

黄河流域径流情势区域变化特征分析

王未^{1,2}, 张永勇¹

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所 陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 针对黄河流域径流情势的区域差异性, 采用 Mann-Kendall 法检测 1960-2015 年黄河源头和上、中、下游重点控制站点的径流情势指标的变化趋势, 并采用变化范围法 (RVA) 评估其综合变化程度。结果表明: 除源区黄河沿站外, 源区唐乃亥站和上、中、下游各站点的大部分径流情势指标的变化为下降趋势, 尤其是汛期大部分月份的径流量、高流量及其历时显著减少, 另外上、中、下游各站点的年最大径流量也都显著减少; 部分径流指标存在一定的区域差异性, 如源区黄河沿站 6、9 月径流量和最大径流量显著增加、上游年最小径流量出现时间有所推迟、中游高流量频率显著减少, 最大径流量的出现时间显著提前、下游几乎所有月份的径流量均显著减少, 最大径流量的时序显著前移等; 从综合变化程度来看, 流域各站点的径流情势发生了全面改变, 整体改变度在中度及以上, 其中频率和历时的改变度最大。利津站的改变度最大, 龙门站次之。

关键词: 径流情势; M-K 趋势检验; 区域变化特征; 改变度; 黄河流域

中图分类号: TV121; P333

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2020)03-0059-07

Analysis on regional variation characteristics of flow regimes in the Yellow River Basin

WANG Wei^{1,2}, ZHANG Yongyong¹

(1. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Process, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2. University of Chinese Academic of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: To analyze regional differences of flow regimes in the Yellow River Basin, the Mann-Kendall test method was adopted to explore the temporal variation trend and Range of Variability Approach (RVA) was applied to assess hydrological alteration of metrics at all stations from 1960 to 2015. The results show that: Except for the Huangheyan station, most flow regime metrics of the Tangnaihai station and other stations in the upper, middle and lower reaches show a decreasing trend, especially monthly flow in the flood season, high flow and its duration. And the annual maximum flow in the upper, middle and lower reaches also decreases significantly; Some metrics also have regional differences. For example, the monthly runoff of June and September and maximum runoff of the Huangheyan station increase significantly; the occur time of minimum flow is delayed; the frequency of high flow in the middle reaches decreases significantly, and the occur time of maximum time is significantly advanced; the monthly runoff in downstream is significantly reduced, and the occur time of maximum time is significantly advanced; The flow regimes of hydrological stations in the Yellow River Basin have been completely changed. The overall degree of change is moderate and above, and the frequency and duration of changing degree are the greatest. Among them, Lijin Station has the largest changing degree; followed by Longmen Station.

Key words: flow regimes; Mann-Kendall test; regional variation characteristics; changing degree; the Yellow River Basin

收稿日期: 2019-09-15; 修回日期: 2019-10-18

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41730645, 41671024)

作者简介: 王未 (1997-), 男, 安徽六安人, 硕士研究生, 主要从事水文水资源研究。

通讯作者: 张永勇 (1981-), 男, 湖北京山人, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事流域水循环及环境水文学研究。

1 研究背景

径流情势(即流量大小、频率、历时、时序与变化率)可完整描述径流过程的变化^[1],直接影响着水质迁移转化过程、水生生态系统的结构与功能以及生物多样性等^[2-4]。径流情势自提出以来,已广泛应用于水文-生态系统响应机制探索^[1]、环境流量评估^[5]、闸坝调控的水文效应^[6]等方面。因此径流情势的演变特征及其区域差异研究对探索黄河流域水循环过程及其伴生的水沙平衡、河道断流与水资源短缺等水问题的成因以及水资源优化调度等具有重要的意义。

目前,关于黄河流域径流过程演变规律的研究主要关注径流量的变化^[7-8],而对径流情势其他指标的研究还有待加强。从方法上来看,大多采用水文模型模拟^[8-9]和数理统计^[10-11]等。水文模型能定量地模拟流域产汇流过程,但对资料要求很高,而且对人类活动影响的刻画还有待进一步改进^[9]。在数理统计方面,趋势检验(如 Mann-Kendall 非参数检验法)、跳跃分析(如 Pettitt 检验)以及变化范围法(RVA)等所需数据资料较少,使用简单,已被广泛应用于探索径流情势的演变特征和改变程度^[10-14]。如王娇等^[10]利用 Mann-Kendall 非参数检验方法分析了黄河支流泾河张家山站年径流量的变化趋势。武玮等^[12]采用 RVA 法评估了渭河流域的 5 个重点控制水文站的径流情势的改变程度。Tian 等^[14]基于无定河流域 6 个重点控制水文站的径流观测资料,利用 RVA 法检测了 33 个径流情势指标的改变度。

