

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.01.025.

田晋华, 李正勤, 柯造成, 等. 近 60 年来渭河甘肃段径流演变及驱动因素[J]. 水土保持研究, 2023, 30(1):183-189.

TIAN Jinhua, LI Zhengqin, KE Haocheng, et al. Runoff Evolution and Driving Factors of Weihe River in Gansu in Recent 60 Years[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(1):183-189.

# 近 60 年来渭河甘肃段径流演变及驱动因素

田晋华<sup>1</sup>, 李正勤<sup>2</sup>, 柯造成<sup>2</sup>, 梁 靓<sup>2</sup>, 田孟涵<sup>2</sup>, 高金芳<sup>1</sup>

(1. 甘肃省水利厅 兰州水土保持科学试验站, 兰州 730020; 2. 兰州理工大学, 兰州 730050)

**摘 要:**分析径流量的长期变化趋势并研究其影响因素是高效利用地区水资源的前提。为明确气候变化与人类活动对渭河甘肃段径流的影响,利用 Mann-Kendall 方法和 R/S 方法,分析了渭河甘肃段径流、降水与气温等水文气象要素的变化趋势;利用小波分析对径流的周期性特征进行了研究;通过 Mann-Kendall 方法与累积距平法判定了径流变异年份,并将整个研究周期分为基准期与人类影响活动期;通过累积量斜率变化率法定量计算了气候变化与人类活动对径流变化的贡献。结果表明:(1) 1953—2010 年,渭河甘肃段径流量与降水量整体呈下降趋势,气温呈显著上升趋势。(2) 径流突变出现在 1991 年,人类活动影响期较基准期径流量下降 8.02 亿 m<sup>3</sup>,其中气候变化对径流量减少贡献率为 37.57%,人类活动影响占比 62.43%。综上,人类活动对径流的影响占据主导。研究阐明了渭河甘肃段未来水文气象变化趋势,并对径流变化驱动因素的定量分析,为地区水资源的高效利用提供了理论依据。

**关键词:**径流演变; 气候变化; 人类活动; 驱动因素; 渭河甘肃段

**中图分类号:**TV121+1

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2023)01-0183-07

## Runoff Evolution and Driving Factors of Weihe River in Gansu in Recent 60 Years

TIAN Jinhua<sup>1</sup>, LI Zhengqin<sup>2</sup>, KE Haocheng<sup>2</sup>, LIANG Liang<sup>2</sup>, TIAN Menghan<sup>2</sup>, GAO Jinfang<sup>1</sup>

(1. Lanzhou Soil and Water Conservation Scientific Experimental Station, Gansu Provincial Water Resources Department, Lanzhou 730020, China; 2. Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** Analyzing the long-term variation trend of runoff and studying its influencing factors are the premise of efficient utilization of regional water resources. In order to reveal the impact of climate change and human activities on the runoff in the Weihe River in Gansu section, runoff, precipitation and temperature were analyzed by using Mann-Kendall Test and R/S method in this study. The periodic characteristics of runoff were studied by Wavelet analysis. The year of runoff variation was determined by Mann-Kendall Test and cumulative anomaly method, and the whole study period was divided into the base period and the anthropogenic period. The contribution of different driving factors to runoff change was calculated quantitatively by using the method of cumulative slope change rate. The results showed that: (1) from 1953 to 2010, the runoff and precipitation in the Weihe River in Gansu section showed a decreasing trend, and the air temperature showed a significant increasing trend; (2) the abrupt change of runoff occurred in 1991, and the runoff decreased by 802 million cubic meters in the anthropogenic period compared with the base period; the contribution rate of climate change to the decrease of runoff was 37.57%, and the anthropogenic effect accounted for 62.43%. To sum up, the impact of human activities on runoff is dominant. This study clarifies the hydrometeorological trend of the Weihe River in Gansu section in the future, and makes a quantitative analysis of the driving factors of runoff

收稿日期: 2021-10-03

修回日期: 2021-10-28

资助项目: 甘肃省水利科研技术推广项目(甘水建管发[2021]71号、[2020]46号); 国家自然科学基金项目(4210070887)

第一作者: 田晋华(1986—), 男, 甘肃武威人, 高级工程师, 硕士, 主要从事水土保持与水利工程研究工作。E-mail: tjhggy@yeah.net

通信作者: 柯造成(1986—), 男, 甘肃武威人, 副教授, 博士, 主要从事生态水文与水资源方面的研究工作。E-mail: kehc@lut.edu.cn

<http://stbcjy.paperonce.org>

change, which can provide a theoretical basis for the efficient utilization of regional water resources.

