

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20221547

干旱半干旱区流域水文变异下生态效应研究

崔亮¹, 王进², 吕明侠²

(1. 甘肃省水文站, 甘肃 兰州 730000; 2. 甘肃省定西水文站, 甘肃 定西 743000)

摘要: 为分析干旱半干旱区流域水文变异下生态效应, 基于干旱半干旱区流域祖厉河流域 50 年来径流历史资料, 采用累积距平分析法、M-K 非参数突变性检验和基于流量历时曲线径流生态指标分析方法分析了水文变异下的时空演变和生态效应。结果表明, 自 1970 年以来, 研究流域的地表径流量受气候的强烈作用, 在 1995 年发生了变异; 研究流域径流变异后地表径流量显著减少, 汛期径流量和年径流量分别减少了 $3\ 690 \times 10^4$ 、 $3\ 212 \times 10^4 \text{ m}^3$; 径流变异后研究流域内生态赤字明显, 且非汛期的径流生态指标在年尺度上的占比增加。

关键词: 干旱半干旱区; 祖厉河; 水文变异; 生态效应

中图分类号: P338; TV121

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)07-0072-03

1 概况

祖厉河位于黄河上游的陇西黄土高原, 地貌形态为黄土丘陵和残垣, 植被稀疏, 冲刷严重, 以其含沙量大和苦咸水环境特征闻名于世, 流域水质型和水量型缺水严重。祖厉河流域发源于会宁县南部与通渭县交界华家岭北麓, 于靖远县城西 3 km 处红嘴子注入黄河。流域全长 219 km, 流域面积 $10\ 680 \text{ km}^2$ 。祖厉河流域气候属于温带干旱半干旱气候区, 气温由南向北递增, 降水由南向北递减, 流域多年平均降水量为 365.2 mm, 年均输沙量达到 $4\ 223.5 \times 10^4 \text{ t}$, 侵蚀模数为 $3\ 966.8 \text{ t/km}^2$, 年均径流量为 $1.27 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。在气候变化条件下, 该流域水文环境发生变化。流域气温上升显著, 尤其冬季升温更为明显, 年平均和冬季升温率分别为 0.355 、 $0.424 \text{ }^\circ\text{C}/10\text{a}$ ^[1]。降水呈不显著下降变化, 降水的年内分配日益均匀化, 且存在空间差异性。径流出现了剧烈减少, 1995 年后年径流量较 1995 年前减少了 61.1%。为此, 开展流域生态效应相关研究对水资源匮乏区域的水资源管理、河湖复苏和筑牢守好水生态屏障具有重要意义。本文基于黄河上游干旱与半干旱区域一级支流祖厉河流域 50 年来径流历史资料, 采用累积距平分析法、M-K 非参数突变性

检验和基于流量历时曲线径流生态指标分析方法, 开展水文变异下的时空演变和生态效应研究, 旨在为黄河流域干旱与半干旱区生态保护和高质量发展提供基础理论研究技术支持。

2 数据资料和研究方法

2.1 数据资料

基础数据来自于流域水文站日尺度径流实测系列资料, 研究时段为 1970~2020 年, 研究站点为上游会宁水文站和下游靖远水文站。

2.2 研究方法

采用累积距平分析、M-K 非参数突变性检验^[2]和基于流量历时曲线径流生态指标^[3,4]分析方法。其中径流丰枯变化和径流变异采用累积距平分析法, 径流量突变点分析采用 M-K 非参数突变性检验法, 径流生态效应研究采用基于流量历时曲线径流生态指标分析方法。

累积距平分析可直观利用累积距平曲线判断变化趋势及发生转折和突变时间节点, 其表达式为:

$$L_{w_i} = \sum_{i=1}^N (W_i - \bar{W}) \quad (1)$$

式中, L_{w_i} 为第 i 年累积距平值; W_i 为第 i 年径流量; \bar{W} 为径流系列多年平均值。

基于流量历时曲线^[4] (F_{FDC}) 为一种无量纲的

收稿日期: 2022-07-28, 修回日期: 2022-09-14

基金项目: 甘肃省水利科学试验研究及技术推广计划项目(2022059)

