

定量分解气候变化与人类活动对季节径流变异的贡献率

魏晓婷¹, 黄生志¹, 黄强¹, 王浩², 李沛¹, 刘东¹

(1.西安理工大学西北旱区生态水利国家重点实验室,西安 710048;

2.中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室,北京 100038)

摘要: 变化环境下径流序列可能发生变异。当前径流变异的贡献率分解研究多集中于年尺度,而对季节尺度的关注不足。以黄土高原典型流域——泾河流域为研究对象,应用小波分析方法揭示其季尺度径流序列的演变规律,采用有序聚类法和累积距平法对其径流序列进行变异诊断,最后采用累计斜率变化率比较法定量分解气候变化和人类活动对其四季径流变异的贡献率。结果表明:(1)泾河流域夏季和冬季径流的周期变化均在 20 世纪 90 年代左右有发生转变,均由小尺度周期变化转变为较大尺度周期变化;(2)春、夏、秋和冬季径流分别在 1969 年、1996 年、1985 年和 1990 年发生变异;(3)人类活动对春、夏、秋和冬季径流变异的贡献率分别为 50.40%, 89.69%, 39.14% 和 84.59%,在夏季和冬季人类活动(主要是水土保持措施的不断深入)对泾河径流变异的贡献占主导地位,且干扰影响了径流的周期变化。

关键词: 季尺度; 小波分析; 变异诊断; 归因分析; 人类活动; 气候变化

中图分类号: P333.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)06-0182-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2019.06.026

Quantitative Decomposition of Contributions of Climate Change and Human Activities to Seasonal Runoff Variability

WEI Xiaoting¹, HUANG Shengzhi¹, HUANG Qiang¹, WANG Hao², LI Pei¹, LIU Dong¹

(1.State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China,

Xi'an University of Technology, Xi'an 710048; 2.State Key Laboratory of Simulation and Regulation of

Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038)

Abstract: The abrupt change of runoff series may occur in the changing environment. At present, researches on the contributions of runoff variation mainly focus on the annual scale, but pay insufficient attention to the seasonal scale. In this paper, the typical watershed of the Loess Plateau, Jinghe River Basin, was taken as the research object. Firstly, the wavelet analysis method was used to reveal the evolution of seasonal runoff series. Then the order clustering method and cumulative anomaly method were used to diagnose the variation of runoff sequence. Finally, the contributions of climate change and human activities to the seasonal runoff variation were quantified by making a comparison of slope change ratio of the fitted beeline between year and accumulative quantity. Results showed that: (1) The period of summer and winter runoff shift from small scale to large scale after the 1990s; (2) Runoff variation occur in spring, summer, autumn, and winter in Jinghe river basin are 1969, 1996, 1985, and 1990, respectively; (3) The contribution rates of human activities to runoff variation in spring, summer, autumn, and winter are 50.40%, 89.69%, 39.14%, and 84.59%, respectively. The contribution of human activities (mainly soil and water conservation measures) to runoff variation was dominant in summer and winter, which mainly affected the periodic shift of runoff after the 1990s.

Keywords: seasonal scale; wavelet analysis; variation diagnosis; attribution analysis; human activities; climate change

水文分析计算中通常要求水文序列具有一致性,即要求水文序列在流域气候和下垫面相对稳定的条

件下形成^[1]。然而依据 IPCC 第五次评估报告得,从 1880—2012 年全球平均表面温度上升了 0.85 °C^[2]。

收稿日期: 2019-06-09

资助项目: 国家自然科学基金项目(51709221); 陕西省水利科技计划项目(2017slkj-19, 2015slkj-27)

第一作者: 魏晓婷(1995—), 女, 山东莱芜人, 硕士研究生, 主要从事水文水资源研究。E-mail: 761004439@qq.com

通信作者: 黄生志(1988—), 男, 博士, 副教授, 主要从事干旱的形成及传播机理、水文预报、变异诊断与重构等研究。E-mail: huangshengzhi7788@126.com

在全球变暖的气候背景下,降水和蒸发量会发生变化,从而影响径流的水文情势。与此同时,水土保持工作的开展和土地利用等^[3-4]人类活动改变了流域产流的下垫面情况,且河道取水和水库蓄水等^[5]人类活动会消耗径流,也会改变流域天然水循环过程^[6]。气候变化和人类活动的共同影响下,径流序列的一致性可能会遭到破坏^[1],如何科学的定量分解两者对径流变异的贡献率成为国内外学者们研究的热点之一。

目前贡献率分解的研究多集中于年尺度^[7-12],主要方法有基于水文模型的模拟方法、基于 Budyko 假设的计算方法等,陈利群等^[13]采用分布式水文模型 SWAT 模型和 VIC 模型分解了黄河源区气候变化和土地覆被对径流的贡献率;Chiew 等^[14]采用 SIMHYD 模型估计气候变化对澳大利亚东南部径流的影响;GAM 模型^[15]、基于物理的分布式 Mike SHE 模型^[16]和新安江模型^[17]也是探索气候变化、人类活动和径流变化关系的工具。但水文模型结构复杂,需要大量的输入数据,且结果有很大不确定性^[18]。李斌等^[19]应用 6 种 Budyko 公式来评估气候变化对洮儿河流域年径流量的影响;Zhao 等^[20]采用最新的 Budyko 方程(Wang-Tang 公式)定量研究了气候变化和人类活动对黄土高原径流变化的影响。但上述 Budyko 公式不能应用于年内尺度。王随继等^[21]提出的累积量斜率变化率比较方法,方法简便,能清晰地得出人类活动和气候变化对径流的贡献率。故本文将采用累积量斜率变化率比较法进行贡献率分解。