因此,本文除径流量外,引入频率、历时和时序等方面 24 个径流情势指标,对黄河流域源区和上、中、下游重点控制站 1960-2015 年径流过程进行了细致刻画;采用 Mann-Kendall 非参数趋势检验和 RVA 法,分析不同区域典型站点各径流情势指标的演变特征,评估径流情势的改变程度,揭示其区域差异性。研究将进一步丰富和发展已有黄河流域径流特征分析成果,也为我国其他流域径流情势演变特征分析提供参考借鉴。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区概况

黄河流域(32°42'N,96°119'E)发源于青藏高原巴颜喀拉山,流域面积 $79.5 \times 10^4 \text{ km}^2$,干流全长 5 464 km,水系发达。该流域年降水量的均值约为

450 mm,全年的 70% 的降水量来自 6-10 月(汛期),年际波动很大。黄河流域也是我国重要的农业区,农业灌区主要包括宁夏灌区(上游)、河套灌区(中游)和引黄灌区(下游),枯水年的灌溉需水与供水矛盾尖锐。此外,黄河流域建设了大量的水利水电工程,对黄河流域防洪、灌溉和发电发挥着重要的作用。近年来,黄河流域下游断流现象频繁发生,中下游径流量减少,工农业需水量较大,水资源合理调度的形势严峻。黄河流域水系及重点控制水文站、灌区与水库示意图见图 1。

图 1 中所示 8 个重点控制水文站包括 2 个源区的站点(黄河沿和唐乃亥站)、2 个上游的站点(兰州和青铜峡站)、2 个中游的站点(头道拐和龙门站)和 2 个下游的站点(花园口和利津站)。

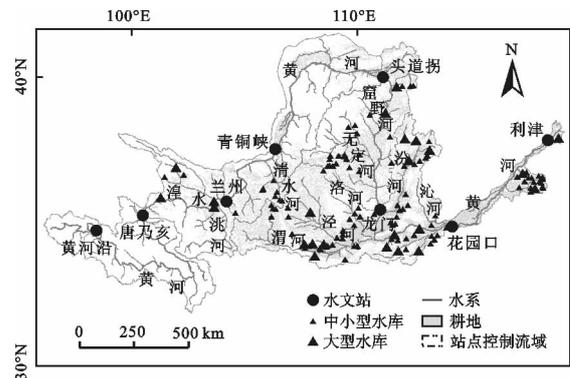


图 1 黄河流域的重点控制水文站、灌区与水库示意图

2.2 数据来源

收集了 8 个重点控制水文站 1960-2015 年共计 56 a 的日径流观测数据,数据来源于黄河水利委员会水文局。此外,收集了流域土地利用、大中小型水库和灌区数据。土地利用数据由中国科学院资源环境科学数据中心提供,主要分为建设用地、耕地、荒漠、冰川雪地、沼泽地、草地、水域和林地;水库和灌区数据来源于黄河流域水资源公报。

唐乃亥-兰州区间和龙门-花园口区间水库总库容分别占黄河流域水库总库容的 34.22% 和 62.11%,水库调控作用较强。而头道拐-龙门区间、龙门-花园口区间和花园口-利津区间的灌区面积均较大,农业需水量较大。黄河流域灌区面积与水库统计数据见表 1。

2.3 研究方法

2.3.1 径流情势指标 本文选取了大小、频率、历时和时序 4 个方面共 24 个径流情势指标用于趋势分析和评估,包括 18 个径流大小指标(平均流量 14 个、低流量 2 个和高流量 2 个)、2 个径流事件出现