**Keywords:** runoff evolution; climate change; human activities; driving factors; Weihe River in Gansu section

水资源是影响流域环境的重要因素。近年来,全球性的气候变化改变了流域水文循环态势<sup>[1]</sup>。另一方面,人类活动诸如水利工程、水土保持工程等直接或间接地影响到流域产汇流过程,其中以黄土高原渭河流域等最为典型。一般认为,径流过程受气候变化及人类活动的综合影响<sup>[2]</sup>,因此明确区分径流变化原因有助于科学认识水文过程,为指导地区水资源利用与管理提供科学依据。

径流变化驱动因素响应一直是行业研究的热门问题,国内外学者关于气候变化及人类活动对径流过程的影响进行了大量研究。张建云等<sup>[3]</sup>通过模型场景预测,分析了径流对气候变化的响应,发现气温升高和降水减少导致黄河中游径流减少。刘廷玺等<sup>[4]</sup>分析 1957—2010 年辽河流域径流变化,定量研究径流驱动因素响应,发现不同站点径流变化对气候变化与人类活动影响的响应程度差距较大。郭爱军等<sup>[5]</sup>研究表明近 50 a 人类活动对渭河径流减少的贡献率接近 70%。岳永杰等<sup>[6]</sup>研究发现降水是根河径流变化的主要原因,但不同时期径流对降水量的响应不同。龚珺夫等<sup>[7]</sup>研究延河流域径流过程响应过程,发现人类活动对径流减少的贡献率达到 56%,地区暖干化趋势明显。Li 等<sup>[8]</sup>对汉江的研究表明气候变化是各季径流变化的主导因素,气候变化与人类活动对径流的影响呈现明显的季节动态性。Mwangi 等<sup>[9]</sup>对肯尼亚马拉河流域的研究表明土地利用变化对径流影响贡献率达到 97.5%。Yan 等<sup>[10]</sup>通过 VIC 模型研究滦河流域,发现人类活动主要影响汛期径流,耕地转为建设用地对径流变化有巨大影响。由此可见,气候变化与人类活动对不同地区径流的影响差距较大。

现有渭河径流变化及驱动因素影响的研究一般都集中于渭河关中段,对于渭河甘肃段鲜有涉及。研究渭河甘肃段水文气象要素的演变及驱动因素的响应,对甘肃省东南部水土保持与水资源高效利用具有十分重要的意义。

本文以渭河甘肃段为研究区域,分析地区径流变化特征规律,在此基础上计算气候变化与人类活动对渭河径流变化的贡献率,为地区水土保持工作及水资源高效可持续利用提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

渭河发源于甘肃省渭源县,是黄河最大支流,其

干支流经陕甘宁三省,于陕西潼关汇入黄河。渭河干流全长 818 km,流域总面积 13.48 万 km<sup>2</sup>,其中甘肃省境内干流长 316 km,北道站以上 254 km,控制面积 2.49 万 km<sup>2</sup>。流域属于温带季风气候区,大陆性气候特征显著,降水年内分布差异大,主要集中在 7—9 月。渭河甘肃段区域年降水量 400~600 mm,年平均气温 4~10℃<sup>[11]</sup>。研究区位置见图 1。

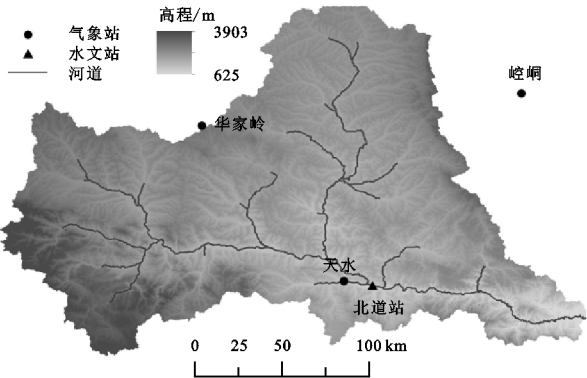


图 1 研究区概况示意图

### 1.2 数据来源

本文选取渭河干流北道水文站 1953—2010 年的月径流资料数据,资料来自于甘肃省水资源公报。北道站是渭河甘肃段的控制站点,可以较好的反映渭河甘肃段的径流特征。气象数据资料选择 1953—2010 年天水、华家岭、崆峒 3 个站点月气象数据资料,数据来自于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)。土地利用现状遥感监测数据选用 1980 年与 2010 年 30 m 土地利用数据,数据来自于地理国情监测云平台(<http://www.dsac.cn/>)。

### 1.3 研究方法

1.3.1 Mann-Kendall 法 Mann-Kendall 法<sup>[11]</sup>是一种非参数统计检验方法,其应用不受个别异常值的干扰,计算过程简便,因此适用于水文气象等非正态分布的数据,可用来分析水文气象时间序列趋势性与变异性。

构造时间序列  $x$  的秩序列  $S_k$

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

式中: $S_k$  是第  $i$  时刻数值大于第  $j$  时刻数值个数的累计数,  $i \geq j$ 。

定义统计量

$$UF_k = \frac{S_k - E(S_k)}{\sqrt{\text{var}(S_k)}} \quad (k=1,2,\cdots,n) \tag{2}$$