泾河流域是典型的黄土高原河流,是西北干旱、半干旱地区的重要水源,流域生态环境脆弱,人类活动对径流影响大^[22]。Zheng 等^[23]利用 SWAT 模型定量分解气候变化和人类活动对黄土高原径流变化的影响,结果表明黄土高原径流下降 9.6%,其中 95.8%是由土地利用和气候变化引起的;Zhan 等^[24]采用改进的气候弹性方法评价了自然气候变化和人类活动对黄土高原上渭河流域径流量减少的贡献率,发现 71%~78%的径流量减少是由人类活动引起的。近年来,泾河流域水资源短缺的问题日益严重^[25],目前学者们对其径流序列变异的归因分析研究多集中在年尺度,张淑兰等^[6]研究表明,泾河流域年径流呈明显的减少趋势,人类活动逐渐超过降水成为影响径流年际变异的主导因素;陶望雄等^[26]研究认为,泾河张家山站径流和降水年内分配极不均匀,集中度较高,主要集中在 7—9 月。因此,仅从年尺度研究人类活动对泾河流域径流的影响并不能全面揭示径流的变

化原因。季尺度下定量分解气候变化和人类活动对其径流的影响十分有必要,可更好地掌握泾河流域径流的年内变化规律与机理,以期当地水资源的合理配置与调控提供有效的科学依据。

1 研究区概况

泾河是黄河中游支流渭河的第一大支流,也是黄土高原上一条重要的河流,全长 455.1 km,流域面积约 45 400 km²,发源于宁夏泾源县(34°46′—37°19′N, 106°14′—108°42′E),流经宁夏、甘肃、陕西,在陕西高陵县陈家滩注入渭河^[27]。泾河流域是黄土高原的一个典型区,为典型的温带大陆性季风气候,流域内地貌有山区、丘陵、高原、平原 4 种类型,山区占 4.31%;高原沟壑区占 41.72%;黄土丘陵沟壑区占 48.81%;冲积平原区占 5.16%。高原和丘陵区沟壑纵横,沟壑面积占 50%以上,是黄土高原水土流失最为严重的区域之一^[28]。自 20 世纪 60 年代以来,国家高度重视黄土高原地区的生态环境问题,泾河流域的水土保持工作不断推进^[29]。张家山水文站为泾河下游干流控制站,为开发利用泾河流域水利资源提供科学依据,为泾河下游防汛提供水文情报、预报^[30]。本研究用数据为泾河流域张家山水文站 1960—2010 年的月径流数据,10 个气象站的数据(含降水、气温、风速等)以及 1960 年以来泾河流域水土保持面积年代数据,以上数据来源于中国国家气象中心,水文数据摘自水文手册。潜在蒸发量采用彭曼公式^[31]计算得到。所有数据在使用之前均进行了三性审查,审查结果表明本文所采用数据具有较好的可靠性、一致性以及代表性。

2 方法介绍

2.1 小波分析

小波分析^[32-33]是一种窗口大小固定但时间窗和频率窗都可改变的时频局部化方法,它可以同时揭示时频细节信息,目前在水文系统的小波分析中,采用较多的小波函数主要是 Morlet 小波。对于给定的小波函数 $\psi(t)$,水文序列 $f(t) \in L^2(R)$ 的连续小波变换为:

$$W_f(a, b) = |a|^{-\frac{1}{2}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \overline{\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt \quad (1)$$

式中: $\overline{\psi(t)}$ 为 $\psi(t)$ 的复共轭函数; $W_f(a, b)$ 为小波变换系数; a 为尺度伸缩因子; b 为时间平移因子,反映在时间上的平移。

$W_f(a, b)$ 能同时反映时域参数 b 和频域参数 a 的特性,以 b 为横坐标, a 为纵坐标做二维等值线图,即为小波变换系数图。将时间域上的关于 a 的所有小波变换系数的平方进行积分,即为小波方差:

$$\text{Var}(a) = \int_{-\infty}^{\infty} |W_f(a, b)|^2 db \quad (2)$$

小波方差随尺度 a 的变化过程称小波方差图。它反映了波动的能量随尺度的分布。通过小波方差图,可以确定一个水文序列中存在的主要时间尺度,即主周期。

2.2 有序聚类法

有序聚类分析^[34]实质是寻求最优分割点,使同类之间的离差平方和最小。对有 n 个样本的时间序列 x_1, x_2, \dots, x_n , 设可能的突变点为 τ , 则突变前后的离差平方和分别为:

$$V_\tau = \sum_{i=1}^{\tau} (x_i - \bar{x}_\tau)^2 \quad (4)$$

$$V_{n-\tau} = \sum_{i=\tau+1}^n (x_i - \bar{x}_{n-\tau})^2 \quad (4)$$

式中: $\bar{x}_\tau, \bar{x}_{n-\tau}$ 分别为 τ 前后两部分的均值。则总离差平方和为:

$$S_n(\tau) = V_\tau + V_{n-\tau} \quad (5)$$

当 $S = \min_{2 \leq \tau \leq n-1} \{S_n(\tau)\}$ 的时候, τ 为最优二分点, 即为该序列的变异点。

2.3 累积距平法

累积距平法^[34]是由曲线直观判断离散数据点变化趋势的一种非线性统计方法。其计算过程为先计算每年径流量的距平值, 然后按时序逐年累加, 得到累积距平值随时间的变化过程。对于序列 x , 其某一时刻 t 的累积距平 \hat{x} 为:

$$\hat{x} = \sum_{i=1}^t (X_i - \bar{X}), t = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