作者简介: 崔亮(1982-), 男, 高级工程师, 研究方向为水文水资源, E-mail: 76916991@qq.com

通讯作者: 王进(1972-), 男, 正高级工程师, 研究方向为水文水资源, E-mail: dxwangjin@qq.com

生态径流 (eco-flow) 指标,即用生态剩余和生态赤字来评价水文情势的变化。GAO B 等^[5,6]在此基础上改进了生态剩余和生态赤字定义,提出分位 F_{FDC} ,即根据选择时间段的日流量数据,计算时段内某个流量等于或大于分位 F_{FDC} 流量所对应的时间相关关系,可简单表述为径流大小和频率关系,即一段时间内日流量数据 Q_i 由大到小排列,其超过概率 P_i 为:

$$P_i = i / (n + 1) \quad (2)$$

式中, i 为秩次; n 为日流量观测值 Q_i 的样本大小。

在已有研究基础上,根据研究流域各水文站实测的日流量资料得到变异点之前时段内每一年的年、汛期和非汛期 F_{FDC} 。对变异点之前所有年份的年、汛期和非汛期流量进行排序,得到 75%、25% 分位数对应的年份,将这两个年份的年、汛期和非汛期 F_{FDC} 分别定义为 $0.75F_{FDC}$ 、 $0.25F_{FDC}$ 。对于每一年,其 F_{FDC} 高于 $0.75F_{FDC}$,则将该 F_{FDC} 与 $0.75F_{FDC}$ 围成的面积与多年平均的年、汛期和非汛期流量的比值定义为生态剩余,该值代表的意义为该水文要素超过河流生态系统对该要素需求值;若其 F_{FDC} 低于 $0.25F_{FDC}$,则将该 F_{FDC} 与 $0.25F_{FDC}$ 围成的面积与多年平均流量的比值定义为生态赤字,该值代表的意义为该水文要素低于河流生态系统对该要素的需求值。研究流域内水文变异前后年历年径流量 F_{FDC} 散点图见图 1(图中两条白色曲线由上到下依次表示 $0.75F_{FDC}$ 、 $0.25F_{FDC}$ 曲线,黑色和浅灰色分别代表变异前后的 F_{FDC} 曲线)。

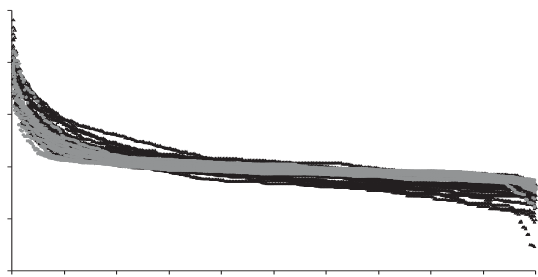


图 1 变异前后流量 F_{FDC} 散点图

Fig. 1 Annual flow duration curves before and after alterations

3 结果与分析

3.1 研究流域水文环境变异

分析研究流域祖厉河上游会宁水文站和下游靖远水文站 1970~2020 年间 50 余年实测径流系列资料,点绘研究流域各水文站点年、汛期和非汛期径流量累积距平分析见图 2。

由图 2 可知,会宁、靖远水文站的年径流量经

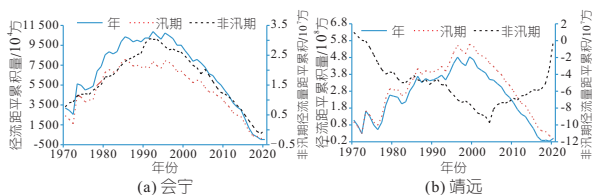


图 2 研究流域径流量累积距平分析示意图

Fig. 2 Analysis diagram of cumulative runoff anomaly in the study basin

历了丰水年、平水年和枯水年的周期变化。汛期径流量的径流累积变化过程与年径流量的变化极为接近,且变化过程基本一致。会宁、靖远水文站的平水期分别为 1985~1995、1986~1993 年。1995 年后流域内的径流量稳定减少,为枯水期。而在平水期前的时段内流域径流量呈显著的丰枯交替。径流量的突变时间会宁水文站为 1992、1995 年,靖远水文站为 1996 和 1999 年,突变时间较为接近。流域径流变异年份与甘肃省气温的明显上升年份(1997 年)非常接近。非汛期径流量的丰枯变化与年径流量和汛期径流量的变化差别较大,且表现出空间差异性。会宁水文站在 1991 年前的非汛期径流量为单调的丰水期,而 1991 年后为单调的枯水期。下游靖远水文站非汛期径流量则在 2004 年前为枯水期,而 2004 年后为丰水期。非汛期的突变年份在会宁、靖远水文站分别为 1991、2004 年。

