

DOI:10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20221813

# 非一致性条件下黄河流域水文特征时空变异规律分析

赵生华<sup>1</sup>,杨自东<sup>2</sup>,何文飞<sup>3</sup>

(1. 金昌市水务投资有限责任公司, 甘肃 金昌 737100; 2. 民乐县水务局, 甘肃 张掖 734500;  
3. 南京大学地球科学与工程学院水科学系, 江苏 南京 210046)

**摘要:**精准识别由变化环境所导致的“水文一致性”的水文极值变异特征,对流域防洪、抗旱等具有重要实践意义。因此,以径流显著减少的黄河流域为例,首先,采用 Mann-Kendall 突变检验和一元线性回归方法,精准识别黄河干流径流的突变性和趋势性特征;其次,采用 13 种水文指标,揭示非一致性条件下流域水文特征的时空变异规律。结果表明,唐乃亥、头道拐、花园口、利津站的年径流量分别以 27.46、105.75、172.20、141.37 m<sup>3</sup>/(s·10a) 的速率逐年递减,且其突变年份分别为 1989、1992、1992、1984 年;径流变异前后,13 种水文特征值在时空尺度上变化不一,且中游改变程度大,源区小。研究结果对于流域水资源开发利用方式的确定提供重要理论支撑。

**关键词:**非一致性;径流变异;水文特征;黄河流域

**中图分类号:** TV212.10

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-7709(2023)04-0031-04

## 1 概况

黄河流域(图 1)地处典型的复杂气候过渡带,流域以大陆性季风气候为主,1970~2016 年多年平均降水量为 450 mm,自东南至西北,多年平均降水量递减。流域地形、地貌复杂多样、水资源时空分布不均<sup>[1,2]</sup>。在气候和下垫面变化双重影响下,流域水文过程发生剧烈变化,干流来水量显著减小,而需水量刚性增加,水资源供需矛盾突出<sup>[3]</sup>。黄河流域水情发生改变,造成众多入库洪水序列无法满足水文一致性假设。因此,精准识别由变化环境所导致的“水文一致性”的水文极值变异规律,对黄河流域防洪、抗旱等至关重要。在利用水文特征诊断流域水情方面,已有研究<sup>[4-7]</sup>侧重于单一流域的水情变化,而在大流域(气象、下

垫面空间异质性强)层面针对变化环境所导致的“水文一致性”的水文极值变异规律方面尚需进一步研究。为此,本文以黄河流域为例,自上至下,先将流域划分为 4 个子流域,即源区(唐乃亥水文站以上)、上游(唐乃亥—头道拐断面之间)、中游(头道拐—花园口断面之间)、下游(花园口断面以下);再利用 Mann-Kendall 突变检验和一元线性回归方法,识别出干流水文站径流的突变性和趋势性变化规律;最后,基于 13 种水文指标,精准识别由变化环境所导致的“水文一致性”的水文极值变异特征,以期掌握非一致性条件下流域尺度水文变异的时空异质性规律。

## 2 研究方法

### 2.1 Penman-Monteith 公式

流域潜在蒸散发量采用 1998 年世界粮农组织(FAO)推荐的 Penman-Monteith 模型计算获得<sup>[6]</sup>,其公式为:

$$E_{ET_0} = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (1)$$

式中, $E_{ET_0}$  为潜在蒸散发量,mm/d; $\Delta$  为饱和水汽压与温度的斜率,kPa/°C; $R_n$  为作物表面净辐射



图 1 流域气象和水文站点空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of meteorological and hydrological stations in basin

收稿日期: 2022-09-01, 修回日期: 2022-10-19

作者简介: 赵生华(1973-),男,硕士,研究方向为水资源系统工程,E-mail:rgbsdf555@qq.com

量, MJ/(m · d);  $G$  为土壤热通量, MJ/(m · d);  $\gamma$  为湿度计常数, kPa/°C;  $U_2$  为距离地面 2 m 高处对应的风速;  $T$  为平均气温, °C;  $e_s$  为空气饱和水汽压, kPa;  $e_a$  为实测水汽压, kPa。