式中: X_i 为 i 时刻序列值; \bar{X} 为序列均值。

若累积距平曲线呈上升趋势, 表示距平值增加; 反之, 趋势的转折点即为突变点。

2.4 累积斜率变化率比较法

假设累积径流量一年份线性关系式的斜率在变异点前后的 2 个时期分别为 S_{R1} 和 S_{R2} ; 则累积径流量斜率变化率为^[34]:

$$R_s = (S_{R2} - S_{R1}) / S_{R1} \times 100\% \quad (7)$$

式中: R_s 为正表示斜率增大, 为负表示斜率减少。同理可以分别求得累积降雨量、潜在蒸发量的斜率变化率分别为 P_s 和 E_s 。则降水量和潜在蒸发量变化对径流量变化的贡献率分别为:

$$C_p = P_s / R_s \times 100\% \quad (8)$$

$$C_e = E_s / R_s \times 100\% \quad (9)$$

则人类活动对径流变异的贡献率为:

$$C_H = (1 - C_p - C_e) \times 100\% \quad (10)$$

3 结果与分析

3.1 季节径流变化周期分析

采用 Morlet 小波对泾河张家山站 4 个季节径流量的距平序列进行连续小波变换。蓝色区域表示距

平序列值为负, 表示枯水年; 其余颜色区域表示距平序列值为正, 表示丰水年。绿色与蓝色区域交界线为零点等值线, 代表突变线^[35]。

由图 1 可知: (1) 春季径流主要存在 5~7 年和 20~22 年 2 个明显的周期变化规律, 在 20~22 年时间尺度上经历了 4 次明显的丰枯交替; (2) 夏季径流主要存在 2~3 年、10~12 年、20~22 年 3 个明显的周期变化规律, 在 20~22 年的时间尺度上经历了 4 次丰枯交替, 而在 10~12 年尺度上的周期变化于 20 世纪 90 年代后转变为 20~22 的大尺度周期; (3) 秋季径流主要存在 6~8 年、14~16 年 2 个明显的周期变化规律, 14~16 年尺度上经历了 3 次明显的丰枯交替, 20 世纪 90 年代之后该周期变化消失; (4) 冬季径流主要存在 4~5 年、9~12 年 2 个明显的周期变化规律, 9~12 年尺度上有多个丰枯周期变化, 4~5 年尺度上的周期变化于 20 世纪 90 年代后转变为 8~10 年的周期变化。综上可得, 夏季和冬季径流的周期变化均在 20 世纪 90 年代左右发生转变, 均由小尺度周期变化转变为较大尺度周期变化。

由图 2 可知, 春季径流有 6 年和 21 年 2 个主周期, 21 年为第 1 主周期; 夏季径流有 3 年、12 年和 21 年 3 个主周期, 21 年为第 1 主周期; 秋季径流有 2 年、7 年、15 年 3 个主周期, 7 年为第 1 主周期; 冬季径流有 9 年 1 个主周期, 9 年为第 1 主周期。

3.2 季节径流趋势与持续性分析

计算泾河流域张家山站春、夏、秋和冬季径流约占全年径流总量的百分比, 分别为 15%, 42%, 36%, 7%, 夏秋径流量占全年径流量的近 80%。采用 Mann-Kendall 法对其四季径流序列进行趋势分析。由表 1 可知, 除冬季以外, 春、夏、秋季径流序列 Mann-Kendall 检验值均小于 0, 说明春、夏、秋季径流均呈减小趋势; 秋季径流的 Mann-Kendall 检验值 $|U| > 1.96$, 说明秋季径流呈显著减小趋势; 冬季径流序列 Mann-Kendall 检验值大于 0, 且 $|U| > 1.96$, 说明冬季径流呈显著增大趋势。计算四季径流的 Hurst 系数值, 由表 1 得其值均大于 0.5, 故四季径流序列的变化趋势均具有持续性。

3.3 季节径流变异诊断分析

采用有序聚类法和累积距平法进行变异诊断分析。由表 1 可知, 通过累积距平法和有序聚类法 2 种方法得出的径流序列变异点均一致, 春季、夏季、秋季、冬季的变异点分别为 1969 年、1996 年、1985 年和 1990 年; 春夏秋季径流量变异后均较变异点前减小, 变异点后减小幅度分别为 42.26%, 38.82%, 47.95%, 冬季径流量变异后较变异前增大, 增大幅度为 95.83%。