式中:

$$E(S_k) = \frac{n(n+1)}{4} \tag{3}$$

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

(4)

其计算步骤为(1) 分别构造顺序与逆序时间序列的秩序列  $S_k$ ,计算对应  $UF_k$  与  $UB_k$ 。(2) 给定置信度  $\alpha$ ,若  $UF_k > U_{\alpha/2}$ ,证明通过置信度为  $\alpha$  的显著性检验,时间序列趋势显著。(3) 绘制  $UF_k$  与  $UB_k$  两条曲线,临界区间内的曲线交点为潜在突变发生时刻。

1.3.2 R/S 分析法 Mann-Kendall 检验只能对已有数据进行趋势性判断,如对未来趋势进行判断,则需要利用 Hurst 系数。R/S 分析法<sup>[12]</sup>定义了定义极差  $R$  与标准差  $S$ 。其比值即

$$R(t)/S(t)=(Ct)^H$$

(5)

式中: $H$  为 Hurst 指数,通过线性回归分析即可求取  $H$ 。

$H>0.5$ ,未来变化表现为与原有趋势一致的正持续性, $H$  越大,正持续性越强。 $H=0.5$ ,则代表未来序列随机独立。如果  $0\leq H<0.5$ ,则代表反持续性。

1.3.3 累积距平法 累积距平法<sup>[13]</sup>可根据图像曲线变动直观判断数据变化。对于序列  $x$ ,其  $t$  时刻的累积距平值表示为

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

(6)

式中: $\overline{X}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^nX_i$ 。通过观察累积距平曲线趋势变化判断变异,趋势发生变化的时刻即为变异时刻。

1.3.4 变差系数  $C_v$  变差系数  $C_v$ <sup>[14]</sup>是评价数据离散程度的相对指标,一般用来分析数据波动情况。 $C_v$  值越大,代表数据变化幅度越大。其计算公式为

$$C_v=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n(K_i-1)^2}{n}}$$

(7)

式中: $K_i$  为模比系数,即实测序列与均值的比值。

1.3.5 小波分析 小波分析<sup>[15]</sup>可以通过变换突出时间序列中的多种变化周期,因此用来分析水文气象要素的周期性变化。在水文气象要素分析中选择小波函数时,一般选择复 Morlet 小波函数做为基函数。为降低噪声影响需要先对水文要素作标准化处理,其标准化方法如下<sup>[16]</sup>:

$$x'_i=\frac{x_i-\overline{x}}{\sigma}$$

(8)

式中: $x'_i$  表示标准化后序列值; $x_i$  为原始序列值; $\overline{x}$  为原始序列均值; $\sigma$  为原始序列标准差。

1.3.6 累积量斜率变化率法 累积量斜率变化率法<sup>[17]</sup>是一种定量分离出气候变化和人类活动对径流量变化的贡献率的方法,该方法通过计算基准期与人类活动影响期各累积量斜率变化率与径流累积量斜率变化率的比值,从而计算各因素变化对径流变化影

响的贡献率。

将基准期定为  $a$  时期,影响期定为  $b$  时期,则前后两个时期的径流量为  $S_{Ra}$  与  $S_{Rb}$ ,气温分别为  $S_{Ta}$  与  $S_{Tb}$ ,降水分别为  $S_{Pa}$  与  $S_{Pb}$ 。设降水对径流变化的贡献率为  $C_P$ ,气温对径流变化贡献率为  $C_T$ ,人类活动对径流变化贡献率  $C_h=1-C_P-C_T$ 。其中

$$C_P=(S_{Pa}-S_{Pb})/|S_{Pb}|/((S_{Ra}-S_{Rb})/|S_{Rb}|)\times 100\%$$

(9)

$$C_T=-(S_{Ta}-S_{Tb})/|S_{Tb}|/((S_{Ra}-S_{Rb})/|S_{Rb}|)\times 100\%$$

(10)

## 2 结果与分析

### 2.1 渭河水文气象要素变化

2.1.1 渭河甘肃段径流变化特征 对渭河甘肃段水文气象要素年际变化特征值进行计算处理,其详细结果见表 1,表 2。渭河近 58 年年径流量平均值为 11.06 亿  $\text{m}^3$ ,最大年径流量为 30.34 亿  $\text{m}^3$ (1967 年),最小年径流量仅 1.287 亿  $\text{m}^3$ (1997 年)。通过线性回归分析对渭河甘肃段年径流趋势进行了判断,其结果见图 2,由图 2 可知,渭河甘肃段径流量年际整体呈现下降趋势,年径流量以 0.2 亿  $\text{m}^3/\text{a}$  的速度减少。径流序列 Mann-Kendall 检验通过置信水平  $\alpha=0.01$  的显著性检验,Hurst 指数  $H=0.87$ ,表明未来一段时间内径流仍会呈现下降趋势,且下降趋势十分强烈。

