

祖厉河河源区径流、泥沙对气候的响应研究

吕明侠^{1,2}, 王一博¹, 吴川东¹, 白炜³

(1. 兰州大学 资源环境学院, 甘肃 兰州 730030; 2. 甘肃省定西市水文水资源勘测局, 甘肃 定西 743000;

3. 兰州交通大学 环境与市政工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 针对黄河上游一级支流祖厉河的河源区河川径流及泥沙变化对气候的响应过程进行分析研究, 运用水文统计学方法对 30 多年实际观测资料进行分析, 结果表明: 祖厉河上游源区的径流、泥沙对研究区的气候变化敏感。自 20 世纪 80 年代以来气温显著升高, 蒸发量呈显著增加趋势, 且两者变化速率高于黄河上游及全球变化速率, 分别为 $0.75^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 和 $34.8\text{ mm}/10\text{a}$ 。同时降水呈现减少趋势, 河道径流和泥沙受气候变化影响显著减少, 自 2000 年以来, 祖厉河上游基本断流, 1997 年发生径流突变以及降水-径流、径流-泥沙关系的变化。而人类保护生态环境所采取的工程措施有效减少了土壤侵蚀, 泥沙的突变时间有所延迟。

关键词: 径流; 泥沙; 气候; 祖厉河上游

中图分类号: TV121⁺.4; TV145⁺.3

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2020)02-0087-08

Study on the response of runoff and sediment to climate change in the Zuli River source area

LÜ Mingxia^{1,2}, WANG Yibo¹, WU Chuandong¹, BAI Wei³

(1. College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730030, China;

2. Dingxi Hydrology and Water Resources Survey Bureau of Gansu Province, Dingxi 743000, China;

3. School of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: This study analyzed the response process of the river runoff and sediment to climate change in the source region of Zuli River, a first level tributary of the upper reaches of the Yellow River, using the hydrological and statistical methods based on the actual observational data for more than 30 years. The results showed that the runoff and sediment of this area were sensitive to the changes of the climate. Since the 1980s, the temperature and evaporation increased significantly by the rates of $0.75^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ and $34.8\text{ mm}/10\text{a}$, respectively, and the change rates were higher than those of the upper reaches of the Yellow River and the global rivers. In addition, the precipitation showed a decreasing trend, and accordingly the runoff and sediment decreased significantly. Since 2000, the upper reaches of the Zuli River had completely dried up. Moreover, an abrupt change of runoff occurred and the relationship between precipitation and runoff, runoff and sediment changed in 1977. It indicates that the engineering measures for the protection of environment and ecology have effectively alleviated the soil erosion and delayed the occurrence of sediment abrupt changes.

Key words: runoff; sediment; climate; upper reaches of Zuli River

1 研究背景

干旱半干旱地区属于气候和生态系统脆弱地区^[1], 同时该地区流域生态水文过程受气候和人类

活动的影响加剧^[2]。随着全球气候变化的加剧和区域扩展, 干旱半干旱地区的气温显现出明显的升高^[3-5], 尤其在黄土高原西部的半干旱区表现更为突出。冉津江^[6]的研究表明, 自 1960 年以来干旱半

收稿日期: 2019-07-24; 修回日期: 2019-12-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(41877149/41563005)

作者简介: 吕明侠(1989-), 女, 甘肃渭源人, 在读硕士研究生, 研究方向为水文水资源。

通讯作者: 王一博(1970-), 男, 甘肃会宁人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事寒区旱区水文水资源的研究。

干旱区的气温升高速率为 $(0.35 \pm 0.094)^\circ\text{C}/10\text{a}$, 并且呈现出时空差异明显的特点。毛翠翠等^[7]指出, 在 20 世纪 70 年代后期气温上升更为明显, 尤其在冬季^[8-11], 上升变化率达 $0.44^\circ\text{C}/10\text{a}$ ^[12]。在全球气候变化影响下, 近地表温度及水汽交换频率发生变化, 改变了空气湿度, 间接影响了降水及地表的产汇流等水文过程的时空变化, 从而影响水文循环强度^[13], 水文循环过程的变化对区域气候的改变有一定的促进作用, 使得气候变化与水文过程的相互作用密不可分^[14]。黄河上游主要属于干旱半干旱地区, 气候变化比较强烈, 水文过程在一定程度上受其影响发生变化^[15]。近几十年来, 黄河流域的流域水文过程已经发生了变化^[16-17], 黄河上游的来水主要是一级支流汇集, 但各支流所处地理位置、区域气候要素及下垫面条件有所不同, 导致各一级支流水文过程的变化也不尽相同^[18-23]。

水文循环过程对气候变化非常敏感^[24-25]。在全球气候变化背景下祖厉河流域的降水、径流及河道输沙等过程出现了明显的变化。近年来有学者对祖厉河流域水文过程的影响因素及变化特征已经开展了初步研究^[26-28], 这些研究基本都是利用统计分析方法对水文过程单方面要素进行研究。针对气候变化与下垫面条件改变对祖厉河河源区小流域水文过程变化影响的研究较少。在全球气候变化背景下对祖厉河流域水文过程变化与气候要素变化之间的相互关系研究非常有意义, 开展祖厉河流域源区的气候变化和水文效应研究, 能够揭示在河源区小流域范围内气候因素变化对水文过程影响的机理, 对认识干旱半干旱区典型流域水文过程及水资源分布对气候变化的响应有一定的科学价值和指导作用, 为开展流域水文过程变化研究提供资料和方法。