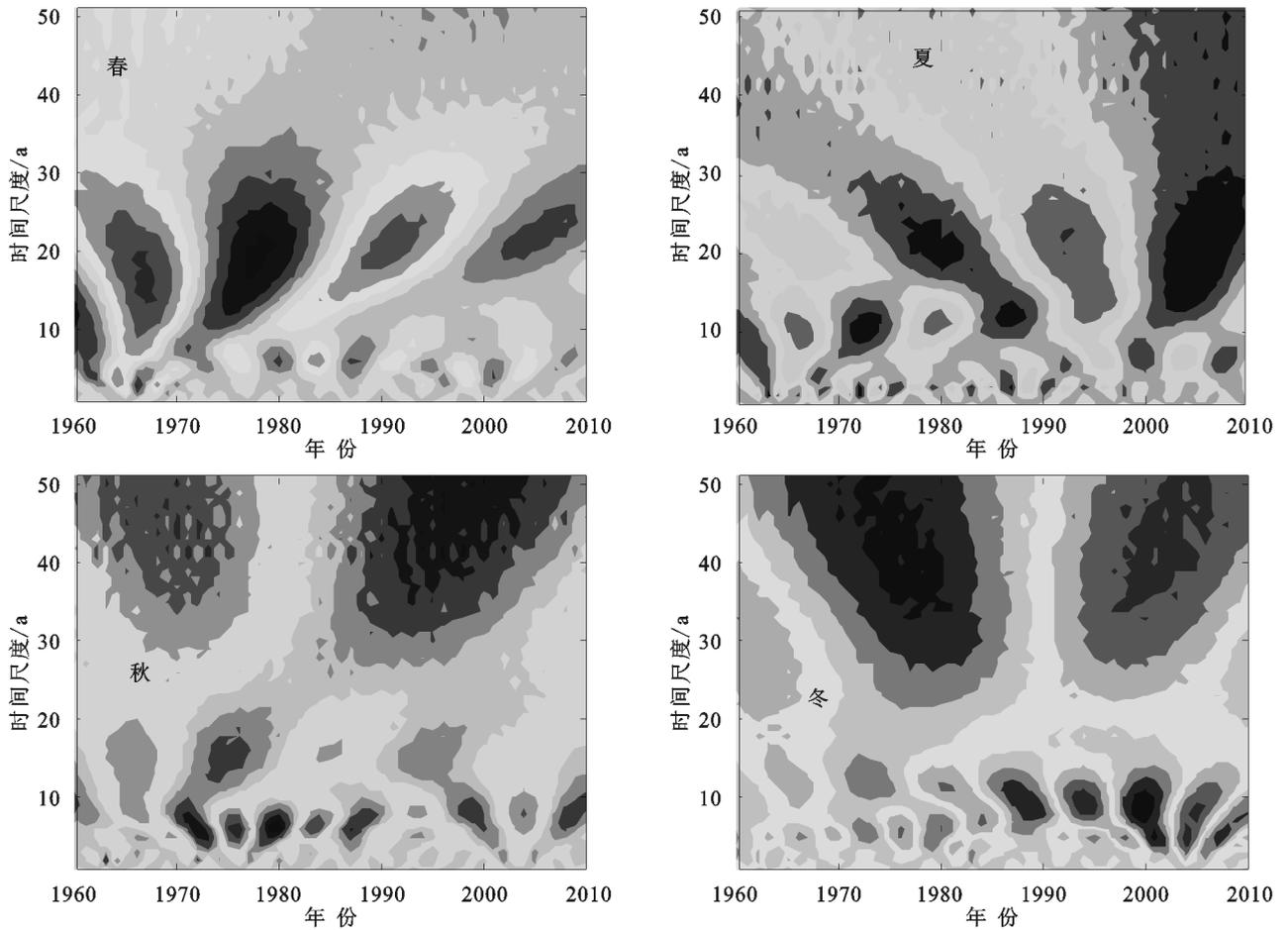


图 1 张家山站四季径流 Morlet 小波系数实部等值线图

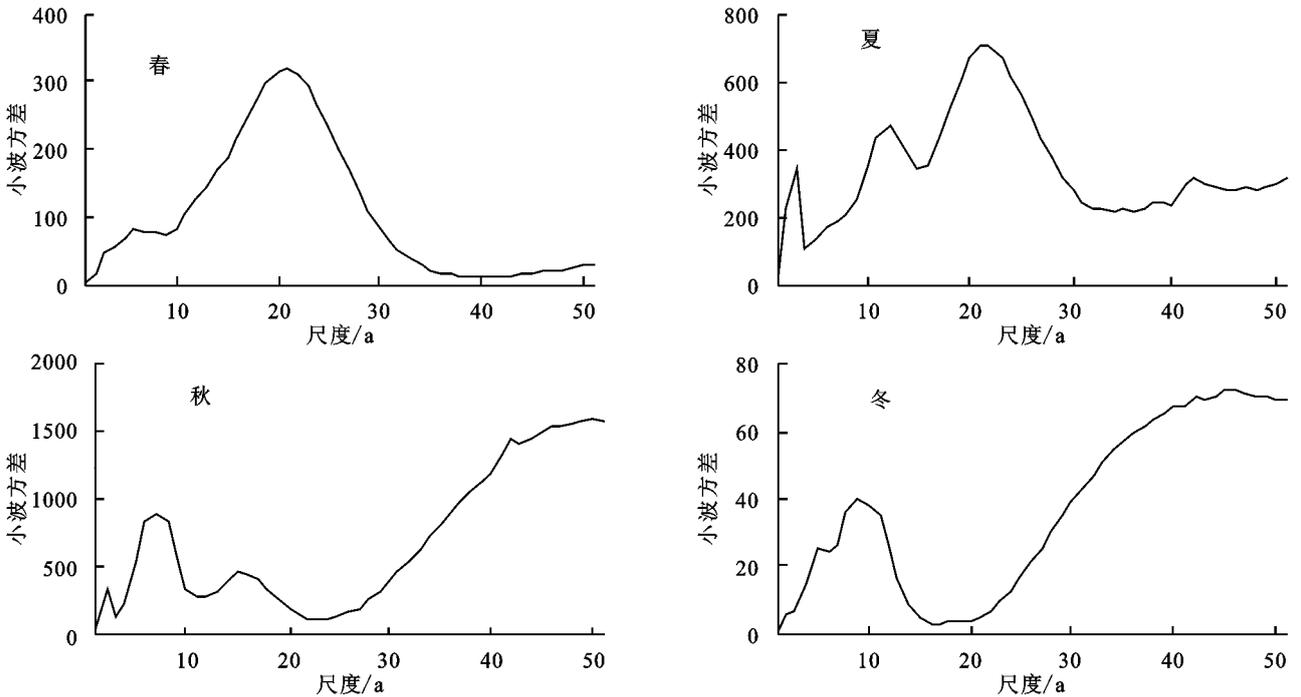


图 2 张家山站四季径流距平小波方差图

3.4 定量分解人类活动与气候变化对四季变异的贡献率

采用累积斜率变化率比较法定量分解气候变化和人类活动对径河流域张家山站四季径流变异的贡献率。由于篇幅限制,本文只列举春季的累积径流、

降水以及潜在蒸发量随年份的变化,其他季节的计算过程同理。以泾河张家山站春季径流的变异点年份为界,定义 1960—1969 年为基准期,基准期的径流仅受气候影响;1970—2010 年为变异期。从图 3 可以看出,分别对年份与累积径流量、年份与累积降水量