表 1 渭河甘肃段径流降水气温年际变化特征值

参数	特征	径流/ $10^8\text{ m}^3$	降水/mm	气温/ $^{\circ}\text{C}$
极大值	均值	11.06	499.84	7.88
	$C_v$	0.56	0.19	0.08
	年份	1967	1967	2006
	极值	30.34	708.80	9.20
	与多年均值比值	2.74	1.42	1.17
极小值	年份	1997	1982	1967
	极值	1.29	311.80	6.58
	与多年均值比值	0.12	0.62	0.84
	极值比	23.57	2.27	1.40

表 2 水文气象要素趋势分析相关参数

参数	线性回归 方程	M-K 法统计 U	置信 水平	Hurst 指数	趋势
径流	$y=-0.2026x+17.14$ $R^2=0.30$	4.525	0.01	0.87	显著下降
降水	$y=-1.153x+544.54$ $R^2=0.074$	2.329	0.05	0.72	下降
平均气温	$y=0.0233x+7.1918$ $R^2=0.43$	6.15	0.01	0.76	显著上升

2.1.2 渭河甘肃段降水变化特征 渭河甘肃段近 58

年平均年降水量 499.84 mm,其年际变化情况见图 3。由图 3 可知,渭河甘肃段年降水量整体呈下降趋势,平均以 1.52 mm/a 的趋势减少。降水序列 Mann-Kendall 检验通过置信水平  $\alpha=0.05$  的显著性检验,Hurst 指数  $H=0.72$ ,证明降水量未来下降趋势依然较为显著。

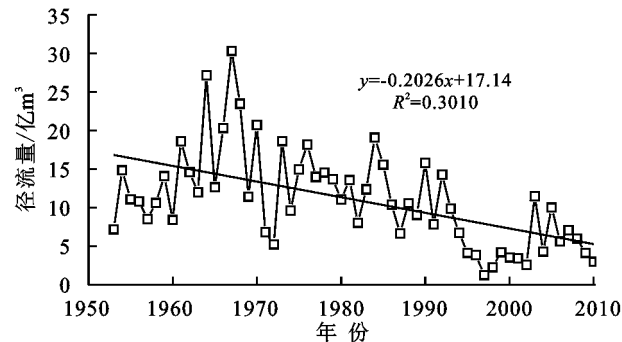


图 2 径流量年际趋势

2.1.3 渭河甘肃段气温变化特征 近 58 a 来,渭河流域甘肃段年平均气温为 7.88℃,其年际变化情况见图 4,由图 4 可知流域平均气温呈上升趋势,其  $H=0.76$ ,表明趋势性较强。年平均最低气温序列  $H=0.88$ ,趋势性十分强烈,年平均最高气温序列  $H=0.67$ ,趋势性较强,3 个特征值 Mann-Kendall 检验均通过置信水平  $\alpha=0.01$  的显著性检验,其中最低气温上升对于气温升高的贡献更大,未来气温整体依然会延续显著上升趋势,与全球变暖背景相对应。

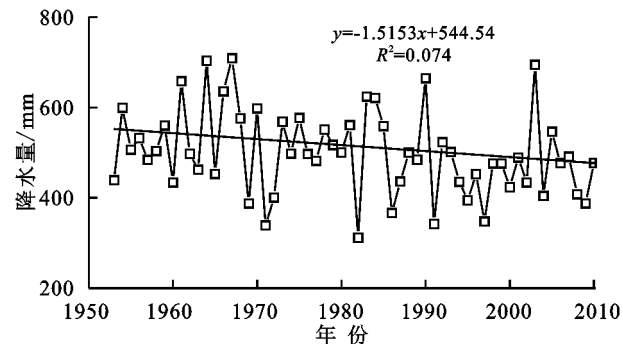


图 3 降水量年际趋势

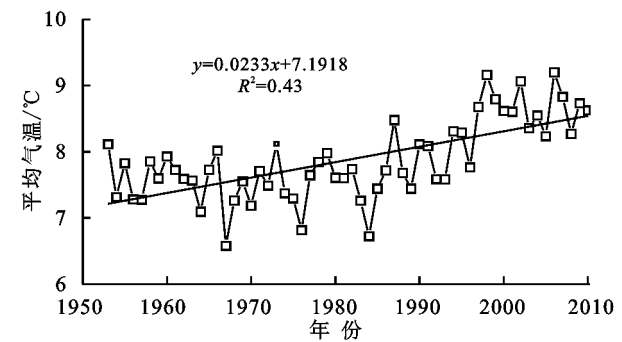


图 4 年平均气温年际趋势

2.1.4 渭河甘肃段水文气象要素趋势预测 通过 R/S 分析法对渭河甘肃段径流、降水及气温序列进行

了分析,发现计算其 Hurst 指数均大于 0.5,其中径流序列  $H=0.87$ ,降水序列  $H=0.72$ ,平均气温序列  $H=0.88$ ,3 个特征均表现为强正持续性,即未来的水文气象要素总体变化趋势与过去趋势相一致。结合 Mann-Kendall 趋势检验结果,认为未来一段时期内,渭河流域甘肃段整体沿着气温升高、径流减少的趋势发展。