2 资料来源与研究方法

2.1 研究区概况

祖厉河流域源起通渭县华家岭, 于白银靖远终入黄河。流域内气候干旱, 年均气温 $6.4 \sim 8.8^\circ\text{C}$, 降水贫乏、蒸发强烈, 平均每年降水仅约 300 mm, 而蒸发量每年约 1 559.3 ~ 1 660.6 mm。

选取祖厉河上游会宁站以上祖厉河上游的河源区为研究区, 南源厉河和东源祖河两条河流于会宁县城西汇合, 区域面积为 990 km^2 , 厉河和祖河河长分别为 36、33 km, 河流补给来源主要为降水。多年平均气温 7.8°C , 多年平均降水 399.6 mm, 主要农业生产过程为雨养农业, 灌溉少, 近几年研究区开展

了坡地整治工程, 修建了大量的梯田。

2.2 资料来源

本文研究资料主要有 1980 - 2016 年祖厉河上游中川、党家岷、太平店、会宁雨量站及会宁水文站的水面蒸发、径流、输沙的实际水文观测资料, 以及 1990 - 2016 年会宁气象站气温资料。

2.3 研究方法

本文采用传统的水文统计学方法对气候变化下的水文要素及其相关关系进行分析, 同时对其变化过程进行 M - K 检验^[29]。

(1) M - K 趋势检验

$$S = \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^{i-1} \text{sign}(X_i - X_j) \quad (1)$$

(2) M - K 非参数检验统计量 Z

$$Z = \begin{cases} (S - 1) / \sqrt{n(n-1)(2n+5)/18} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ (S + 1) / \sqrt{n(n-1)(2n+5)/18} & S < 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: S 为正态分布, 其均值为 0, 方差为 $n(n-1)(2n+5)/18$; $\text{sign}()$ 为符号函数, X_i, X_j 为以 i, j 为序列号独立同分布的随机样本, 样本总量 n ; Z 为 M - K 非参数检验统计量, 在给定的双边趋势检验置信水平 α , 有 $|Z| \geq Z_{1-\alpha/2}$, 则通过了 $1 - \alpha/2$ 的显著性检验。

(3) 非参数 M - K 突变检验

$$S_k = \sum_{i=1}^k r_i \quad (3)$$

$$r_i = \begin{cases} 1 & \text{当 } x_i > x_j, \\ 0 & \text{当 } x_i \leq x_j \end{cases} \quad (4)$$

$$(j = 1, 2, \dots, i; k = 1, 2, \dots, n)$$

$$E(S_k) = \frac{k(k-1)}{4} \quad (5)$$

$$\text{Var}(S_k) = \frac{k(k-1)(2k+5)}{72} \quad (6)$$

$$(1 \leq k \leq n)$$

$$UF_k = \frac{[S_k - E(S_k)]}{\sqrt{\text{Var}(S_k)}} \quad (k = 1, 2, \dots, n) \quad (7)$$

式中: S_k 为第 i 个样本 $x_i > x_j (1 \leq j \leq i)$ 的累积数; $E(S_k)$ 为均值, $\text{Var}(S_k)$ 为方差; UF_k 为 S_k 的标准化统计量, 若 $|UF_k| \geq U_\alpha$, 则表明数据序列的变化趋势显著; UB_k 为逆序统计量, 曲线的交点为突变点。

3 结果与分析

根据研究区范围内 1990 - 2016 年的实测气温

资料和 1980 - 2016 年的实测蒸发、降水、径流及输沙量资料进行多年平均值计算并进行 M - K 突变检验分析。

3.1 气温变化

1990 - 2016 年研究区年均气温变化过程及 M - K 突变检验分析结果见图 1 和表 1。

对图 1 及表 1 中研究区气温及其变化过程进行分析可知,研究区内 1990 - 2016 年多年平均气温为 7.8℃,年平均最高气温出现在 2016 年为 9.3℃,在 1992 年气温年平均最低 6.5℃,最高最低气温相差 2.8℃的幅度变化,气温 Z 值为 2.681(表 1),显著性检验程度极强,表明气温以显著的趋势增加;1990

年以来祖厉河上游河源区的气候变暖加快,气温变化率达 0.75℃/10a(图 1(a)),大于 1970 - 2010 祖厉河流域上升速率 0.57℃/10a^[25],表明研究区从 20 世纪 90 年代以来升温尤其明显;UF 值在 1992 和 1993 年为负数,其他年份均为正(图 1(b)),1998 年后通过了 95% 的显著性检验,说明气温在 1992 - 1993 年降低,而 1990 - 1991,1994 - 2016 年表现为暖化上升,以 1997 年为界,暖化过程明显,1997 年为祖厉河上游河源区气温突变年。