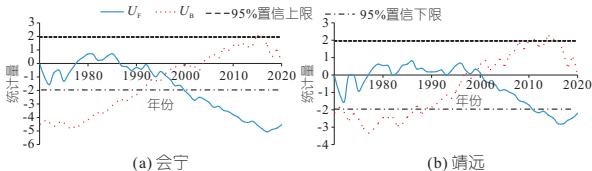


图 3 研究流域径流量 M-K 非参数突变性检验示意图

Fig. 3 M-K nonparametric mutagenicity test of watershed runoff

流域内汛期径流量占全年径流量的 70% 以上,非汛期径流量占比较小。另外对年径流量的突变性运用 M-K 非参数检验(图 3)方法发现,研究流域内会宁站、靖远站年径流量的突变年份分别为 1995、1999 年,与累积距平分析方法的突变年份基本一致。这与吕明侠等^[7,8]的研究结果非常接近。为便于研究流域水文变异的生态效应,选择年径流量的突变年份作为变异年份(变异年为 1995 年)。

3.2 径流指标的时空变化

以 1995 年为水文变异年,对变异前后研究流域径流变化进行分析,见表 1。

由表 1 可知,流域内河道径流量主要集中在汛期,汛期径流量占全年径流量的 70% 以上。会宁水文站除非汛期径流量的 C_v 在水文变异后较

表 1 变异前后研究流域径流量变化计算结果

Tab. 1 Calculation results of runoff changes in the study basin before and after variation

站点	指标	年径流量		汛期径流量		非汛期径流量	
		突变前	突变后	突变前	突变后	突变前	突变后
会宁	平均值/ $10^4 m^3$	1 378	536	1 055	473	323	103
	最大值/ $10^4 m^3$	4 163	1 149	3 626	1011	986	369
	最小值/ $10^4 m^3$	495	30	261	0	80	0
	极差/ $10^4 m^3$	3 667	1 120	3 365	1011	905	369
	C_V	0.67	0.50	0.79	0.52	0.51	0.93
	变化率	-42.73	-5.77	-33.57	-4.39	-9.15	-1.37
靖远	平均值/ $10^4 m^3$	10 693	7 481	8 339	4 649	2 354	2 831
	最大值/ $10^4 m^3$	22 335	14 236	19 827	11 954	3 588	5 887
	最小值/ $10^4 m^3$	3 884	4 266	2 162	1 737	1 661	1 884
	极差/ $10^4 m^3$	18 451	9 970	17 666	10 218	1 927	4 003
	C_V	0.46	0.32	0.57	0.50	0.21	0.30
	变化率	-24.62	-61.86	-19.15	-50.41	-4.33	71.04

注:变化率单位为 $10^4 m^3$ /年。

变异前增大外,该站径流量指标(年平均、最大、最小径流量、径流减少率和 C_V)均在水文变异后较变异前明显减少。径流变异后的年平均径流量减少了 61.1%,汛期、非汛期径流量分别减少了 55.2%、68.1%。年径流量、汛期、非汛期径流量的极差分别减少了 69.5%、70.0%、59.2%,减少率分别在变异后较变异前减少了 86.5%、86.9%、85.0%。在水文变异下靖远水文站的年径流量和汛期径流量变化与会宁水文站的基本一致,均为减少。其中,年平均径流量、汛期径流量分别减少了 30.0%、44.2%;年径流量和汛期径流量的极差分别减少了 46.0%、42.2%。年径流量、汛期径流量的减少率分别增加了 1.5、1.6 倍。然而,非汛期径流量指标却发生了相反的变化。