2.2 渭河甘肃段水文气象要素变异特征

2.2.1 渭河甘肃段径流变异特征 绘制年径流累积距平曲线判断变异点见图 5。由图 5 可以看出,1986 年与 1991 年前后,累积距平值出现了趋势变化,由增加转为减少。

通过 Mann-Kendall 法对径流序列进行变异点的识别,取置信水平  $\alpha=0.05$ , $U(0.05/2)=1.96$ ,绘制 Mann-Kendall 检验曲线图,其结果见图 6。由图 6 可知,UF 与 UB 两条曲线在 1991 年前后相交,交点处于两条临界线之内,因此可以认为径流序列突变发生在 1991 年。

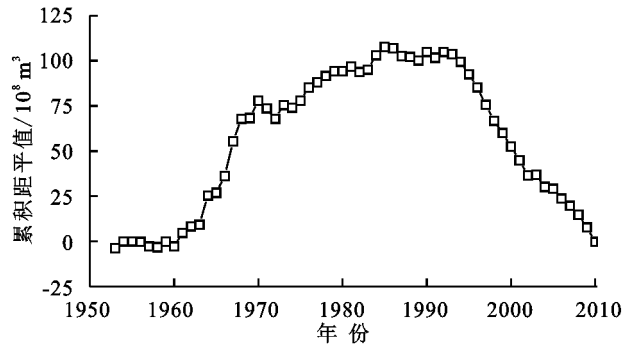


图 5 径流量累积距平

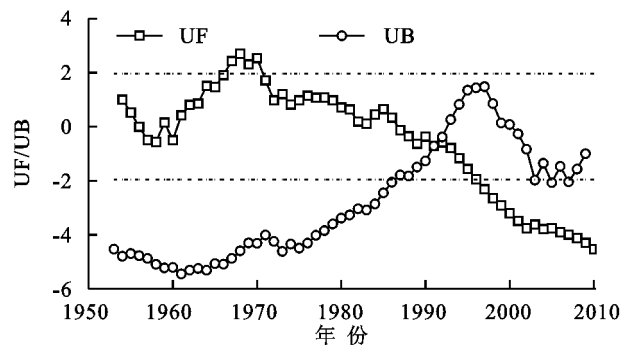


图 6 径流 Mann-Kendall 检验

2.2.2 渭河甘肃段降水变异特征 绘制降水累积距平曲线见图 7。由图 7 可知,渭河甘肃段降水量累积距平值在 1991 年前后发生趋势改变,认为 1991 年为降水序列突变年。

通过 Mann-Kendall 法对径流序列进行变异点的识别,取置信水平  $\alpha=0.05$ , $U(0.05/2)=1.96$ ,绘制降水序列 Mann-Kendall 检验曲线图,其结果见图 8。由图 8 可知,渭河甘肃段降水序列在置信区间内出现了多个交点,表明研究期内存在多个潜在变异点。



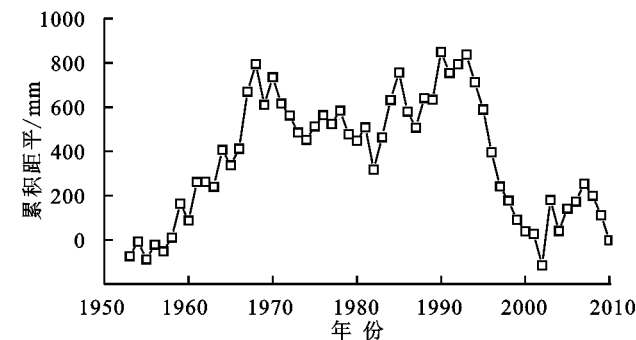


图 7 降水累积距平

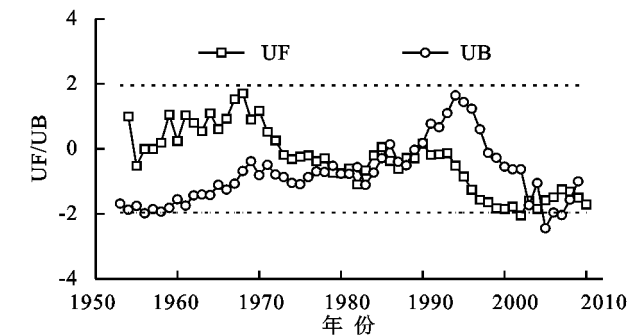


图 8 降水 Mann-Kendall 检验

2.2.3 渭河甘肃段径流变异年份 有研究表明,进入 20 世纪 90 年代后,渭河流域出现干旱,且持续时间较长<sup>[18]</sup>。综合径流与累积距平曲线、Mann-Kendall 检验曲线及实证分析,认为降水与径流均于 1991 年发生了突变。因此将 1953—1990 年认为是受人类活动影响较小的基准期,1991—2010 年为人类活动影响期。