3.2 蒸发量与降水量变化

1980 - 2016 年研究区年均蒸发量和降水量变化过程及其 M - K 突变检验结果分别见图 2、3 和表 1。

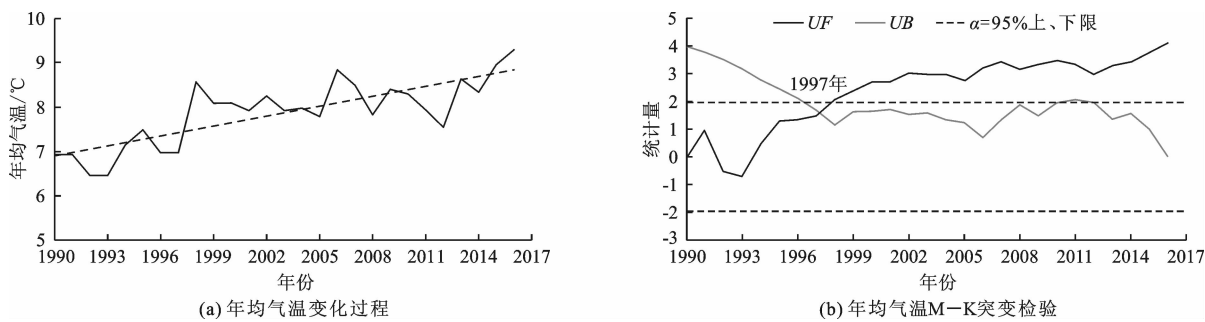


图 1 1990 - 2016 年研究区年均气温变化过程及 M - K 突变检验

表 1 水文要素变化 Mann - Kendall 检验表

项目	气温/℃	蒸发/mm	降水/mm	径流/10 ⁸ m ³	输沙量/10 ⁴ t
1980 - 2016 年平均值	7.8	1453.3	399.6	0.0801	233.9
Z 值	2.681 ***	1.295 *	-0.43	-4.66 ***	-4.54 ***

注:(1)气温为 1990 - 2016 年平均值;(2) *、* *、* * * 表示其显著性检验结果分别为较强、强、极强。

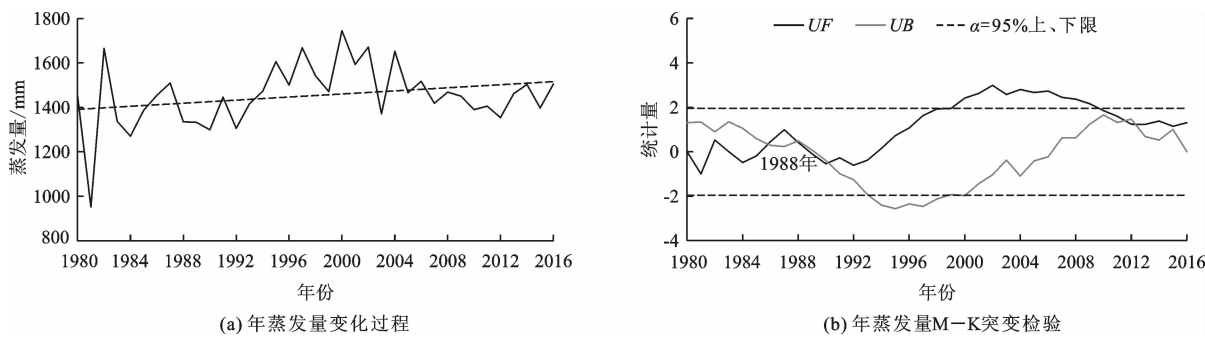


图 2 1980 - 2016 年研究区年均蒸发量变化过程及 M - K 突变检验

分析图 2 及表 1 可知,研究区蒸发能力强,多年平均值为 1 453.3 mm,年最大、最小蒸发量分别为 1 744.3 mm(2000 年)和 951.6 mm(1981 年),变化幅度达到 972.7 mm, Z 值为 1.295(表 1),通过了 90% 的显著性检验,未通过 95% 的显著性检验,说明蒸发量增加趋势显著性较强,增加速率为 34.8

mm/10a(图 2(a));1980 - 1994 年 UF 值呈正负波动变化,但均未通过 95% 显著性检验(图 2(b)),1995 年后,UF 值稳定为正,其中 1999 - 2009 年通过了 95% 的显著性检验,说明 1980 - 1994 年蒸发量变化趋势不稳定,1995 年后蒸发量呈稳定增加趋势,其中 1999 - 2009 年间蒸发量显著增加。根据 M

-K 检验图,经分析,研究区的蒸发量发生突变时间较气候变化早,在 1988 年附近。蒸发是大气圈和岩石圈连接的纽带,还受其他因素的影响。

由图 3 及表 1 分析结果表明,位于西北半干旱地区的祖厉河河源区,降水量少,近 40 年来,降水量年均值为 399.6 mm,年最大、最小值分别为 583、229.1 mm,出现时间分别为 2003、1982 年,年最大、最小降水量相差 353.9 mm,年际变幅大, C_v 值为 0.17, Z 值为 -0.43(表 1),显著性检验程度不明显,其减少变化不显著;流域内 1980-2016 年降水量减小速率为 1.3 mm/10a(图 3(a)),波动明显,1980-2016 年间降水高峰值频繁发生,1984 年 530.9 mm,1990 年 518.0 mm,2003 年 583.0 mm,2013 年 490.6 mm,波动低峰值出现频率较低。研究区内 1980-1994 年降水量 UF 值大于 0(1982 年小于 0),1995-2016 年 UF 值小