频次指标(低流量 1 个和高流量 1 个)、2 个径流事件历时指标(低流量 1 个和高流量 1 个)和 2 个径流

事件时序指标(低流量 1 个和高流量 1 个)。24 个径流情势指标详见表 2。

表 1 黄河流域灌区面积与水库统计

区域	水文站点	控制区域灌区 面积/km ²	上游区域总灌区 面积/km ²	小型 水库数	大型 水库数	控制区域总 库容/10 ⁸ m ³	上游区域总 库容/10 ⁸ m ³
源区	黄河沿	0	0	0	0	0	0
	唐乃亥	484	484	0	0	0	0
上游	兰州	14186	14670	2	4	304.29	304.29
	青铜峡	16524	31194	8	1	8.14	312.43
中游	头道拐	18938	50132	0	0	0	312.43
	龙门	42043	92175	19	2	16.53	328.96
下游	花园口	100778	192953	70	14	552.33	881.29
	利津	20657	213610	17	2	7.95	889.24

表 2 黄河流域用于趋势分析和评估的 24 个径流情势指标

编号	类别	流态	指标	缩写	尺度
1 ~ 12		平均流量	平均月径流/(m ³ · s ⁻¹)	Jun, Jul, Aug, Sep, Oct, Nov, Dec, Jan, Feb, Mar, Apr, May	月
13	大小	低流量	平均年径流/(m ³ · s ⁻¹)	MAF	年
14			年径流变差系数	CVADF	年
15			年最小流量/(m ³ · s ⁻¹)	Amin	年
16			低流量(第 90%)/(m ³ · s ⁻¹)	Low90	年
17	高流量	高流量	年最大流量/(m ³ · s ⁻¹)	Amax	年
18			高流量(第 10%)/(m ³ · s ⁻¹)	Hig10	年
19	频率	低流量	低流量个数(小于第 90%)	LowC90	年
20		高流量	高流量个数(大于第 10%)	HigC10	年
21	历时	低流量	低流量总历时(小于第 90%)/d	LowS90	年
22		高流量	高流量总历时(大于第 10%)/d	HigS10	年
23	时序	低流量	最小流量时序	JANMinF	年
24		高流量	最大流量时序	JANMaxF	年

2.3.2 Mann - Kendall 趋势检验方法 本文基于 Mann - Kendall 检验法检测水文站点径流情势指标的变化趋势。该方法原理简单,计算方便,且不需要样本遵从一定的分布^[7-9],已广泛应用于水文序列的时间变化检验中^[10-11]。当统计指标 Z 值满足 $|Z| > Z_{1-\alpha/2}$ 时,认为序列的变化趋势是显著的。其中 α 为显著性水平,一般取 5%, $Z_{1-\alpha/2}$ 等于 1.96。对于时间序列 $X(t) (t = 1, 2, \dots, n)$, 其趋势估计量 β 为:

$$\beta = \text{median} \frac{X_j - X_i}{j - i} \quad (1 \leq i < j \leq n) \quad (1)$$

2.3.3 改变程度评估 识别各水文站点的径流情势的基准期和改变期是评估径流情势改变程度的基础。Pettitt 检验被广泛用于检验序列的突变情况^[7]。本文采用 Pettitt 检验检测所有站点的所有径

流情势指标的突变年份,并将平均突变时间作为基准期和改变期的划分点,分别计算两个时期各径流情势指标的均值 (\bar{x}) 和变差系数 (C_V)。径流情势 4 个类别指标的改变率 $v_{k,i}$ 可用均值和变差系数的变化来定义:

$$\begin{cases} v_{k,i}^1 = \frac{\bar{x}_i^c - \bar{x}_i^b}{\bar{x}_i^b} \\ v_{k,i}^2 = \frac{C_{V_i}^c - C_{V_i}^b}{C_{V_i}^b} \end{cases} \quad (k = 1, 2, 3, 4) \quad (2)$$

式中: k 为径流情势的 4 个类别(大小、频率、历时和出现时间), i 为某一类别第 i 个指标, b 和 c 分别表示基准期和改变期。

根据 Tan - sigmoid 公式^[13],将改变率归一化处理,可得到各指标的综合改变度 $D_{k,i} (0 \leq D_{k,i} \leq 1)$:

$$\begin{cases} d_{k,i}^1 = \frac{1 - \exp(-3v_{k,i}^1)}{1 + \exp(-3v_{k,i}^1)} \\ d_{k,i}^2 = \frac{1 - \exp(-3v_{k,i}^2)}{1 + \exp(-3v_{k,i}^2)} \\ D_{k,i} = \frac{|d_{k,i}^1| + |d_{k,i}^2|}{2} \end{cases} \quad (3)$$