和年份与累积潜在蒸发量在 2 个不同的时间段进行线性回归分析,关系式的决定系数 R^2 均大于 0.98,说明相关性极好。由图 3(a)可知,累积径流量斜率在变异期较基准期减少。由表 2 可知,根据公式(7)计算出累积径流量斜率变化率、累积降水量斜率变化率和累积潜在蒸发量斜率变化率。从表 3 可以看出,根据公式(8)和公式(9)计算出降水和潜在蒸发对春季径流变异的贡献率,进而可得气候变化与人类活动对春季径流变异的贡献率。

表 1 张家山站四季径流趋势分析和变异诊断结果

项目	春	夏	秋	冬
占全年径流的百分比/%	15	42	36	7
Mann-Kendall 检验值	-0.41	-1.27	-2.66	2.64
趋势	减小	减小	显著减小	显著增大
Hurst 系数值	0.72	0.58	0.80	0.85
持续性	持续	持续	持续	持续
变异点(有序聚类法)	1969	1996	1985	1990
变异点(累积距平法)	1969	1996	1985	1990
变异点前径流量均值/亿 m^3	3.10	6.44	6.34	0.72
变异点后径流量均值/亿 m^3	1.79	3.94	3.30	1.41
变化量/亿 m^3	-1.31	-2.50	-3.04	0.69
变化幅度/%	-42.26	-38.82	-47.95	95.83

由表 2 和表 3 可知:(1)春季累积径流量斜率在变异期(1970—2010 年)较基准期减小 47.00%,人类活动对径流变异的贡献率为 50.40%;(2)夏季累积径流量斜率在变异期(1997—2010 年)较基准期减小 41.03%,人类活动对其变异的贡献率为 89.69%,故可得人类活动是导致夏季径流变异的主要原因;(3)秋季累积径流量斜率在变异期(1986—2010 年)较基准期减小 44.68%,人类活动对其变异的贡献率为 39.14%,故气候变化是导致秋季径流变异的主要原因;(4)冬季累积径流量斜率在变异期(1991—2010 年)较基准期增大 101.47%,人类活动对其变异的贡献率为 84.58%,故人类活动是导致冬季径流变异的主要原因。

综上可得,夏季和冬季泾河径流的变异点均在 20 世纪 90 年代,人类活动对其径流变异的贡献占主导地位。且由 3.1 季节径流变化周期分析可得夏季和冬季径流的周期变化均在 20 世纪 90 年代左右发生转变,夏季径流在 10~12 年尺度上的周期变化于 20 世纪 90 年代后转变为 20~22 年的大尺度周期;冬季径流在 4~5 年尺度上的周期变化于 20 世纪 90 年代后转变为 8~10 年的较大尺度周期。说明人类活动的干扰影响了径流的周期变化^[36],且在人类活动对径流的影响下,径流由小尺度周期变化转变为较大尺度周期变化。