于 0(2007、2008、2014 年大于 0),并且均未通过 99% 的显著性检验(图 3(b)),说明 1980-1994 年降水总体呈增加趋势(1982 年略有减少),1995-2016 年呈减少趋势(2007、2008、2014 年略有增加),但变化趋势不显著。根据 UF 曲线与 UB 曲线交点出现年份,在 1994、2003、2008、2011 年均存在突变。因为 1995 年前后降水均呈稳定不显著的增加减少趋势,只有个别年份不一致变化导致 2003、2008、2011 年突变点的出现,改变研究时段进行 M-K 突变检验杂点剔除,得出祖厉河上游河源区突变时间为 1994 年,与祖厉河全流域降水突变时间 1995 年^[23]基本一致。

3.3 径流量与输沙量变化

1980-2016 年会宁站年径流量和输沙量的变化过程及其 M-K 突变检验分析结果分别见图 4、5 和表 1。

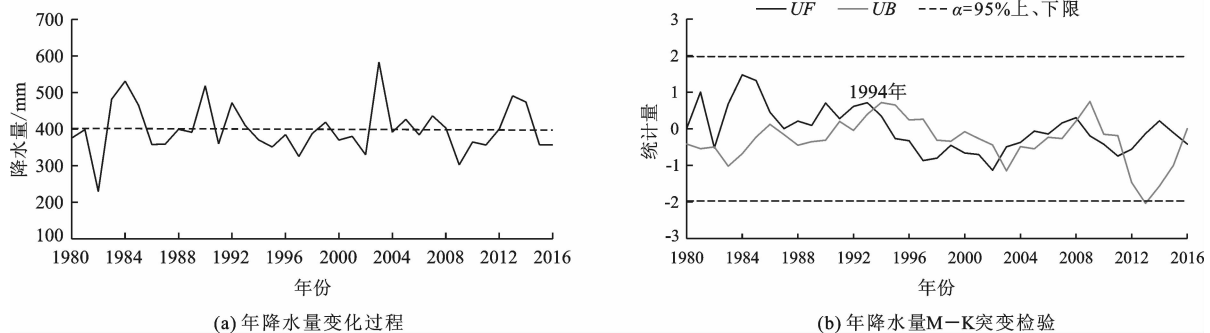


图 3 1980-2016 年研究区年降水量变化过程及 M-K 突变检验

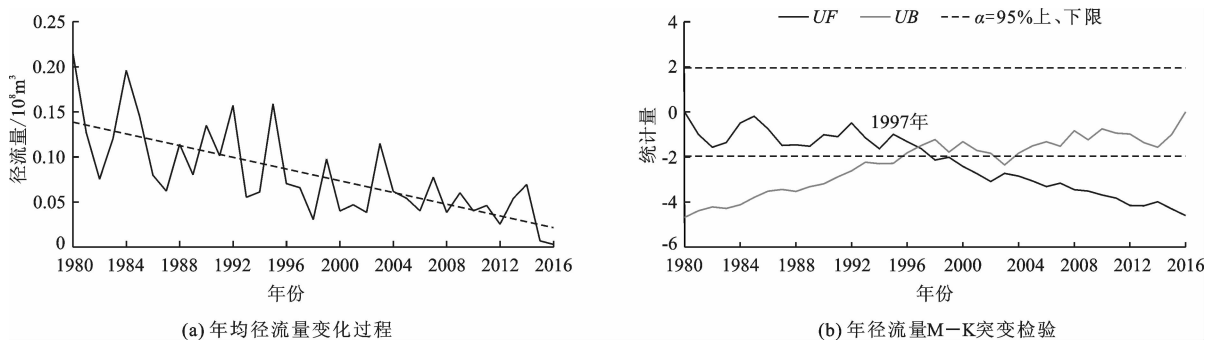


图 4 1980-2016 年会宁站年径流量变化过程及 M-K 突变检验

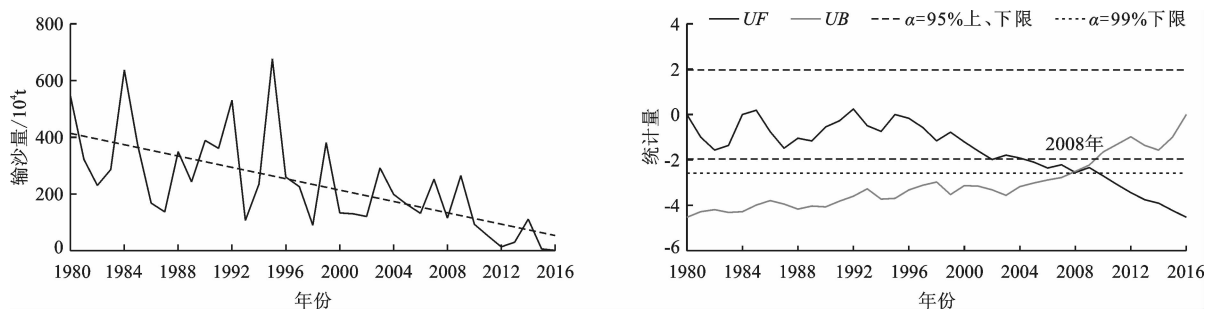


图 5 1980-2016 年会宁站年输沙量变化过程及 M-K 突变检验

图4及表1的分析结果显示,祖厉河上游区径流较小,1990年以来河道时常断流。多年平均径流量仅 $800 \times 10^4 \text{ m}^3$,最大、最小分别为 $2150 \times 10^4 \text{ m}^3$ 和 $30 \times 10^4 \text{ m}^3$,分别出现于1980、2016年,河道径流量幅度明显减小,1996年以前,祖厉河河源区河道径流量年际变化幅度较大,变化周期相对较长,1996年以后河道径流量年际变幅明显减小(图4(a))。近40年径流量变化的 C_v 值为0.62,反映年际变幅大, Z 值为-4.66(表1),说明河源区河道径流量减少趋势极显著;1980-2016年径流量 UF 值小于0,且1996年后为强显著性变化(图4(b)),说明河道来水量减少,速率为 $3.2 \times 10^4 \text{ m}^3/10\text{a}$,且这种趋势主要发生于1997-2016年,1997年开始发生突变,比祖厉河全流域径流突变时间1995年^[23]延迟。