### 2.2 Mann-Kendall 非参数突变检验方法

Mann-Kendall 非参数检验方法<sup>[7]</sup> 为假定检测序列为  $\{x_i\}$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ), 通过构造新序列  $m_i$ , 定义  $d_k$  为:

$$d_k = \sum_{i=1}^k m_i \quad 2 \leq k \leq n \quad (2)$$

$d_k$  均值与方差计算公式分别为:

$$E(d_k) = k(k-1)/4 \quad 2 \leq k \leq n \quad (3)$$

$$\text{Var}(d_k) = k(k-1)(2k+5)/72 \quad 2 \leq k \leq n \quad (4)$$

假定检测序列具有随机性且相互独立, 定义统计量  $U_F$  为:

$$U_F = \begin{cases} 0 & k=0 \\ \frac{d_k - E(d_k)}{\sqrt{\text{Var}(d_k)}} & 2 \leq k \leq n \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $U_F$  为正态分布, 给定显著性水平  $\alpha$ , 若  $|U_F| > U_\alpha$ , 意味着检测序列具有趋势性; 若  $U_F > 0$ , 意味着其呈上升趋势, 反之为下降趋势; 若  $U_F$  与  $U_B$  曲线 ( $U_B$  为  $U_F$  曲线的逆序排列统计量结果) 相交, 相交点即为突变点。

### 2.3 水文特征指标

为描述流域水文行为, 计算了 13 种水文指标 (总径流比、径流降水弹性、基流指数、低流量、高流量、低流量历时曲线斜率、中流量历时曲线斜率、高流量历时曲线斜率、高流量发生的频次、高流量时平均持续时间、低流量发生的频次、低流量时平均持续时间和自相关性), 即水文信号, 其包含了丰富的流域物理属性, 可用来揭示流域水文过程的变化特征, 也就是一系列对流域水文变化敏感且计算简便的数学集合公式。水文指标计算过程见文献<sup>[1, 2]</sup>, 物理描述见表 1。

表 1 13 种水文特征指标

Tab. 1 13 hydrological characteristic indicators

水文特征	简称	物理描述	单位
总径流比	$R_{Rr}$	日平均流量与日平均降雨量之比	
径流降水弹性	$Q_{QP}$	径流对年时间尺度降水变化的敏感性	
基流指数	$B_{BFI}$	日平均基流量与日径流量之比	
低流量	$Q_{Q5}$	5%百分位数对应的流量	mm/d
高流量	$Q_{Q95}$	95%百分位数对应的流量	mm/d
低流量历时曲线斜率	$F_{FIDCL}$	低流量时段内(大于 66%百分位数), 大于该流量所对应的概率	
中流量历时曲线斜率	$F_{FIDCM}$	中流量时段内(介于 33%~66%百分位数), 等于或大于该流量所对应的概率	
高流量历时曲线斜率	$F_{FIDCH}$	高流量时段内(小于 33%百分位数), 小于该流量所对应的概率	
高流量发生的频次	$F_{FEH}$	流量值大于日平均流量 9 倍所对应的天数	d/a
高流量时平均持续时间	$D_{D,H}$	流量值大于日平均流量 9 倍所持续的天数	d
低流量发生的频次	$F_{FEL}$	流量值小于日平均流量 0.2 倍所对应的天数	d/a
低流量时平均持续时间	$D_{D,L}$	流量值小于日平均流量 0.2 倍所持续的天数	d
自相关性	$A_{ACI}$	水文过程线与滞后 1 d 水文过程线的相关性	

## 3 结果与分析

基于收集的流域内 120 个气象站点 1970~2016 年逐日平均降水、气温、蒸发和同期重要水文断面逐日实测径流资料, 采用本文方法揭示由变化环境所导致的“水文一致性”的水文极值变异规律。