因此径流情势4个类别的改变度 D_k 的计算公式如下:

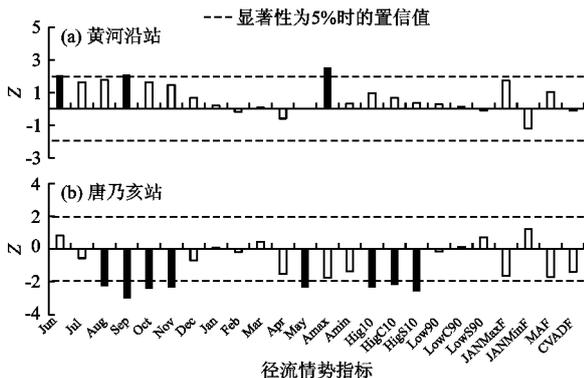
$$D_k = \frac{\sum_{i=1}^m D_{k,i}}{m} \quad (k = 1, 2, 3, 4) \quad (4)$$

式中: m 为径流情势各类别的指标总数。 D_k 可被划分为4个区间,即 $[0, 0.25)$ 为轻度改变、 $[0.25, 0.50)$ 为中度改变、 $[0.50, 0.75)$ 为重度改变、 $[0.75, 1]$ 为严重改变。取4个类别指标改变度的均值,即可得到径流情势的整体改变度 D 。

3 结果分析与讨论

3.1 径流情势的变化

3.1.1 黄河源区 图2为1960-2015年黄河源区黄河沿和唐乃亥水文站径流情势指标变化趋势分析结果。



注:显著性水平为5%的临界值 $Z = 1.96$,若 $|Z| > 1.96$,以黑色柱体表示,表明有显著的变化趋势。下同。

图2 1960-2015年黄河源区黄河沿和唐乃亥水文站径流情势指标趋势分析结果

由图2可知,黄河源区黄河沿和唐乃亥站非汛期大部分月份径流、低流量及其频率、历时和时序等指标无显著变化,但其他指标的变化趋势存在较大差异。从黄河沿站来看,除6和9月径流量、年最大径流量呈现显著增加趋势外,径流量其他指标、径流事件出现频次、历时和时序等指标均无明显变化。唐乃亥站大多数径流量指标呈现减少趋势,其中统计显著的指标有5月和8-11月径流量及高流量,

最大减幅为 $8.38 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{a})$ (9月);高流量频率和历时均显著减少,而低流量频率及历时变化并不显著;时序指标无显著变化。

3.1.2 黄河上游 图3为1960-2015年黄河上游兰州和青铜峡水文站径流情势指标趋势分析结果。由图3可知,黄河上游兰州和青铜峡站汛期的7-9月径流量显著减少,径流过程趋于平缓;年最大径流、高流量及其历时、年径流变差系数也显著减少。具体表现为:兰州站汛期月径流最大减幅发生在7月,为 $14.73 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{a})$;在非汛期显著增多的月份为3-5月和11月;此外,低流量显著增长,增幅为 $2.57 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{a})$,但年最小径流变化并不显著;低流量出现频次和高流量历时显著减少;时序指标无显著变化。青铜峡站汛期月径流最大减幅也出现在7月,为 $16.07 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{a})$,非汛期1、2和12月径流量显著增加;低流量和高流量频率均无显著变化;高流量历时显著减少;年最小流量出现时间显著推迟。