图5及表1的分析结果表明,研究区水土流失比较严重,河流含沙量大。多年平均值达 $233.9 \times 10^4 \text{ t}$,年最大、最小值分别为 $676 \times 10^4 \text{ t}$ (1995年)和 $1.3 \times 10^4 \text{ t}$ (2016年),年际之间输沙量变幅大, C_v 值为0.72, Z 值为-4.54(表1),通过了99%的显著性检验,说明祖厉河上游河源区输沙逐年减少趋势显著;除1985和1992年 UF 值大于0,1980-2016年其余年份 UF 值均小于0,减少趋势在2005年之前不明显,之后逐渐显著,到2010年后极为显著,说明1985年和1992年输沙量略有增加;1980-2016年以 $100 \times 10^4 \text{ t}/10\text{a}$ 的速率减少的变化过程,1980-2004年这种变化的趋势不明显,2005-2016年变化趋势显著,2010年开始变化极为显著,在2008年发生突变,较径流突变时间有所推迟,表明泥沙变化不仅仅由径流的变化引起,还与其他因素有关。主要是因为多年来在祖厉河河源区开展了淤地坝建设和退耕还林为目的植树造林等水土防护治理工程,流域下垫面条件逐步发生变化,有效减小了坡面侵蚀,对区域水土流失的防治成效显著,地表径流含沙量逐年降低,使得泥沙突变年份延迟。

4 讨论

4.1 气温、降水及蒸发变化分析

从研究结果分析,祖厉河上游河源区气温自20世纪80年代以来升温明显,升温的速率为 $0.75^\circ\text{C}/10\text{a}$,高于黄河上游流域气温 $0.6^\circ\text{C}/10\text{a}$ 的变化速率,1997年发生突变,与整个黄河上游区发生突变的时间基本一致^[30],说明祖厉河源区的气温变化总的趋势与整个黄河上游流域的变化一致。但

研究区属于典型黄土沟壑丘陵区,气候变化在总体上升的同时有局部的波动^[31-32],这种波动是研究区地理和地貌及植被生态等要素共同作用的结果^[33-34]。这样的波动性变化对区域水文要素有明显的影响。研究区下垫面土壤为沙壤土,植被主要为雨养农业,生态活动单一,系统脆弱,对气温变化的敏感性较为强烈,具有典型的区域代表性。该区域的水文要素受气候要素的胁迫作用非常强烈,降水和蒸发是干旱区关键的水文要素,通过对研究区近40年的蒸发资料研究表明,蒸发量变化过程在1995年前变化不稳定,1995年后趋于稳定,在1988年附近发生突变,与气温变化不一致,说明区域内蒸发不仅与气温有关,同时还受饱和水汽压、风速、周围植被生态及人类活动等其他因素影响^[35];研究区的降水在研究时段出现了波动增加和减少的过程,1994年发生突变与祖厉河全流域变化过程^[23]略有差异,但发生突变时间一致,且比1993年黄河上游降水突变有所滞后^[36],研究区位于祖厉河源区,受华家岭局部小气候条件的影响,降水变化具有区域差异性^[37],减少趋势有所推迟,祖厉河流域的暖干化过程受其影响也有所延迟。气象要素变化趋势及突变与祖厉河流域、黄河上游变化一致,但降水略有滞后,表明研究区小流域气候变化是祖厉河以及黄河上游气候变化的一部分,小尺度上很好地反映了气候变化的总体趋势,但受局部小流域气候的影响小流域水文循环过程发生异质性改变,水文要素变化表现出地区差异性。