### 3.1 黄河干流重要水文控制断面径流年际变化特征

#### 3.1.1 径流年际变化趋势性分析

图 2 为采用一元线性回归方法诊断的黄河干流水文站的年径流量趋势性检验结果。由图 2 可知: ①自源区至下游, 线性拟合斜率整体呈先减少后增加的变化趋势, 且唐乃亥、头道拐、花园口、利津站的年径流量分别以 27.46、105.75、172.20、141.37 m<sup>3</sup>/(s · 10a) 的速率递减; ②1990 年代之前, 中游以上流域年径流量均呈增加趋势, 而 1990 年代后, 除源区外, 年径流量均显著下降 (拟合线低于 1990 年代之前均值), 且各站年径流量变化趋势不同, 即由变化环境所导致的“水文一致性”的水文极值变异程度差异显著。表 2 为各站

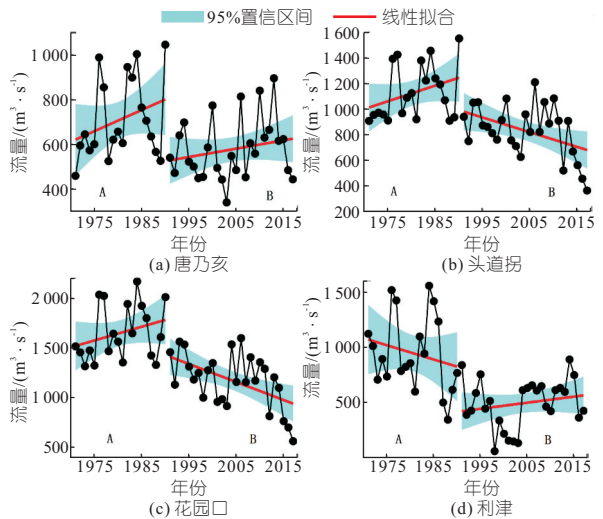


图 2 黄河干流重要水文控制断面 1970~2016 年年径流序列趋势性检验结果

Fig. 2 Trend test results of annual average runoff at important control sections of the main stream of the Yellow River from 1970 to 2016

表 2 一元线性回归模型相关统计量检验结果

Tab. 2 Statistical test results of univariate linear regression model

水文站	拟合阶段	回归模型	$R^2$	$F$ 值	概率 $p$	置信区间/mm	
						上限	下限
唐乃亥	A	$y_1 = 9.45x_1 + 609.66$	0.09	1.92	0.18	23.78	-4.89
	B	$y_2 = 3.72x_2 + 448.74$	0.04	1.22	0.28	10.62	-3.19
头道拐	A	$y_1 = 12.27x_1 + 997.48$	0.11	2.33	0.14	29.15	-4.60
	B	$y_2 = -11.53x_2 + 1219.59$	0.19	6.17	0.02	-1.97	-21.09
花园口	A	$y_1 = 12.92x_1 + 1503.68$	0.08	1.72	0.21	-6.10	-30.07
	B	$y_2 = -18.08x_2 + 1787.89$	0.27	9.66	0.00	-6.10	-30.06
利津	A	$y_1 = -12.91x_1 + 1082.70$	0.05	0.92	0.35	15.30	-41.11
	B	$y_2 = 5.51x_2 + 305.18$	0.04	1.03	0.31	16.71	-5.67

年径流量一元线性回归模型相关统计量检验结果。由表 2 可知,1990 年代之前,各站的年径流量趋势检验概率  $p$  均大于 0.05,而 1990 年代后,头道拐和花园口的年径流量趋势检验概率  $p$  均小于 0.05,这意味着两站年径流量均呈显著减小趋势。

### 3.1.2 径流年际变化突变性分析

径流年际变化趋势性分析表明,黄河干流年径流序列存在非一致性,因此采用非参数 Mann-Kendall 突变检验方法识别其突变年份,从而进一步评估流域水文特征的变异规律。