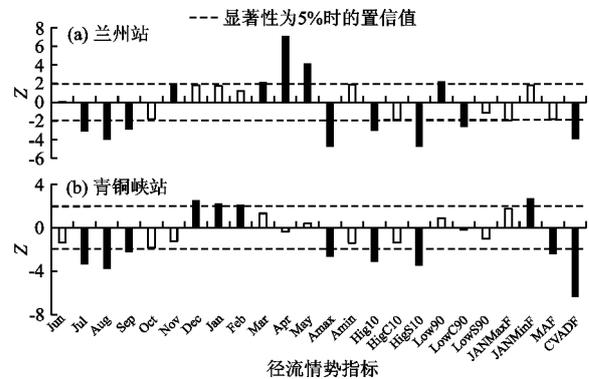


图3 1960-2015年黄河上游兰州和青铜峡水文站径流情势指标趋势分析结果

3.1.3 黄河中游 图4为1960-2015年黄河中游头道拐和龙门水文站径流情势指标趋势分析结果。由图4可知,黄河中游头道拐和龙门站径流总量呈现显著减少趋势,其中汛期大部分月份径流量显著减少,非汛期大部分月份径流量无明显变化,径流过程趋于平缓,而年最大径流量、高流量及其频率与历时、径流变差系数显著减小,年最大径流量出现时间显著移前。具体表现为:头道拐站7、8、10和11月径流量锐减,其中变幅最大出现在10月份,减小趋势值为 $19.19 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{a})$,3月径流量显著增加,其他月份无显著变化;最大径流量和高流量显著减少;高流量出现频次、历时也均呈现显著减少趋势;年最大径流量出现时间显著提前。龙门站与头道拐站明显不同的是9月径流量显著减少;年最小径流量和低流量也显著减少,减少趋势值分别为1.08和2.4

$m^3/(s \cdot a)$;低流量出现频次与历时显著增加。

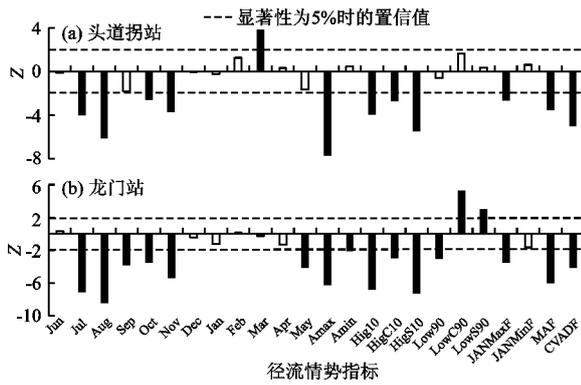


图 4 1960 - 2015 年黄河中游头道拐和龙门水文站径流情势指标趋势分析结果

3.1.4 黄河下游 图 5 为 1960 - 2015 年黄河下游花园口和利津水文站径流情势指标趋势分析结果。

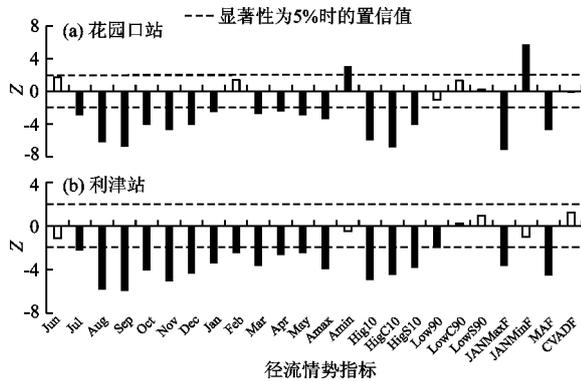


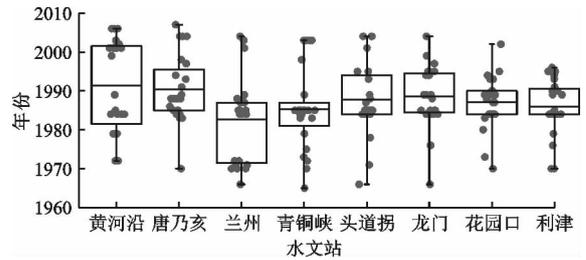
图 5 1960 - 2015 年黄河下游花园口和利津水文站径流情势指标趋势分析结果

由图 5 可知,黄河下游花园口和利津站大部分径流情势指标均呈现显著减少趋势,特别是年径流量、大部分月径流量、最大径流量、高流量及其出现频次和历时以及最大径流出现时间等。具体表现为:花园口站月径流量减少最显著的月份为 9 月,减小趋势值为 $42.31 m^3/(s \cdot a)$;高流量也显著减少,减小趋势值为 $35.28 m^3/(s \cdot a)$;但最小径流量显著增加,增幅趋势为 $3.15 m^3/(s \cdot a)$;最大径流量出现时间提前而最小径流量出现时间推迟,且统计值均为显著。利津站月径流量减少幅度最大也出现在 9 月,减小趋势值为 $50.72 m^3/(s \cdot a)$;高流量减少更加显著,减幅趋势为 $55.24 m^3/(s \cdot a)$;低流量也显著减少;最大流量出现时间显著提前。