干旱区下垫面结构单一,区域生态系统脆弱,生态水文过程对全球气候变化极其敏感,全球气温上升,引起区域水量平衡发生改变,导致以研究区为代表的河源区水文循环过程发生变化,水资源量及时空分布严重失衡,已有大量研究表明未来气温将继续升高^[38-39],而降水减少的区域降水仍然继续减少^[40-41],干旱继续突显,这将会严重影响当地水资源量的分配格局,可能引起当地生产过程和生态环境的改变。

在全球气候变化过程中,应对干旱区水资源供需矛盾的工程措施只能延缓气候变化和进行微弱的时空调整,并不能逆转水资源短缺的现实。而小流域气候和生态环境变化又影响降水、蒸发等水文过程^[42],由于气候变化导致的降雨量不断减少和蒸发逐渐增加的现象将会加速该流域的水文循环过程的变化,影响流域水循环和生态系统安全。河源区小流域的气候变化随着区域扩展构成了流域、全球范

围的气候变化,加强小流域气候变化对水文循环的影响研究在很大程度上能有效预测未来短期、长时间尺度及空间尺度上流域、全球的气候变化趋势^[43],为人类寻求有效防护措施提供依据。

4.2 降水、径流、输沙相关性及其关系变化分析

根据研究区内 1980–2016 年降水、径流和输沙量分析研究区的降水量与河道径流量之间以及河道径流量与输沙量之间的变化关系,结果如图 6 所示。图 6 表明,降水量、径流量及输沙量之间的变化有明显的相关性。

河道泥沙含量变化与下垫面及人类活动有关^[44],同时也与水文要素有关^[45]。由图 6 结果分析,祖厉河上游河源区为黄土沟壑区,且植被盖度较低,当地的主要生产为传统的雨养农业,暴雨型降雨导致土壤侵蚀严重,是祖厉河泥沙的主要形成区;径流量–输沙量的线性相关性(图 6(c))高于降水量–径流量(图 6(a)),两者皮尔逊相关系数 r 分别为 0.93 和 0.41,说明研究区泥沙的决定因素为径流量,其他因素的作用非常微弱,而径流量除受降水的

主要影响外,降水的时空分布及下垫面的不同特征也发挥着重要作用^[46]。生态系统脆弱的西北半干旱区的区域水文过程受气候变暖和人类活动的影响强烈,一方面,由于气候变化引起的降水及其时空差异使河道径流相对区域降水的突变时间滞后^[47],由此,在祖厉河上游源区出现了 1994 年降水的突变引起了 1997 年径流发生突变^[48],这就导致了双累积曲线(图 6(b)、6(d))图中降水量–径流量、径流量–输沙量关系于 1997 年发生一致变化,即气候变化是引起降水、径流、泥沙及其相关关系变化的根本原因;另一方面,下垫面植被的种类及分布的区域差异在很大程度上影响了径流与泥沙变化的不同步^[49],随着 20 世纪 80 年代以来大量退耕还林(草)、“121”雨水截留等水土保持工程的实施,有效改善了当地的生态环境,产汇流过程受其影响而有所改变,水力侵蚀减弱,河道泥沙流失减少,使得泥沙在 2008 年发生突变,气候和地表生态的水文效应明显^[2],说明人类活动改变了区域内下垫面条件,造成了 2008 年泥沙及径流–泥沙关系的变化。