图 3 为黄河干流各站年径流序列突变性检验结果。由图 3 可知,95% 置信水平内,唐乃亥、头道拐、花园口、利津站年径流量的突变点分别为 1989、1992、1992、1984 年。同时,对于唐乃亥站,  $U_F$  和  $U_B$  曲线存在多个交点,即其发生了 3 次变异,突变年份分别为 1989、2008、2015 年。综合检验结果和源区实际情况,确定 1989 年为源区径流变异点,与已有研究结果一致<sup>[8]</sup>。冯家豪等<sup>[9]</sup>发现黄河中游花园口水文站年径流量序列于 1991 年附近发生变异,这与本文花园口站径流突变检验年份为 1992 年相吻合。

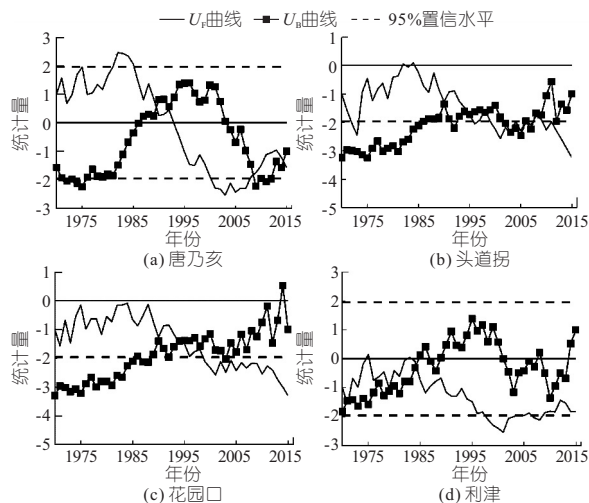


图 3 黄河干流重要水文控制断面 1970~2016 年年径流序列突变性检验结果

Fig. 3 Mutability test results of annual average runoff at important control sections of the main stream of the Yellow River from 1970 to 2016

### 3.2 径流变异前后流量历时曲线下不同量级流量变化规律分析

流量历时曲线由给定时段内流域流量值及其相对历时绘制获得,其能很好地揭示径流量的时程分布特征,每个流量值对应一个概率值。其中,概率表示给定流量等于或超过某一特定值的时间占全部时间的百分比。

图 4 为径流变异前后 4 个子流域流量历时曲线下不同量级流量的水文特征检验结果。图 4 中,  $Q$ 、 $Q'$  分别为流量、流量中位数。由图 4 可知: ①径流变异前后,流量历时曲线在高流量下(频率在 0~0.02 之间)的径流差异大; ②高流量、中流量、低流量对应的斜率绝对值在 4 个子流域中存在差异,以下游为例,变异前,低流量、中流量、高流量对应的斜率绝对值分别为 -0.22、-5.67、-61.84,而变异后其值分别为 -1.21、-3.40、-42.94; ③低流量的斜率绝对值变大,而中流量和高流量的斜率绝对值变小,意味着径流变异后下游极端洪涝事件减少。

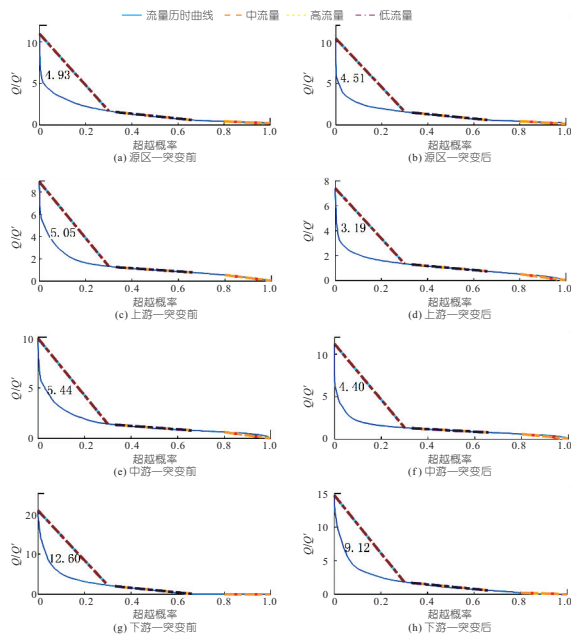


图 4 四个子流域流量历时曲线下不同量级流量变化规律检验结果

Fig. 4 Variation law of discharge of different magnitude under discharge duration curve of four sub-basins