### 2.3 渭河甘肃段径流周期性变化

通过 Matlab 的小波分析工具箱<sup>[19]</sup>,计算处理序列的小波系数实部和小波方差,制作小波系数实部值等值线图与时间尺度小波方差图,分别见图 9—10。小波系数实部值的正负代表年径流量丰枯,正值为丰水年,负值为枯水年,小波方差出现峰值的时间尺度即为径流变化的周期。小波方差的峰值越大,则代表该尺度的周期性越明显<sup>[20]</sup>。

分析小波系数实部等值线图,研究发现径流序列存在 18~23 a, 8~18 a, 3~4 a 等 3 个时间尺度的周期特征,小波方差图中存在 3 a, 14 a 以及 23 a 等 3 个明显的峰值,与小波系数实部等值线图相对应。其中 3 a 尺度的变化在六七十年代表现稳定,23 a 尺度的变化在 1975 年后表现稳定。14 a 尺度对应小波方差最大峰值,说明 14 a 尺度左右的周期性更强,径流序列周期变化主要受 14 a 尺度周期控制,整个 58 a 在 14 a 时间尺度上经历了约 3 个丰—枯转换周期。渭河径流序列在近 58 a 内存在明显的丰枯变化,上

述 3 个周期控制着径流序列在整个研究时间区间内的变化特征,周期性特征显著。

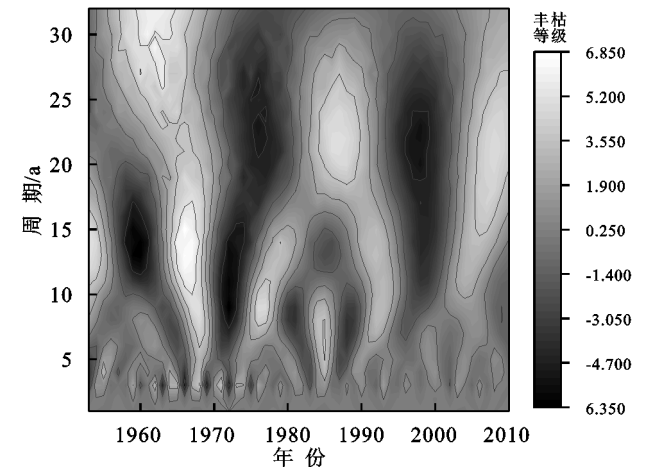


图 9 径流小波系数实部等值线

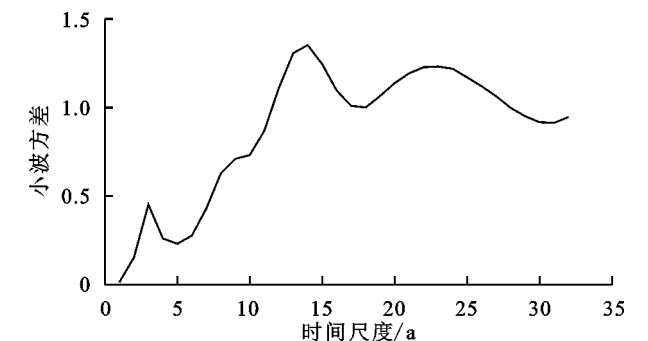


图 10 小波方差

### 2.4 渭河甘肃段径流变化影响因素定量分析

利用高桥蒸发模型<sup>[21]</sup>对地区蒸发量进行估算,发现渭河甘肃段年平均蒸发量为 363 mm/a,整体蒸发量呈现微弱下降态势,线性回归方程系数  $b = -0.3124$ ,蒸发量以每年 0.3 mm 的速度减少,相较于蒸发总量,可认为蒸发量变化不明显。降水量的减少直接导致径流量的减少,由于蒸发量相对变化不大,而径流资料变动比气象资料变动更剧烈,由此定性推测人类活动影响在其中发挥较大作用。

研究采用累积量斜率变化率法定量计算各种影响因素对径流变化的贡献率,该方法计算方便,已在黄河流域与黑河流域有较好应用<sup>[22]</sup>。

渭河流域甘肃段人类活动影响期较基准期相比,径流量下降 8.02 亿  $\text{m}^3$ ,下降率高达 57.99%。降水量影响期较基准期下降 61.97 mm,下降率为 11.89%。年平均气温上升 0.9℃,上升率为 11.89%(表 3)。