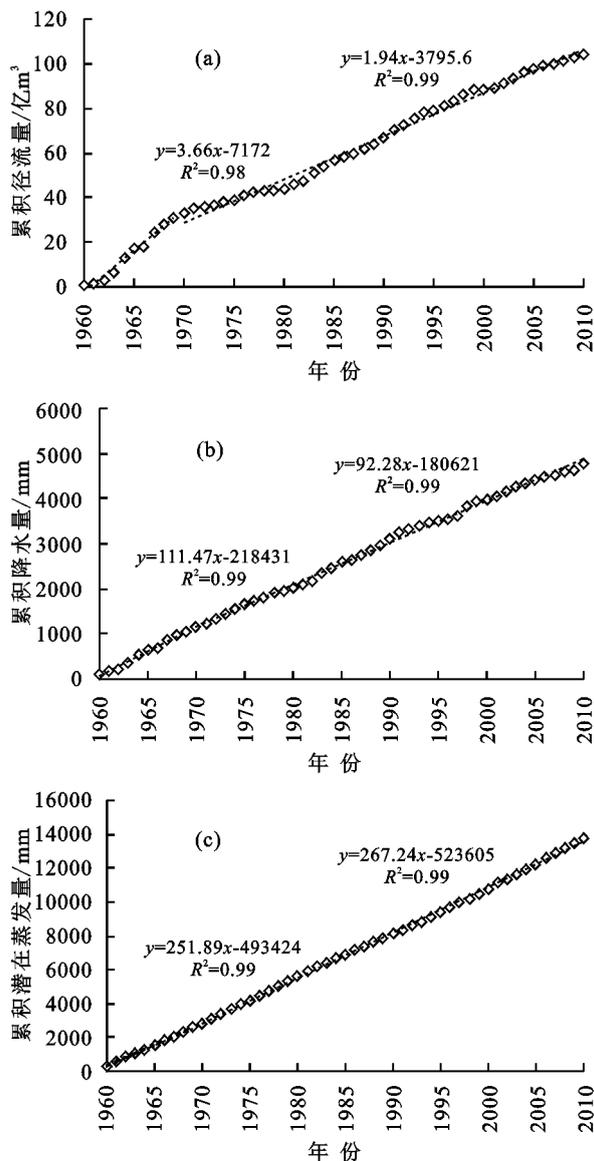


图 3 张家山站春季累积径流量、累积降水量、累积潜在蒸发量与年份的关系曲线

夏季径流变异后较变异前减小,冬季径流变异后较变异前增多。人类活动对夏季和冬季径流产生影响主要表现为大规模人类活动(人口增长、工农业生产发展、城镇化进程的加快等)明显改变了天然状态下的水循环过程,但有研究^[6]表明,泾河取水对径流影响很小,故分析其下垫面变化对径流的影响。20 世纪 60 年代以来,泾河流域水土保持工作开始实施^[29],由图 4 可知,泾河流域梯田、造林、种草和坝地面积在 20 世纪 90 年代均大幅度增长,植被覆盖率变大改变了流域的下垫面情况,不仅改变地表产汇流规律,也改变地下水补给规律^[37]。植被在夏季有效拦截降水,减少地表径流,冬季是旱季,河流主要由地下水补给,植被增加导致地下水补给增多。故泾河流域水土保持面积不断增加导致的流域下垫面变化是影响流域夏季和冬季径流变异的主导因素。

表 2 泾河张家山站春季累积径流量斜率及其变化率

季节	项目	时间段	累积量斜率	改变量	改变率/%
春季	径流	基准期(1960—1969 年)	3.66	—	—
		变异期(1970—2010 年)	1.94	-1.72	-47.00
	降雨	基准期(1960—1969 年)	111.47	—	—
		变异期(1970—2010 年)	92.28	-19.19	-17.22
	潜在蒸发量	基准期(1960—1969 年)	251.89	—	—
		变异期(1970—2010 年)	267.24	15.35	6.09
夏季	径流	基准期(1960—1996 年)	6.24	—	—
		变异期(1997—2010 年)	3.68	-2.56	-41.03
	降雨	基准期(1960—1996 年)	262.70	—	—
		变异期(1997—2010 年)	252.88	-9.82	-3.74
	潜在蒸发量	基准期(1960—1996 年)	364.97	—	—
		变异期(1997—2010 年)	366.76	1.79	0.49
秋季	径流	基准期(1960—1985 年)	6.20	—	—
		变异期(1986—2010 年)	3.43	-2.77	-44.68
	降雨	基准期(1960—1985 年)	148.64	—	—
		变异期(1986—2010 年)	100.29	-34.51	-23.22
	潜在蒸发量	基准期(1960—1985 年)	150.31	—	—
		变异期(1986—2010 年)	156.28	5.97	3.97
冬季	径流	基准期(1960—1990 年)	0.68	—	—
		变异期(1991—2010 年)	1.37	0.69	101.47
	降雨	基准期(1960—1990 年)	11.89	—	—
		变异期(1991—2010 年)	14.20	2.31	19.43
	潜在蒸发量	基准期(1960—1990 年)	82.64	—	—
		变异期(1991—2010 年)	85.77	3.13	3.79

表 3 气候变化与人类活动对张家山站四季径流变异的贡献率

季节	时间段	降雨	潜在蒸发	气候变化	人类活动
春季	变异期(1970—2010 年)	36.63	12.97	49.60	50.40
夏季	变异期(1997—2010 年)	9.11	1.20	10.31	89.69
秋季	变异期(1986—2010 年)	51.97	8.89	60.86	39.14
冬季	变异期(1991—2010 年)	19.15	-3.73	15.42	84.58