### 3.3 径流变异前后流域水文特征变化分析

表 3 为 4 个子流域径流变异前后水文特征值

表 3 不同子流域径流变异前后水文特征值变化结果  
Tab. 3 Variation of hydrological characteristic values before and after runoff variation in different sub-basins

水文特征指标	变异前				变异后			
	源区	上游	中游	下游	源区	上游	中游	下游
$R_{Rc}$	531.17	763.98	939.13	297.12	431.55	513.89	610.98	249.30
$Q_{QP}$	1.92	1.04	0.71	-2.62	1.33	0.28	-0.21	0.52
$B_{BFT}$	0.83	0.75	0.71	0.61	0.87	0.75	0.71	0.59
$Q_{QF}$	146.00	110.00	323.00	10.82	136.00	104.00	220.00	0.00
$Q_{Q5}$	2 010.00	2 190.00	3 730.00	2 170.00	1 490.00	1 140.00	2 020.00	1 830.00
$F_{FDC.L}$	-1.08	-2.54	-3.11	-0.22	-1.51	-2.53	-2.68	-1.21
$F_{FDC.M}$	-2.88	-1.41	-1.69	-5.67	-2.71	-1.65	-1.52	-3.40
$F_{FDC.H}$	-30.92	-25.36	-28.20	-61.84	-23.39	-20.14	-32.93	-42.94
$F_{F.E.H}$	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.02
$D_{D.E.H}$	9.00	0.00	3.33	8.69	1.00	0.00	1.00	5.63
$F_{F.E.L}$	0.04	0.08	0.03	0.41	0.01	0.05	0.02	0.23
$D_{D.E.L}$	10.00	12.18	5.24	43.63	8.80	11.41	7.41	23.52
$A_{ACI}$	0.99	0.98	0.96	0.98	0.99	0.97	0.95	0.97

变化结果。由表 3 可知:①径流变异前,4 个子流域的多年日平均降雨量分别为 1.33、0.98、1.34、1.84 mm,而变异后,其值分别为 1.33、0.98、1.31、2.00 mm;同时,变异前源区、上游、中游、下游的多年日平均流量分别为 706.44、744.94、1 256.10、548.51 m<sup>3</sup>/s,而变异后,其值分别为 572.88、504.51、799.07、499.21 m<sup>3</sup>/s;②径流变异后,径流对年时间尺度降水变化的敏感性(Q<sub>QP</sub>)降低,意味着气候和下垫面变化造成流域呈暖干化态势,致使径流对降水的敏感性降低,其与肖凤劲等<sup>[10,11]</sup>发现的湿润区径流对降水的敏感性大于干旱区具有很好的一致性;③采用数字滤波 Chapman-Maxwell 方法<sup>[12]</sup>得到的基流指标(B<sub>BFI</sub>)结果表明,自上游至下游,基流对河川径流的贡献降低,且径流变异后对下游的影响大;④径流变异后,4 个子流域的极端低流量(Q<sub>5</sub>)、高流量(Q<sub>95</sub>)值均减小,且中游减少量尤为突出;⑤高、低流量发生频次和历时结果表明,径流变异后 4 个子流域极端洪涝/干旱事件发生频次减少,且历时短;⑥径流变异后,4 个子流域的 A<sub>ACI</sub> 值均减小,其归因于水库的强调蓄作用,改变了水文产汇流历时。

## 4 结 论

- a. 黄河干流水文站年径流量以不同速率逐年递减,中游减小量最大,且通过了 95% 置信水平检验。
- b. 唐乃亥、头道拐、花园口、利津站径流突变点分别为 1989、1992、1992、1984 年。
- c. 径流变异前后,自上游至下游,13 种水文指标均发生了变异,且对极端高流量影响大。