不同时期各影响要素累积线性拟合方程见表 4,对影响因素贡献率进行定量分析,发现气候变化贡献率为 37.57%(降水贡献 15.99%,气温贡献 21.58%),人类活动影响贡献率高达 62.43%。可以看出,在渭河甘肃段,人类活动的对径流减少的影响极为显著。

表 3 基准期与人类活动影响期多年平均值变化

序列	多年平均值	基准期	影响期	变化量
降水量/mm	514.80	537.15	472.30	64.85
径流/亿 m <sup>3</sup>	11.07	13.83	5.81	8.02
气温/℃	11.00	10.67	11.64	0.97

表 4 不同时期累积量线性拟合方程

参数	基准期	拟合度	人类活动影响期	拟合度
平均气温	$y=7.5235x+0.6493$	1	$y=8.5708x-2.5096$	0.9998
降水	$y=521.36x+61.933$	0.9995	$y=467.68x-157.67$	0.9988
径流	$y=14.669x-12.229$	0.9942	$y=5.2284x+10.709$	0.9765

3 讨论

3.1 气候变化对渭河甘肃段径流的影响

气候变化是改变径流的主要因素。一般来说,径流量与降水量成正相关,与气温呈负相关<sup>[23]</sup>。降水减少直接导致径流减少,气温变化与潜在蒸发量成正

相关关系<sup>[24]</sup>,气温升高,区域内的潜在蒸发量增加。夏军等<sup>[25]</sup>研究表明渭河流域自 1956—2000 年干旱程度逐渐加深,气温增高导致径流系数减小,且认为气候的暖干化将人类活动的不利影响进一步放大。研究表明,渭河甘肃段近 58 年来年降水量下降 78.3 mm,年平均气温上升 1.44℃,两个特征变化趋势均对径流减少有正向作用。

3.2 人类活动对渭河甘肃段径流的影响

人类活动对径流减少的影响主要体现在两个方面,直接方面如人类大规模取水、调水工程等,导致径流量的直接减少,间接方面在于人类活动例如城市地面硬化、水土保持工程等,改变了下垫面土地利用情况,影响到流域产汇流进而改变径流量<sup>[26]</sup>。

本文选取基准期(1980 年)与影响期(2010 年)的土地利用现状遥感监测数据,制作土地利用变化转移矩阵分析基准期与影响期的土地利用变化情况,以分析人类活动对于径流变化的影响(表 5)。

表 5 渭河甘肃段 1980—2010 年土地利用变化转移矩阵 km<sup>2</sup>

土地利用类型		2010 年					
		耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用土地
1980 年	耕地	12790.95	144.03	631.27	10.16	145.78	2.61
	林地	16.02	3309.01	48.38	0.82	3.03	0.13
	草地	511.07	110.79	11550.54	3.42	17.39	2.08
	水域	43.74	1.21	7.18	147.16	4.11	0.44
	建设用地	16.49	0.86	2.86	0.14	571.39	0.04
	未利用土地	9.57	0.01	5.42	0.47	0.21	68.40
	总计	13387.85	3565.91	12245.65	162.17	741.92	73.70
							30177.21

从土地利用转移矩阵中可以看出,从 1980—2010 年,渭河甘肃段建设土地面积显著增加,增加幅度为 25.37%,建设土地增加对应人类聚居区的扩大、人口增长与用水需求上升,有研究发现城市化背景下土地利用类型的变化是导致径流变化的主要因素<sup>[10]</sup>。耕地总面积虽然减少,但是由于近年来渭河沿线诸如武山县等大力发展蔬菜种植产业,加大了农业取水量,也在一定程度上导致渭河径流量的减少。区域内林草总面积增加,植被通过增加降雨入渗、拦蓄径流影响地表径流<sup>[27]</sup>,导致地表径流减少。此外,多年来渭河流域修建了众多淤地坝,新修淤地坝具备拦蓄功能,淤地坝淤满后则具备减洪作用<sup>[28]</sup>,综合来看,黄土高原地区水土保持措施对径流量的减少有促进作用<sup>[29]</sup>。

4 结论

(1) 渭河甘肃段水文气象要素特征分析表明,地

区年径流呈现极显著下降趋势,年降水呈现不显著下降趋势,年均气温呈现显著上升趋势。年径流序列存在明显突变,突变年份为 1991 年。气温、降水和径流变化均表现为正持续性,未来一段时间内渭河流域甘肃段整体会沿着气温增加、径流减少的趋势发展。

(2) 渭河甘肃段径流周期性分析表明,年径流变化呈现明显的周期性,存在 3 a,14 a,23 a 共 3 个时间尺度的周期特征,其中 14 a 的时间尺度为第一主周期,径流在过去 58 a 经历了约 3 个丰—枯转换期。

(3) 渭河甘肃段径流驱动因素分析表明,人类活动影响期较基准期,多年平均径流量减少 8.02 亿 m<sup>3</sup>,下降 57.99%。其中气候变化对径流减少的贡献率为 37.57%(降水贡献 15.99%,气温贡献 21.58%),人类活动影响占比 62.43%。