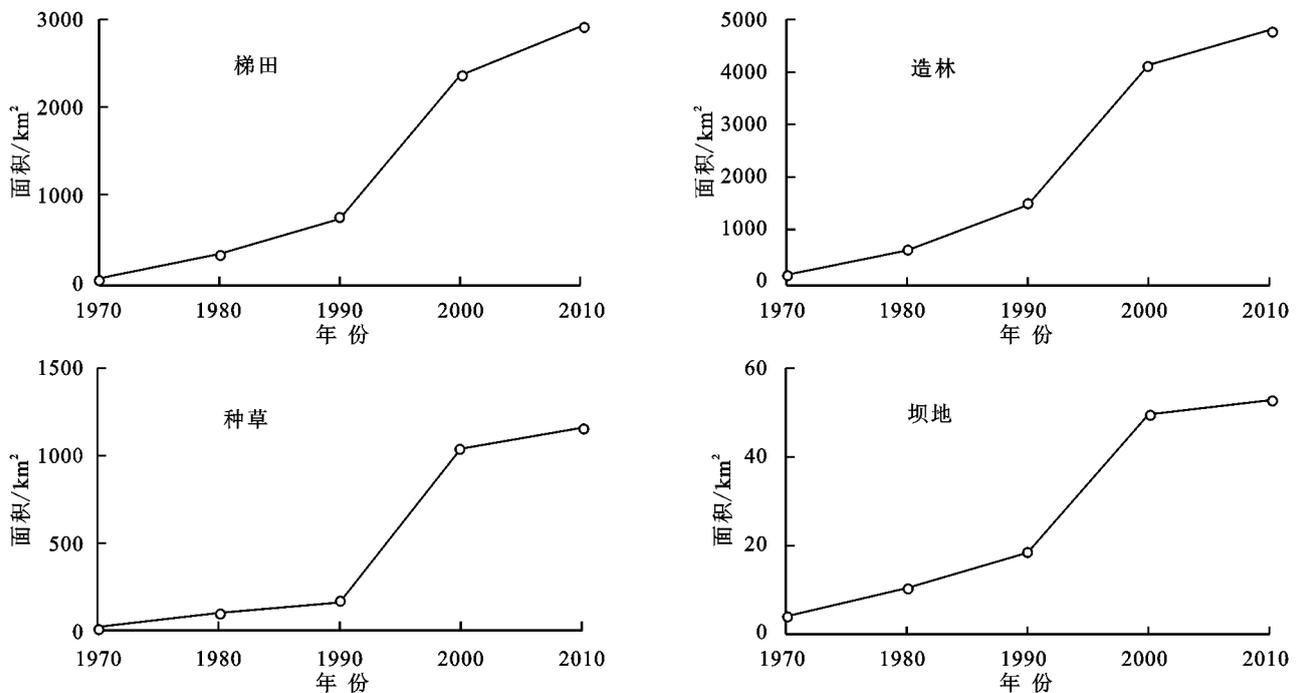


图 4 泾河流域水土保持面积变化

4 结论

(1) 泾河流域四季平均径流量在不同的尺度周期中表现出不同的丰枯变化规律, 夏季和冬季径流的周期变化均在 20 世纪 90 年代左右发生转变, 均由小尺度周期变化转变为较大尺度周期变化, 原因是人类活动的干扰影响了径流的周期变化。

(2) 采用 Mann-Kendall 法对泾河张家山站四季径流序列进行趋势分析可得, 春、夏、秋季径流均呈减小趋势, 冬季径流呈显著增大趋势; 采用 Hurst 系数法进行持续性分析可知, 四季径流序列的变化趋势均具有持续性; 采用累积距平法和有序聚类法得出四季径流的变异点分别为 1969 年、1996 年、1985 年和 1990 年, 春、夏、秋季径流量变异后均较变异点前减小, 冬季径流量变异后较变异前增大。

(3) 采用累积斜率变化率比较法定量分解气候变化和人类活动对泾河张家山站四季径流变异的贡献率, 结果可得: 人类活动对四季径流变异的贡献率分别为 50.40%, 89.69%, 39.14%, 84.59%。夏季和冬季人类活动是影响泾河径流变异的主要原因。自 20 世纪 60 年代以来, 泾河持续增长的水土保持面积, 改变了流域的下垫面情况, 丰水季夏季减水作用明显, 故夏季径流量减少; 枯水季冬季径流主要靠地下水补给, 植被增加了泾河流域径流的地下水补给, 故冬季径流量增大。

参考文献:

- [1] 谢平, 陈广才, 雷红富, 等. 水文变异诊断系统[J]. 水力发电学报, 2010, 29(1): 85-91.
- [2] Michiel R V den B. Antarctica and the IPCC[J]. Antarctic Science, 2007, 19(3): 281.
- [3] Cruise J F, Laymon C A, Al-Hamdan O. Impact of 20 years of land-cover change on the hydrology of streams in the southeastern United States[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2010, 46(6): 1159-1170.
- [4] Zheng J K, Yu X X, Deng W P, et al. Sensitivity of land-use change to streamflow in Chaobai River Basin [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2013, 18(4): 457-464.
- [5] Rossi A, Massei N, Laignel B, et al. The response of the Mississippi River to climate fluctuations and reservoir construction as indicated by wavelet analysis of streamflow and suspended-sediment load, 1950—1975[J]. Journal of Hydrology, 2009, 377(3/4): 237-244.
- [6] 张淑兰, 王彦辉, 于澎涛, 等. 定量区分人类活动和降水量变化对泾河上游径流变化的影响[J]. 水土保持学报, 2010, 24(4): 53-58.
- [7] 刘剑宇, 张强, 邓晓宇, 等. 气候变化和人类活动对鄱阳湖流域径流过程影响的定量分析[J]. 湖泊科学, 2016, 28(2): 432-443.
- [8] 赵安周, 赵玉玲, 刘宪锋, 等. 气候变化和人类活动对渭河流域蓝水绿水影响研究[J]. 地理科学, 2016, 36(4): 571-579.
- [9] 刘剑宇, 张强, 陈喜, 等. 气候变化和人类活动对中国地表水文过程影响定量研究[J]. 地理学报, 2016, 71(11): 1875-1885.
- [10] 马龙, 刘廷玺, 马丽, 等. 气候变化和人类活动对辽河中上游径流变化的贡献[J]. 冰川冻土, 2015, 37(2): 470-479.
- [11] 徐夏楠, 高建华, 贾建军, 等. 气候变化和人类活动对鄱阳湖流域入湖输沙量影响的定量估算[J]. 地理研究, 2015, 34(5): 838-850.
- [12] 张调风, 朱西德, 王永剑, 等. 气候变化和人类活动对湟水河流域径流量影响的定量评估[J]. 资源科学, 2014, 36(11): 2256-2262.
- [13] 陈利群, 刘昌明. 黄河源区气候和土地覆被变化对径流的影响[J]. 中国环境科学, 2007, 27(4): 559-565.
- [14] Chiew F H S, Teng J, Vaze J, et al. Estimating climate change impact on runoff across southeast Australia: Method, results, and implications of the modeling method [J]. Water Resources Research, 2009, 45(10): 82-90.
- [15] Schilling K E, Zhang Y K, Liu H, et al. Quantifying the effect of land use land cover change on increasing discharge in the Upper Mississippi River[J]. Journal of Hydrology, 2010, 387(3/4): 343-345.
- [16] Bourgault M A, Larocque M, Roy M. Simulation of aquifer-peatland-river interactions under climate change [J]. Hydrology Research, 2014, 45(3): 425-440.
- [17] Singh V P, Chen Y D, Xu C Y, et al. Comparison of hydrological impacts of climate change simulated by six hydrological models in the Dongjiang Basin, South China[J]. Journal of Hydrology, 2007, 336(3/4): 316-333.
- [18] 陈仁升, 康尔泗, 杨建平, 等. 水文模型研究综述[J]. 中国沙漠, 2003, 23(3): 15-23.
- [19] 李斌, 李丽娟, 覃驭楚, 等. 基于 Budyko 假设评估洮儿河流域中上游气候变化的径流影响[J]. 资源科学, 2011, 33(1): 70-76.
- [20] Zhao J, Huang S Z, Huang Q, et al. Detecting the dominant cause of streamflow decline in the Loess Plateau of China based on the Latest Budyko Equation [J]. Water, 2018, 10(9): 1277.
- [21] 王随继, 闫云霞, 颜明, 等. 皇甫川流域降水和人类活动对径流量变化的贡献率分析: 累积量斜率变化率比较方法的提出及应用[J]. 地理学报, 2012, 67(3): 388-397.
- [22] 陈抒晨, 赵安周, 朱秀芳, 等. 径流对气候变化和人类活