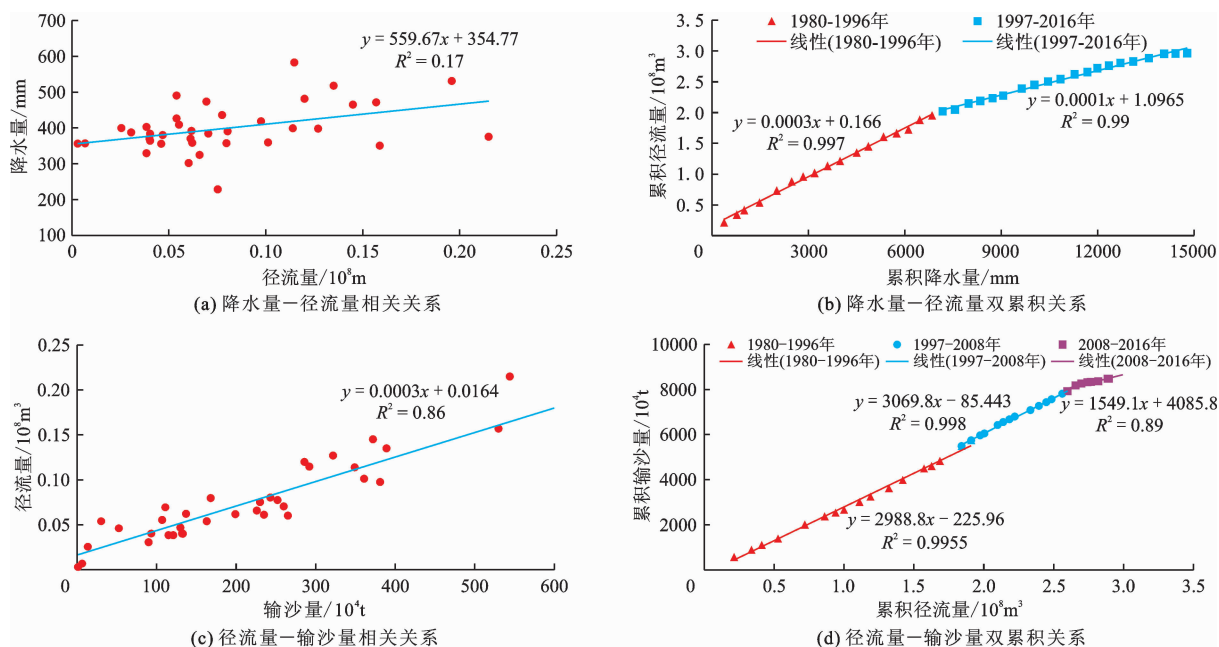


图 6 1980–2016 年研究区内降水–径流、径流–泥沙相关关系及双累积曲线图

5 结论

祖厉河上游河源区流域水文过程受气候变化响应强烈,对降水、蒸发、径流、泥沙等关键水文要素都产生了影响。通过对关键水文过程对气候的响应进行分析,可以得出以下结论:

(1) 祖厉河上游自 20 世纪 80 年代以来区域性

气候变暖明显,气温显著升高,1990–2016 年上升速率为 $0.75^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,1997 年发生突变。自 1995 年以来,祖厉河上游河源区的降水量逐渐减少,1980–2016 年变化率为 $1.3\text{ mm}/10\text{a}$,并且在 1994 年出现了突变,同时蒸发则持续增加,变化率为 $34.8\text{ mm}/10\text{a}$,祖厉河上游河源区的河道径流量逐渐减少,自 2000 年开始出现了持续干涸现象。

(2)1980-2016年,研究区的河道径流量和输沙量在气候变化影响下显著减少,变化率分别为 $3.2 \times 10^4 \text{ m}^3/10\text{a}$ 、 $100 \times 10^4 \text{ t}/10\text{a}$ 。1997年径流的突变和降水量-径流量、径流量-输沙量关系的变化是对气候变化响应的结果,而人类保护自然环境采取工程措施,通过改善祖厉河源区小流域下垫面条件,降低了区域土壤侵蚀,引起2008年泥沙减少的突变和径流量-输沙量关系发生关变化。

参考文献:

- [1] 韩兰英,张强,杨阳,等. 气候变化背景下甘肃省主要气象灾害综合损失特征[J]. 干旱区资源与环境,2019,33(7):107-114.
- [2] 闫瑞. 黄土高原北洛河上游流域退耕还林草的水文响应模拟[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2017.
- [3] 张秀云,姚玉璧,杨金虎,等. 中国西北气候变暖及其对农业的影响对策[J]. 生态环境学报,2017,26(9):1514-1520.
- [4] 周忠文,刘英,田蕴雅,等. 环县55年气温降水变化趋势及对于干旱影响分析[J]. 中国农学通报,2014,30(17):215-221.
- [5] 王朋,张蓓蓓. 安康气象站1953-2016年气温变化特征研究[J]. 水资源与水工程学报,2018,29(6):94-99.
- [6] 冉津江. 我国干旱半干旱区温度和降水的时空分布特征[D]. 兰州:兰州大学,2014.
- [7] 毛翠翠,平建华,左其亭. 中国中部典型半湿润半干旱区近40年来气候变化特征[J]. 水资源与水工程学报,2012,23(3):34-40.
- [8] 陈亚宁,李稚,范煜婷,等. 西北干旱区气候变化对水文水资源影响研究进展[J]. 地理学报,2014,69(9):1295-1304.
- [9] 李奇虎. 西北干旱区气候变化及其对水文过程的影响[D]. 上海:华东师范大学,2012.
- [10] 姚玉璧,王润元,杨金虎,等. 黄土高原半干旱区气候变化对春小麦生长发育的影响——以甘肃定西为例[J]. 生态学报,2011,31(15):4225-4234.
- [11] 王锦凌. 基于MODIS/NDVI数据的祖厉河流域植被覆盖动态变化及其对气候因子的响应[D]. 兰州:甘肃农业大学,2018.
- [12] 王玉洁,秦大河. 气候变化及人类活动对西北干旱区水资源影响研究综述[J]. 气候变化研究进展,2017,13(5):483-493.
- [13] 何霄嘉,王国庆,鲍振鑫. 气候、植被变化与水文循环响应研究进展及展望[J]. 水资源与水工程学报,2016,27(2):1-5.
- [14] 刘闻,曹明明,邱海军. 气候变化和人类活动的水文水资源效应研究进展[J]. 水土保持通报,2012,32(5):215-219+264.
- [15] 吴晗,董增川,蒋飞卿,等. 黄河源区气候变化特性分析[J]. 水资源与水工程学报,2018,29(6):1-7.
- [16] 柳春. 黄河流域近50年气候变化及未来预估[D]. 南京:南京信息工程大学,2013.
- [17] 王丽娜. 气候变化对黄河上游流域径流影响分析[J]. 水利与建筑工程学报,2015,13(1):182-186+192.
- [18] 强贵珍. 黄河上游宁蒙河段径流变化特征分析及预测[D]. 兰州:兰州理工大学,2017.
- [19] 吕振豫. 黄河上游区人类活动和气候变化对水沙过程的影响研究[D]. 北京:中国水利水电科学研究院,2017.
- [20] 朱丽,刘蓉,文军,等. 近50a来洮河流域气候变化和干旱演变过程[J]. 干旱气象,2018,36(2):234-242.
- [21] 王万瑞,王刘明,张雪蕾,等. 1956-2015年洮河径流演变特征研究[J]. 西北师范大学学报(自然科学版),2018,54(1):92-99.
- [22] 马国军. 基于SWAT模型的湟水河流域生态水文效应研究[D]. 郑州:郑州大学,2014.
- [23] 赵越. 祖厉河流域水沙变化特征及水土保持减水减沙效益研究[D]. 兰州:甘肃农业大学,2016.
- [24] 赵建华,刘翠善,王国庆,等. 近60年来黄河流域气候变化及河川径流演变与响应[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版),2018,39(3):1-5+12.
- [25] 王进. 气候变化对祖厉河流域水文环境的影响[J]. 水文,2011,31(4):88-91.
- [26] 王晓勇,张德栋,王毓森. 祖厉河流域水资源演变趋势分析[J]. 甘肃科技,2012,28(04):39-40.
- [27] 徐宗桂,任东. 祖厉河流域水沙关系研究[J]. 水利规划与设计,2011(5):47-49.
- [28] 王进. 流域径流变化驱动力分析与研究——以祖厉河为例[J]. 中国水利,2010(12):10-12.
- [29] 张波,谷晓平,古书鸿,等. 近55年贵州省潜在蒸散量变化特征及影响因子分析[J]. 水资源与水工程学报,2017,28(3):20-26.
- [30] 刘吉峰,王金花,焦敏辉,等. 全球气候变化背景下中国黄河流域的响应[J]. 干旱区研究,2011,28(5):860-865.
- [31] 刘雅各,袁凤辉,王安志,等. 长白山生态功能区气候变化特征[J]. 应用生态学报,2019,30(5):1503-1512.
- [32] 胡清静. 甘肃省1959-2006年气候及主要河流径流特征分析[D]. 兰州:兰州大学,2011.
- [33] 李庆,高素改,张春来,等. 内蒙古草地变化过程中气候变化和人类活动的相对作用评估[J]. 地理与地理信息科学,2019,35(3):99-104.
- [34] 刘志红,郭伟玲,杨勤科,等. 近20年黄土高原不同地貌类型区植被覆盖变化及原因分析[J]. 中国水土保持科学,2011,9(1):16-23.
- [35] 宁婷婷. Budyko框架下黄土高原流域蒸散时空变化及其归因分析[D]. 杨凌:中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心,2017.

