流与降水滞后期的变化与人类活动影响有很大关系,径流系数的减少主要受气温升高、蒸发增强的影响,人类活动总是直接或者间接地对某一自然环境条件产生影响,气温的逐年升高是人类活动的影响还是宏观的气候变化造成的?利用模型来区分人类活动因子与气候因子对自然环境影响的贡献量是下一步的研究重点。

4 结 论

本文通过数理统计方法对渭河中游咸阳站的流量时间序列进行定量分析得出,渭河咸阳站四季径流均呈递减趋势,递减率依次为:春季(3—5 月)29.113 $m^3 \cdot s^{-1} \cdot 10a^{-1}$、夏季(6—8 月)24.51 $m^3 \cdot s^{-1} \cdot 10a^{-1}$、秋季(9—11 月)51.275 $m^3 \cdot s^{-1} \cdot 10a^{-1}$、冬季(12 月—翌年 2 月)18.453 $m^3 \cdot s^{-1} \cdot 10a^{-1}$;Kendall 秩相关系数 M 值均大于临界检验值 2.57($a = 0.01$),表现为极显著的递减趋势,秋季径流减少最为明显。

渭河中游径流对降水有滞后的效应,并且降水

量集中期有提前的趋势,其滞后期也逐渐变长,这应该与人类活动影响有很大关系。渭河干流中游段从降水开始经过停蓄、漫流、河槽集流,然后汇流至下游河道大概需要 32 d 左右的时间。50 年来渭河干流中游径流系数呈下降趋势,这与该地区气温升高、蒸发增强有很大关系。

$M-K$ 突变检验法和滑动 t 检验法计算得出四季的突变时间分别为 1977 年、1993 年、1977 年和 1995 年,年均流量的突变时间为 1987 年,春季与秋季突变时间一致,夏季突变时间与年均突变时间较为接近,说明夏季径流变化对年均径流变化贡献最大,该突变时间与秦岭地区整体气候变化突变时间基本一致。

渭河流域径流减少的问题已经引起了广泛关注,气候、农业以及人类活动与径流变化也存在着必然联系。邓振镛[23]等分析了气候变化对渭河源区径流的影响,发现径流主要受降水的影响,这与本文的分析结果一致。渭河源区的武山与北道站控制流域气候变化对径流的影响较强,左德鹏等[21]研究发现,人类活动对径流的影响在渭河上、中游林家村、魏家堡和咸阳站控制流域,泾河下游张家山站控制流域大于 50%以上,水库运行、地表水消耗、水土保持措施、植被恢复和荒山造林是人类活动影响径流变化的主要表现形式。渭河上中游林家村、魏家堡、咸阳站控制流域人类活动对径流变化影响分别占 65%、59%和 55%,这意味着人类活动相比气候变化而言,对径流减少具有相对重要的作用,即水土保持措施、水库运行、河川径流引水、傍河取水影响地表水对地下水的补给以及雨水集蓄等人类活动是径流变化的主要影响因素。

人类活动对流域径流的影响主要表现为 20 世纪 70 年代以后流域内大规模的水利工程、水土保持措施和工农业用水的增加[22],例如,宝鸡峡引渭工程,年均引渭水量 5.99 亿 m^3,冯家山水库和石头河水库等一批大型水库以及数万眼工农业用井的建设,它们对径流量的减少都是以数亿 m^3 计量。可知,工程措施和工农业耗水量不断上升,人类活动对渭河径流的影响越来越剧烈,导致径流量不断减少。由此可以总结出渭河流域人类活动对径流的影响主要分为以下两部分:水土保持工程、植被恢复和荒山造林在减少水土流失的同时也减少了径流的形成;直接从河道取用的工业和农业用水的增长也是导致径流减少的原因。研究径流变化特征的主要目的是反应人地关系的演变过程,从而合理利用自然并避免自然灾害的发生,本研究初步探讨了受人类活动影响较大的渭河干流中段径流的变化规律,最终目的是研究人类活动对径流的影响,因此在下一步的研究中将侧重人为影响的研究。

参 考 文 献:

[1] 侯钦磊,白红英,任园园,等.50 年来渭河干流径流变化及其驱动力分析[J].资源科学,2011,33(8):1505-1512.

[2] 刘　燕,李小龙,胡安焱.河川径流对降水变化的响应研究——以渭河为例[J].干旱区地理,2007,30(1):49-52.

[3] 王西琴,张　远,张艳会.渭河上游天然径流变化及其自然与人为因素影响贡献量[J].自然资源学报,2006,21(6):981-991.

[4] 汤富平,李满春,秦　奋.基于 CA 的小流域分布式降雨径流模拟[J].水科学进展,2010,21(2):173-179.

[5] 张利平,陈小凤,张晓琳,等.VIC 模型与 SWAT 模型在中小流域径流模拟中的对比研究[J].长江流域资源与环境,2009,18(8):745-753.

[6] 李占玲,徐宗学.黑河上游山区径流变化特征分析[J].干旱区资源与环境,2012,26(9):51-57.

[7] 中国科学院地理研究所渭河研究组.渭河下游流域地貌[M].北京:科学出版社,1983.

[8] 郭巧玲,杨云松,畅祥生,等.1957—2008 年黑河流域径流年内分配变化[J].地理科学进展,2011,30(5):550-557.

[9] 何　毅,王　飞,穆兴民.渭河流域 60 年来气温变化特征与区域差异[J].干旱区资源与环境,2012,26(9):14-22.

[10] 符淙斌,王　强.气候突变的定义与检测方法[J].大气科学,1992,16(4):482-493.

[11] 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.

[12] 尹云鹤,吴绍洪,陈　刚.1961—2006 年我国气候变化趋势与突变的区域差异[J].自然资源学报,2009,24(12):2147-2157.

[13] 陈学君,姜梦晶.甘肃定西地区干旱气候突变分析[J].干旱区资源与环境,2012,26(11):68-75.

[14] Mandelbrot B B. The Geometry of Nature[M]. New York: W H Freeman, 1982.

[15] 徐宗学,李占玲,史晓崑.石羊河流域主要气象要素及径流变化趋势分析[J].资源科学,2007,29(5):121-128.

[16] 汤奇成,程天文,李秀云.中国河川月径流的集中度和集中期的初步研究[J].地理学报,1982,37(4):383-393.

[17] 刘贤赵,李嘉竹,宿　宁,等.基于集中度和集中期的径流年内分配研究[J].地理科学,2007,(6):791-795.

[18] 白　晶,延军平,苏坤慧.1958—2007 年秦岭南北气候变化的差异性分析[J].陕西师范大学学报,2010,38(6):98-106.

[19] 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):492-499.

[20] 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.

[21] 左德鹏,徐宗学,隋彩虹,等.气候变化和人类活动对渭河流域径流的影响[J].北京师范大学学报(自然科学版),2013,49(2/3):115-123.

[22] 毕彩霞,穆兴民,赵广举,等.渭河流域气候变化与人类活动对径流的影响[J]. 中国水土保持科学,2013,11(2):33-38.

[23] 邓振镛,张　强,李栋梁,等.气候变化对渭河上游径流量和输沙量的影响[J].中国沙漠,2006,26(6):982-985.