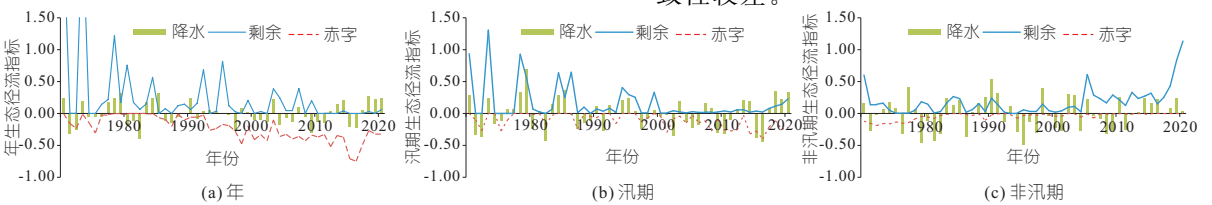


图 4 研究流域生态径流指标变化示意图

Fig. 4 Schematic diagram of ecological runoff index changes in the study basin

因此,自 2005 年以来,流域内非汛期的生态径流效应凸显,对年尺度生态径流效应的贡献占比逐渐增大,而汛期生态径流效应的贡献较差。汛期生态径流指标变化与近年来降水偏枯(降水距平大多为负值)一致性明显。已有研究表明,流域内在 1997~2015 年间的降水偏少,且汛期降水占年降水的 86.9%。

4 结论

a. 流域年径流量呈丰、平、枯水年周期变化,突变时间节点上游会宁水文站为 1992、1995 年,下游靖远水文站为 1996、1999 年。综合分析流域变异年份为 1995 年。

非汛期年平均径流量增加了 20.3%,非汛期径流量的极差增大了 108%。而非汛期径流量也由减少趋势转变为增加趋势,水文变异后的非汛期径流量增加率为 $71.04 \times 10^4 m^3/a$,非汛期径流量增加与流域内靖会引黄提灌工程回归水量有关,靖会引黄提灌工程是我省中部干旱地区大型骨干水利工程,于 1971 年动工修建,1973 年通水运行。设计流量 $12 m^3/s$,设计灌溉面积 $2 \times 10^4 hm^2$,受益人口达 12 万多人。自工程投入运行以来,年提水量由 1973 年 $970 \times 10^4 m^3$ 提高到目前 $8 000 \times 10^4 m^3$,实灌面积由 $2 \times 10^3 hm^2$ 发展到 $1.7 \times 10^4 hm^2$ 。

3.3 生态效应

1970~2020 年研究流域祖厉河生态径流指标变化(图 4)显示,流域的年生态径流指标表现出明显的波动变化,与降水距平变化的一致性较强。在 1970~2020 年间,生态剩余明显减少,而生态赤字明显增加。汛期生态剩余变幅较年尺度变幅小,且其明显变化时间(1995 年)较年尺度变化延迟(2000 年),与降水距平的一致性较年尺度的一致性更强。径流变异(1995 年)前靖远站的年生态径流指标变化幅度较大,主要表现为生态剩余,在径流变异后则主要表现为生态赤字。非汛期生态剩余呈增大趋势,而生态赤字呈减少趋势。尤其在 2005 年附近,生态剩余和生态赤字分别出现了明显的增加和降低变化,生态赤字接近于 0。另外,非汛期生态径流指标与降水距平的一致性较差。

b. 径流变异后,流域水资源量及其变化率发生变化。上下游年径流量、汛期径流量分别较变异前减少了 46.0%、42.2%,其减少率分别增大了 1.5、1.6 倍。

c. 流域非汛期径流量变化上下游站点存在差异,上游会宁水文站非汛期径流量减少,下游靖远水文站非汛期径流量增加,下游非汛期径流量增加原因与流域内靖会引黄提灌工程回归水量有关。

d. 流域研究时段内年生态径流指标呈明显的波动变化,与流域降水量变化一致性较强。总的趋势为生态剩余明显减少,而生态赤字明显增加,生态剩余逐渐向生态赤字转变。

(下转第 63 页)