3.2 径流情势的改变度

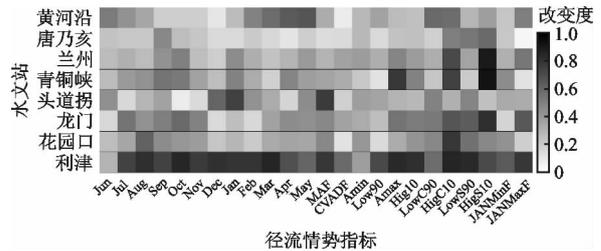
1960 - 2015 年黄河流域各重点控制水文站径流情势突变分析结果如图 6 所示,各重点控制水文站的径流情势指标改变度如图 7 和表 3 所示。根据

图 6、7 和表 3 分别对 1960 - 2015 年黄河流域源区和上、中、下游各重点控制水文站的径流情势突变年份及指标改变度进行分析。



注:箱形图的上、中、下 3 个边分别为第 25%、均值和第 75%;灰色点为每个指标的突变年份,共计 24 个指标。

图 6 1960 - 2015 年黄河流域各重点控制水文站径流情势突变分析结果



注:每个栅格的颜色对应所在站点的对应指标的改变度 ($D_{k,i}$)

图 7 黄河流域各站点径流情势指标的改变度评估结果

表 3 黄河流域各水文站点径流情势的改变程度

区域	水文站点	4 个类别指标的改变度				整体改变度
		大小	频率	历时	出现时间	
黄河源区	黄河沿	0.343	0.579	0.332	0.366	0.405
	唐乃亥	0.207	0.347	0.556	0.127	0.309
黄河上游	兰州	0.338	0.517	0.623	0.421	0.475
	青铜峡	0.383	0.488	0.565	0.280	0.429
黄河中游	头道拐	0.357	0.393	0.360	0.330	0.360
	龙门	0.387	0.597	0.724	0.410	0.529
黄河下游	花园口	0.337	0.625	0.512	0.311	0.446
	利津	0.713	0.715	0.772	0.716	0.729

3.2.1 黄河源区 源区黄河沿和唐乃亥站径流情势突变年份分别为 1991 和 1990 年。径流情势的整体改变度均为中度改变,其中大小和时序指标主要发生轻度或中度改变,频率和历时指标发生中度或重度改变。

黄河沿站的整体改变度为 0.405;径流事件出现频次的改变度最大(0.579),为重度改变,特别是高流量频率和低流量频率的改变度分别为 0.571 和 0.587;而径流量大小、历时和时序为中度改变,其中

3-6月径流量为重度改变。通过对比1980和2015年两期土地利用数据,黄河沿站以上区域草地退化700 km²,占该区域面积的3.32%,荒漠面积增加了684 km²,占该区域面积的3.25%。该区域草场退化等可能是径流情势改变的重要原因之一。

唐乃亥站的整体改变度为0.309。径流事件历时的改变度最大(0.556),为重度改变,其中高流量历时和低流量历时的改变度分别为0.581和0.532;出现频率为中度改变(0.347),其中高流量频率为重度改变(0.507);而径流量大小和时序只发生轻度改变。黄河沿-唐乃亥区域土地利用变化没有黄河沿以上区域显著,径流情势的改变度略小于黄河沿站,但区域内冻土退化严重,土壤深层渗漏量和蒸发量逐渐增加^[15],高流量历时显著减少(图2),径流情势的历时发生重度改变。

3.2.2 黄河上游 上游兰州站和青铜峡站径流情势的突变年份分别为1983和1985年。径流情势整体改变度虽然仍为中度,但其数值比源头地区有明显增大,其中径流量大小、频率、历时和时序均发生了中度或重度改变,可能与黄河上游地区人类活动影响有关。