参考文献:

[1] 徐宗学,刘晓婉,刘浏.气候变化影响下的流域水循环:

- 回顾与展望[J].北京师范大学学报:自然科学版,2016,52(6):722-730,839.
- [2] 田晶,郭生练,刘德地,等.气候与土地利用变化对汉江流域径流的影响[J].地理学报,2020,75(11):2307-2318.
- [3] 张建云,王国庆,贺瑞敏,等.黄河中游水文变化趋势及其对气候变化的响应[J].水科学进展,2009,20(2):153-158.
- [4] 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.
- [5] 郭爱军,畅建霞,黄强,等.渭河流域气候变化与人类活动对径流影响的定量分析[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2014,42(8):212-220.
- [6] 岳永杰,乌云珠拉,李旭,等.根河流域 1980—2017 年气候和径流的变化特征分析[J].灌溉排水学报,2020,39(4):96-105.
- [7] 龚珩夫,李占斌,任宗萍.延河流域径流过程对气候变化及人类活动的响应[J].中国水土保持科学,2016,14(5):57-65.
- [8] Li Z, Huang S, Liu D, et al. Assessing the effects of climate change and human activities on runoff variations from a seasonal perspective[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2020,34(3):575-592.
- [9] Mwangi H M, Julich S, Patil S D, et al. Relative contribution of land use change and climate variability on discharge of upper Mara River, Kenya[J]. Journal of Hydrology Regional Studies, 2016,5(1):244-260.
- [10] Yan X, Bao Z, Zhang J, et al. Quantifying contributions of climate change and local human activities to runoff decline in the upper reaches of the Luanhe River basin[J]. Journal of Hydro-environment Research, 2020, 28: 67-74.
- [11] 王小杰,姜仁贵,解建仓,等.基于分形和 R/S 分析的渭河干流径流变化特征研究[J].水利水运工程学报,2019,000(1):102-108.
- [12] 武瑾,金文龙,陈亢利.基于季节性 Kendall 检验和重标极差分析法的阳澄湖水质变化趋势分析[J].环境污染与防治,2020,42(7):894-900.
- [13] 魏凤英.现代气候统计诊断与预测技术 [M].2 版.北京:气象出版社,2007.
- [14] 詹道江.工程水文学[M].北京:中国水利水电出版社,2010.
- [15] 陈素景,李丽娟,李九一,等.近 55 年来澜沧江流域降水时空变化特征分析[J].地球信息科学学报,2017,19(3):365-373.
- [16] 顾朝军,穆兴民,高鹏,等.1961—2014 年黄土高原地区降水和气温时间变化特征研究[J].干旱区资源与环境,2017,31(3):136-143.
- [17] 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.
- [18] 孙洋洋.渭河流域气象与水文干旱时空演变特征[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2018.
- [19] 胡一帆,刘颖,李杨,等.尼日尔河水文气象要素演变特征及趋势[J].华北水利水电大学学报:自然科学版,2021,42(3):49-56.
- [20] 赵秀兰,周蕊,张富,等.1957—2016 年祖厉河上游降水与水沙变化趋势[J].水土保持研究,2020,27(3):83-90.
- [21] 陈燕飞,张翔.汉江流域降水、蒸发及径流长期变化趋势及持续性分析[J].水电能源科学,2012,30(6):6-8,215.
- [22] 郭爱军,畅建霞,王义民,等.近 50 年泾河流域降雨—径流关系变化及驱动因素定量分析[J].农业工程学报,2015,31(14):165-171.
- [23] Mahmudi P, Motamedvaziri B, Hosseini M, et al. Study of climate change effects on hydrological processes in Siminehroud and Zarrinehroud watersheds northwest of Iran[J]. Earth Science Informatics, 2021,14(2):965-974.
- [24] 王升,王全九.近 50 年黄土地区气候与潜在蒸散量变化及其影响因素分析[J].干旱地区农业研究,2012,30(1):270-278.
- [25] 刘春蓁,占车生,夏军,等.关于气候变化与人类活动对径流影响研究的评述[J].水利学报,2014,45(4):379-385,393.
- [26] 代稳,吕殿青,李景保,等.气候变化和人类活动对长江中游径流量变化影响分析[J].冰川冻土,2016,38(2):488-497.
- [27] 靳峰,张富,胡彦婷,等.半干旱区降水—土地利用变化与水沙响应关系[J].水土保持研究,2020,27(3):63-69.
- [28] 刘蕾,李庆云,刘雪梅,等.黄河上游西柳沟流域淤地坝系对径流影响的模拟分析[J].应用基础与工程科学学报,2020,28(3):562-573.
- [29] 王明玉,王百田.不同水土保持措施对黄土高原小流域年径流和产沙的影响:以平凉纸坊沟为例[J].林业科学,2016,52(8):10-20.