# Analysis of Temporal and Spatial Variation of Hydrological Characteristics in Yellow River Basin Under Inconsistent Conditions

ZHAO Sheng-hua<sup>1</sup>, YANG Zi-dong<sup>2</sup>, HE Wen-fei<sup>3</sup>

(1. Jinchang Water Investment Co., Ltd, Jinchang 737100, China; 2. Minle County Water Affairs Bureau, Zhangye 734500, China; 3. Department of Hydro-Sciences, School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210046, China)

**Abstract:** It is of great practical significance for flood control and drought relief in the basin to accurately identify the variation characteristics of the extreme value of "hydrological consistency" caused by changing environment. Therefore, this paper took the Yellow River basin with significantly reduced runoff as an example. Firstly, The Mann-Kendall test method and univariate linear regression method were used to accurately identify the abrupt and trend characteristics of runoff at important hydrological stations in the main stream of the Yellow River. Secondly, 13 hydrological characteristic indexes were used to reveal the temporal and spatial variation law of hydrological characteristics of the basin under the condition of inconsistency. The results show that the annual runoff of Tangnaihai, Toudaoguai, Huayuankou and Lijin stations decreases year by year at the rate of 27.46, 105.75, 172.20 and 141.37 m<sup>3</sup>/(s · 10a) respectively, and the abrupt change years are 1989, 1992, 1992 and 1984 respectively. Before and after runoff variation, 13 hydrological characteristic values vary in time and space scale, and the change degree in the middle reaches is large, and the source area is small. The research results provide important theoretical support for determining the development and utilization mode of water resources in the basin.

**Key words:** inconsistency; runoff variation; hydrological behavior; Yellow River Basin

## 参 考 文 献:

- [1] 赵勇,何凡,何国华,等. 全域视角下黄河断流再审视与现状缺水识别[J]. 人民黄河, 2020, 42(4): 42-46.
- [2] 武见,明广辉,周翔南,等. 黄河流域需水分层预测[J]. 水资源保护, 2020, 36(5): 31-37.
- [3] 周帅,王义民,郭爱军,等. 黄河流域未来水资源时空变化[J]. 水力发电学报, 2018, 37(3): 28-39.
- [4] 郭文献,胡鉴闻,王鸿翔. 乌江流域径流变化特征及归因识别[J]. 水电能源科学, 2022, 40(5): 14-17, 33.
- [5] SCHAEFLI B. Snow hydrology signatures for model identification within a limits-of-acceptability approach[J]. Hydrological processes, 2016, 30(22): 4019-4035.
- [6] 王国庆,乔翠平,王婕,等. 全球变化下澜沧江-湄公河流域水量平衡模拟[J]. 大气科学学报, 2020, 43(6): 1010-1017.
- [7] 班璇,姜刘志,曾小辉,等. 三峡水库蓄水后长江中游水沙时空变化的定量评估[J]. 水科学进展, 2014, 25(5): 650-657.
- [8] 周帅,王义民,郭爱军,等. 气候变化和人类活动对黄河源区径流影响的评估[J]. 西安理工大学学报, 2018, 34(2): 205-210.
- [9] 冯家豪,赵广举,穆兴民,等. 黄河中游区间干支流径流变化特征与归因分析[J]. 水力发电学报, 2020, 39(8): 90-103.
- [10] 肖凤劲,徐雨晴,黄大鹏,等. 气候变化对黄河流域生态安全影响及适应对策[J]. 人民黄河, 2021, 43(1): 10-14, 52.
- [11] LIU Q, CUI B. Impacts of climate change/variability on the streamflow in the Yellow River Basin, China[J]. Ecological modelling, 2011, 222(2): 268-274.
- [12] 樊晶晶,刘纯,穆征等. 不同基流分割方法在秦岭山区-黄土高原过渡带的对比应用及其演化规律研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2022, 43(3): 1-10, 27.