兰州站径流情势整体改变度为0.475;径流事件出现频次和历时的改变度为0.517和0.623,属于重度改变,特别是高流量历时发生严重改变(0.896);而径流量大小和出现时间发生中度改变,其中最大流量的出现时间改变度最大,为0.535。兰州站径流事件出现频次和历时的明显改变可能与这一区域内水库防洪调度有关。该区域水库总库容为 $304.27 \times 10^8 \text{ m}^3$,占多年径流量的99%,水库对径流情势的调控极为显著(表1)。

青铜峡站的径流情势整体改变度为0.429;径流事件历时的改变度最大(0.565),为重度改变,其中高流量历时发生严重改变(0.921);径流量大小、频率和出现时间发生中度改变,其中年最大流量的改变度最大(0.772)。青铜峡站控制区域水库库容为 $8.14 \times 10^8 \text{ m}^3$ (表1),水库调控作用小于兰州站,所以径流情势总体的改变度小于兰州站。但区域内的宁夏引黄灌区年引黄水量大约为 $30 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[16],也会影响径流情势的大小、出现频次和历时。

3.2.3 黄河中游 中游头道拐站和龙门站径流情势的突变年份分别为1988和1989年。径流情势整体改变度为中度改变及以上,其中径流量大小、频率、历时和时序受到中度或重度改变,受人类活动影响较大。

头道拐站整体改变度为中度改变(0.360),其中1月份径流量和年径流量分别发生重度改变(0.741)和严重改变(0.763)。青铜峡-头道拐站区域没有修建水库,径流情势的改变度小于黄河上游,但该区域的河套灌区引黄灌溉在一定程度上改变了径流情势^[17]。

龙门站径流情势的整体改变度为重度改变(0.529);径流事件历时的改变度最大(0.724),为重度改变,其中高流量历时发生严重改变(0.814);径流量大小、频率和出现时间受到中度改变,其中10月径流、低流量频率、高流量频率和年最大流量出现时间的改变度较大。龙门站控制区域内灌区面积是河套灌区的2倍(表1),灌溉引水量更大。此外,水土保持措施^[7]和区域内大量采矿^[18]等因素使龙门站径流情势的改变度高于黄河源区和上游。

3.2.4 黄河下游 下游花园口站和利津站径流情势的突变年份分别为1987和1986年。径流情势的整体改变度为中度改变及以上,其中径流量大小、频率、历时和时序主要受到中度或重度改变,也受人类活动影响极大。

花园口站径流情势的整体改变度为中度改变(0.446);径流事件的出现频次和历时的改变度较大,为重度改变,其中高流量频率发生严重改变(0.785);其大小和出现时间发生中等改变,其中8月径流量改变度最大,为0.614。花园口站控制区域水库库容为 $552.33 \times 10^8 \text{ m}^3$ (表1),水库调控作用显著,径流情势的改变度与兰州站相仿。

利津站径流情势发生全面改变,整体改变度为重度改变(0.729),其历时的改变度最大(0.772),为严重改变,其中高流量频率的改变度为0.859;其大小、频率和出现时间受到重度改变,大部分指标的改变度大于0.7。利津站径流情势的改变度远大于其他站点,部分年份完全断流,主要是由于花园口下游的引黄灌区需水量较大^[19],过度用水加剧了径流情势的恶化。

4 结 论

本文系统分析了1960-2015年黄河流域重点站点径流量和径流事件出现频次、历时及出现时间等径流情势指标的时间变化趋势,并评估了各站点径流情势指标的改变度,主要结论如下:

(1)除源区黄河沿站外,其他站点的大部分径流情势指标的变化趋势为下降。唐乃亥站径流量在汛期大部分月份均呈现减小的趋势,高流量及其频

率与历时显著减少;上、中、下游站点汛期大部分月份的径流量、年最大径流量、高流量及其历时均显著减少。另外,上游年最小径流量出现时间有所推迟;中游高流量频率显著减小,最大流量的出现时间显著移前;下游几乎所有月份的径流量均显著减小,高流量频率显著减小,最大径流量出现时间显著提前。

(2)黄河流域各水文站点的径流情势发生全面改变,整体改变度在中度及以上,其中径流事件出现频次和历时的改变度最大。源区的径流情势总体上发生中度改变,上、中、下游站点径流情势4个类别指标均发生中度及以上改变,上游和下游控制区域的整体改变度大于中游,其中利津站发生重度改变,龙门站次之。