- [36] 王丽娜. 气候变化对黄河上游流域径流影响分析[J]. 吉林水利, 2014(12): 35-39.
- [37] 冯颖, 陆宝宏, 马程晨, 等. 蒙江流域降水及径流变化特征分析[J]. 水电能源科学, 2019, 37(5): 1-5.
- [38] 杜勤勤, 张明军, 王圣杰, 等. 中国气温变化对全球变暖停滞的响应[J]. 地理学报, 2018, 73(9): 1748-1764.
- [39] VAROTSOS C A, EFSTATHIOU M N, CHRISTODOULAKIS J. Abrupt changes in global tropospheric temperature[J]. Atmospheric Research, 2019, 217: 114-119.
- [40] 李忠, 程增辉, 张鲁, 等. 气候变化影响下新疆水文要素变化特征及预测[J]. 水科学与工程学报, 2018(6): 1-6.
- [41] 赖祖铭. 气候变化的水文效应[J]. 干旱区地理, 1989, 12(2): 50-58.
- [42] 王冠, 王平, 王田野, 等. 1900年以来贝加尔湖水位变化及其原因分析[J]. 资源科学, 2018, 40(11): 2177-2186.
- [43] 熊翰林. 赣江流域径流对气候变化的响应[D]. 南昌: 南昌工程学院, 2018.
- [44] 严宇红, 黄维东, 吴锦奎, 等. 疏勒河流域泥沙分布规律及水沙关系研究[J]. 干旱区地理, 2019, 42(1): 47-55.
- [45] 王怡菲, 姚顺波, 邓元杰. 渭河流域水土流失治理效率的时空格局演化与影响因素[J]. 地理科学, 2019, 39(5): 836-846.
- [46] 江辉, 刘瑶, 陈晓玲, 等. 1965-2011年赣江中上游年输沙量变化及影响因素[J]. 人民长江, 2017, 48(24): 66-70.
- [47] 李斌, 解建仓, 胡彦华, 等. 1961年-2013年渭河流域降水与径流变化特征[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(2): 29-36.
- [48] 刘俊萍, 佟春生, 邹先柏, 等. 基于脉冲响应函数的降水和气温与径流变化的关系研究[J]. 数学的实践与认识, 2017, 47(24): 155-162.
- [49] 张立杰, 朱颖洁, 石山, 等. 近60年西江水沙时空演变特征分析[J]. 科技通报, 2018, 34(5): 46-51.