- 动的响应:以渭河流域为例[J].北京师范大学学报(自然科学版),2017,53(4):472-478.
- [23] Zheng F L, Liu W Z, Li Z, et al. Impacts of land use change and climate variability on hydrology in an agricultural catchment on the Loess Plateau of China[J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 377(1/2):35-42.
- [24] Zhan C S, Jiang S S, Sun F B, et al. Quantitative contribution of climate change and human activities to runoff changes in the Wei River basin, China[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2014, 18(8):3069-3077.
- [25] 张淑兰,王彦辉,于澎涛,等.人类活动对泾河流域径流时空变化的影响[J].干旱区资源与环境,2011,25(6):66-72.
- [26] 陶望雄,贾志峰,刘招,等.泾河张家山站径流及其控制流域降雨变化特征分析[J].长江科学院院报,2014,31(8):41-44.
- [27] 冉大川.泾河流域人类活动对地表径流量的影响分析[J].西北水资源与水工程,1998,2(1):34-38.
- [28] 齐清,王天明,寇晓军,等.泾河流域植被覆盖时空演变及其与降水的关系[J].植物生态学报,2009,31(8):246-253.
- [29] 李敏,张长印,王海燕.黄土高原水土保持治理阶段研究[J].中国水土保持,2019(2):1-4.
- [30] 王晓斌.泾河张家山水文站设立的考证[J].陕西水利,2016(6):7-10.
- [31] Monteith J L. Evaporation and environment. *Symposia of the society for experimental biology*[J]. *Journal of Water Resource and Protection*, 1965, 19:205-234.
- [32] 王文圣,丁晶,向红莲.小波分析在水文学中的应用研究及展望[J].水科学进展,2002,13(4):515-520.
- [33] Nakken M. Wavelet analysis of rainfall-runoff variability isolating climatic from anthropogenic patterns[J]. *Environmental Modelling and Software*, 1999, 14(4):283-295.
- [34] 黄强,孔波,樊晶晶.水文要素变异综合诊断[J].人民黄河,2016,38(10):18-23.
- [35] 夏库热·塔依尔,海米提·依米提,麦麦提吐尔逊·艾则孜,等.基于小波分析的开都河径流变化周期研究[J].水土保持研究,2014,21(1):142-146.
- [36] 吕翠美,吴泽宁,刘文立,等.伊河流域径流周期变化特征的小波分析[J].人民黄河,2007,29(5):26-28.
- [37] 任立良,张炜,李春红,等.中国北方地区人类活动对地表水资源的影响研究[J].河海大学学报(自然科学版),2001,29(4):13-18.
- (上接第181页)
- [9] 张川,陈洪松,张伟,等.喀斯特坡面表层土壤含水量、容重和饱和导水率的空间变异特征[J].应用生态学报,2014,25(6):1585-1591.
- [10] 廖凯华,徐绍辉,程桂福.大沽河流域土壤饱和导水率空间变异特征[J].土壤,2009,41(1):147-151.
- [11] 彭舜磊,由文辉,沈会涛.植被群落演替对土壤饱和导水率的影响[J].农业工程学报,2010,26(11):78-84.
- [12] 李胜龙,张海林,刘目兴,等.稻田—田埂过渡区土壤水分运动与保持特征[J].水土保持学报,2017,31(2):122-128.
- [13] Wang B, Zhang G H, Shi Y Y, et al. Effect of natural restoration time of abandoned farmland on soil detachment by overland flow in the Loess Plateau of China[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2013, 38(14):1725-1734.
- [14] 王毅荣.黄土高原植被生长期旱涝对全球气候变化响应[J].干旱区地理,2005,28(2):161-166.
- [15] 王国梁,刘国彬,党小虎.黄土丘陵区不同土地利用方式对土壤含水率的影响[J].农业工程学报,2009,25(2):31-35.
- [16] 栾莉莉,张光辉,孙龙,等.黄土高原区典型植被枯落物蓄积量空间变化特征[J].中国水土保持科学,2015,13(6):48-53.
- [17] 侯喜禄,白岗栓.黄土丘陵区森林保持水土效益及其机理的研究[J].水土保持研究,1996,3(2):98-103.
- [18] 夏积德,吴发启,周波.黄土高原丘陵沟壑区坡地耕作方式对土壤侵蚀的影响研究[J].水土保持学报,2016,30(4):64-67.
- [19] 杨思存,王成宝,霍琳,等.不同耕作措施对甘肃引黄灌区耕地土壤有机碳的影响[J].农业工程学报,2019,35(2):114-121.
- [20] 吕岩,仵磊,徐燕,等.有机质对草炭土物理力学性质影响的机理分析[J].岩土工程学报,2011,33(4):655-660.