本文利用多维度径流情势指标,深入分析了黄河流域各区域的径流过程整体变化特征,并评估了其改变度。今后还需要加强气候变化和人类活动等因素对各区域径流情势变化的影响分析和贡献量化方面的研究。

参考文献:

- [1] POFF N L, ALLAN J D, BAIN M B, et al. The natural flow regime: a paradigm for river conservation and restoration[J]. *Bioscience*, 1997,47(11):769-784.
- [2] GORLA L, PERONA P. On quantifying ecologically sustainable flow releases in a diverted river reach[J]. *Journal of Hydrology*, 2013,489:98-107.
- [3] KUIPER J J, JANSE J H, TEURLINCX S, et al. The impact of river regulation on the biodiversity intactness of floodplain wetlands [J]. *Wetlands Ecology and Management*, 2014,22(6):647-658.
- [4] FANAIAN S, GRAAS S, JIANG Yong, et al. An ecological economic assessment of flow regimes in a hydropower dominated river basin;the case of the lower Zambezi River, Mozambique[J]. *Science of the Total Environment*, 2015,505:464-473.
- [5] POFF N L, RICHTER B D, ARTHINGTON A H, et al. The ecological limits of hydrologic alteration (ELOHA): a new framework for developing regional environmental flow standards[J]. *Freshwater Biology*, 2010,55(1):147-170.
- [6] ZHANG Yongyong, ZHAI Xiaoyan, SHAO Quanxi, et al. Assessing temporal and spatial flow regime alterations in the regulated Huai River Basin, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2015,529:384-397.
- [7] ZHAO Guangju, TIAN Peng, MU Xingmin, et al. Quantifying the impact of climate variability and human activities on streamflow in the middle reaches of the Yellow River basin, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2014,519:387-398.
- [8] WU Jie, WANG Zhihui, DONG Zengchuan, et al. Analysis of natural streamflow variation and its influential factors on the Yellow River from 1957 to 2010[J]. *Water*, 2018,10(9):1155.
- [9] CONG Zhentao, YANG Dawen, GAO Bing, et al. Hydrological trend analysis in the Yellow River basin using a distributed hydrological model [J]. *Water Resources Research*, 2009,45(7):335-345.
- [10] 王娇,姜仁贵,解建仓,等. 泾河流域径流量变化特征研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2018,29(6):88-93.
- [11] 杨思雨,姜仁贵,解建仓,等. 渭河上游径流变化特征及归因研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2019,30(2):37-42.
- [12] 武玮,徐宗学,李发鹏. 渭河关中段水文情势改变程度分析[J]. *自然资源学报*, 2012,27(7):1124-1137.
- [13] MA Zhenzhen, WANG Zhongjing, XIA Ting, et al. Hydrograph-based hydrologic alteration assessment and its application to the Yellow River[J]. *Journal of Environmental Informatics*, 2014,23(1):1-13.
- [14] TIAN Xiaojing, ZHAO Guangju, MU Xingmin, et al. Hydrologic alteration and possible underlying causes in the Wuding River, China[J]. *The Science of the total environment*, 2019,693:133556.
- [15] 黄荣辉,周德刚. 气候变化对黄河径流以及源区生态和冻土环境的影响[J]. *自然杂志*, 2012,34(1):1-9.
- [16] 赵勇,裴源生,张金萍. 宁夏平原区耗水量研究[J]. *资源科学*, 2006,28(4):177-183.
- [17] REN Dongyang, XU Xu, HAO Yuanyuan, et al. Modeling and assessing field irrigation water use in a canal system of Hetao, upper Yellow River basin; application to maize, sunflower and watermelon[J]. *Journal of Hydrology*, 2016,532:122-139.
- [18] XIE Xiaowei, XU Caijun, WEN Yangmao, et al. Monitoring groundwater storage changes in the Loess Plateau using GRACE satellite gravity data, hydrological models and coal mining data[J]. *Remote Sensing*, 2018,10(4):605.
- [19] LIU Lei, LUO Yi, HE Chansheng, et al. Roles of the combined irrigation, drainage, and storage of the canal network in improving water reuse in the irrigation districts along the lower Yellow River, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2010,391(1-2):157-174.